

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD
DEL CUSCO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,
INFORMÁTICA Y MECÁNICA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



TESIS

**ANÁLISIS DE LOS INDICADORES DE DESEMPEÑO DE UNA
RED LTE-ADVANCED Y PROPUESTA DE DISEÑO PARA LA
MEJORA DE LA CALIDAD DE SERVICIO EN LA CIUDAD DE
SICUANI – CUSCO**

PRESENTADO POR:

BR. YURI RENEE APAZA CALLO

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRÓNICO**

ASESOR:

M.SC. ING. JORGE LUIS ARIZACA CUSICUNA

CUSCO – PERÚ

2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada: Análisis de los
indicadores de desempeño de una red LTE-Advanced y Propuesta de diseño
para la mejora de la calidad de servicio en la ciudad de Sicuani - Cusco
presentado por: Yuri Renee Apaza Callo con DNI Nro.: 43863550
presentado por: con DNI Nro.:
para optar al Título Profesional/grado académico de: Ingeniero Electrónico

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 3 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Artículo 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 8 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y acciones.	Marque con X
Del 1 al 10 %	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30%	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayores a 31 %	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 08 de febrero de 20 24



Firma

Post firma: Jorge Luis Arizaca Cusicuma

Nro. De DNI: 42348906

ORCID del Asesor 0000-0003-2658-5492

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: <https://unsaac.turartim.com/viewer/submissions/oid:27259:326896929?locale=es-nx>

NOMBRE DEL TRABAJO

Tesis_Yuri_Apaza_Final.pdf

AUTOR

Yuri Renee Apaza Callo

RECUENTO DE PALABRAS

35606 Words

RECUENTO DE CARACTERES

188186 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

218 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

17.7MB

FECHA DE ENTREGA

Feb 8, 2024 9:33 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Feb 8, 2024 9:36 AM GMT-5

● 8% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 7% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 4% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 9 palabras)

DEDICATORIA

A Dios por darme la vida y salud, y permitir que llegue a este momento tan importante en mi vida.

A mis queridos padres, por todo el cariño, aprecio y su apoyo incondicional, sin su ayuda no lo hubiera logrado.

A mis hermanos(as) por vuestra confianza y aliento, porque siempre confiaron en mí, gracias por tanto cariño.

A mis queridas sobrinas y sobrino que con su inocencia y dulzura me impulsan a ser una mejor persona.

AGRADECIMIENTO

A mis queridos padres, hermanos, sobrinos y cuñada, gracias por vuestra ayuda en todo este tiempo.

Mi más sincero agradecimiento a mi asesor M.Sc. Jorge Luis Arizaca Cusicuna, por su guía, consejos y soporte para poder concluir este proyecto de tesis.

Al M.Sc. Fernando Tagle Carbajal y Mg. Milton Velasquez Curo, por todos sus consejos que hicieron posible culminar esta tesis.

De igual manera agradezco a los docentes de la escuela profesional de Ingeniera Electrónica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, por todo el conocimiento brindando a lo largo de los años de mi formación profesional.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTO	III
ÍNDICE GENERAL	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
RESUMEN.....	XVI
ABSTRACT.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XVIII
CAPÍTULO I: GENERALIDADES.....	19
1.1 Ámbito geográfico	19
1.2 Planteamiento del problema.....	19
1.3 Formulación del problema	21
1.3.1 Problema general	21
1.3.2 Problemas específicos.....	21
1.4 Objetivos del estudio.....	22
1.4.1 Objetivo general.....	22
1.4.2 Objetivos específicos	22
1.5 Justificación	23
1.6 Alcances y limitaciones	24
1.6.1 Alcances.....	24
1.6.2 Limitaciones.....	24
1.7 Metodología	25

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....	26
2.1 Antecedentes	26
2.2 Bases teóricas.....	28
2.2.1 Tecnología LTE	28
2.2.2 Características de la tecnología LTE	29
2.2.3 Arquitectura LTE.....	29
2.2.3.1 E-UTRAN (Envolved Radio Access Network)	31
2.2.3.2 EPC (Evolved Packet Core).....	32
2.2.3.3 UE (User Equipment)	33
2.2.4 Resource Block (Bloque de recurso)	34
2.2.4.1 Anchos de banda de transmisión.....	35
2.2.4.2 Bandas de operación para LTE	37
2.2.5 Técnicas de duplexado FDD y TDD.....	38
2.2.6 Tecnologías de nivel Físico	39
2.2.6.1 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex).....	39
2.2.6.2 OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)	40
2.2.6.3 SC - FDMA (Single Carrier - Frequency Division Multiple Access)	42
2.2.7 LTE-Advanced.....	43
2.2.7.1 Arquitectura LTE-Advanced	44
2.2.7.2 Características para LTE-Advanced	44
2.2.7.3 MIMO (Multiple Input – Multiple Output)	50
2.2.8 QoS - Quality of Service.....	53
2.2.8.1 Factores que afectan la calidad de las redes móviles	54

2.2.9	Indicadores de medición para LTE	54
2.2.10	Modelos de propagación.....	56
2.2.10.1	Modelo de Propagación Okumura – Hata	56
2.2.10.2	Modelo de Propagación COST 231 – Hata.....	58
2.2.10.3	Modelo SPM (Standard Propagation Model).....	59
 CAPÍTULO III: DIAGNOSTICO SITUACIONAL DEL CASO DE ESTUDIO		61
3.1	Reporte de recolección de datos	61
3.1.1	Descripción general del ámbito geográfico	61
3.1.2	Diagnostico situacional de la red LTE-Advanced actual.....	62
3.2	Medición y evaluación de parámetros LTE-Advanced en la ciudad de Sicuani	80
3.2.1	Reporte de medición de los indicadores para la red LTE-700.....	83
3.2.1.1	Resultados generales de medición de la red LTE-700.....	84
3.2.1.2	Resultados de indicadores de desempeño para LTE-700.....	86
3.2.2	Reporte de medición de los indicadores para la red LTE-AWS.....	103
3.2.2.1	Resultados generales de medición de la red LTE-AWS	104
3.2.2.2	Resultados de indicadores de desempeño para LTE-AWS.....	106
 CAPÍTULO IV: DIMENSIONAMIENTO DE LA RED		122
4.1	Descripción de las Bandas de Frecuencia.....	122
4.2	Link Budget	123
4.3	Frecuencia de portadora.....	124
4.4	Sensibilidad del receptor.....	129

4.5	Análisis Link Budget para el enlace downlink	132
4.6	Análisis Link Budget para el enlace uplink	136
4.7	Radio de la celda.....	139
4.8	Cálculo para el número requerido de estaciones base	142
CAPITULO V: DISEÑO DE LA RED		143
5.1	Planificación de la red LTE-Advanced existente.....	143
5.2	Optimización de la red LTE-Advanced existente	158
5.2.1	Asignación de vecinos	158
5.2.2	Planificación de frecuencias	159
5.2.3	Planificación del Physical Cell ID	160
5.2.4	Creación de un mapa de trafico	160
5.3	Optimización de la red LTE-Advanced existente con ACP	161
5.4	Análisis de la red LTE-Advanced existente optimizada.....	163
5.4.1	Análisis de predicciones de cobertura de la red sin mapa de trafico	163
5.4.2	Análisis predicciones de la red que dependen del trafico	167
5.5	Propuesta de mejora del diseño actual	170
5.6	Optimización de la red LTE-Advanced mejorada con ACP.....	173
5.7	Análisis de la red LTE-Advanced con mejora optimizada	175
5.7.1	Análisis predicciones de cobertura de la red sin mapa de trafico	175
5.7.2	Análisis predicciones de la red que dependen del trafico	178

CAPÍTULO VI: RESULTADOS.....	183
6.1 Nivel de Señal (<i>Signal level</i>).....	183
6.2 RSPR.....	184
6.3 SINR	185
6.4 Throughput.....	185
6.5 Resumen de resultados.....	186
6.6 Comparación de resultados de los indicadores	186
6.7 Estado de la latencia en la red LTE-Advanced mejorada	190
CONCLUSIONES.....	191
RECOMENDACIONES	192
BIBLIOGRAFÍA.....	193
ANEXOS.....	198
Anexo A: Hoja de datos de las antenas sectoriales por eNodeB	198
Anexo B: Identificación de celdas y datos relevantes de cada eNodeB	209
Anexo C: Mapas de medición Drive Test – Sicuani.....	211
Anexo D: Canales E-UTRA para LTE	213
Anexo E: Muestras obtenidas de los recorridos Drive Test.....	215
Anexo F: Tipos de predicciones en el <i>software Atoll</i>	216
Anexo G: Valores de la desviación estándar de <i>Shadowing</i>	217
Anexo H: Nuevas estaciones base	218

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: RB en cada ancho de banda	36
Tabla 2.2: Bandas de operación usadas para LTE	37
Tabla 2.3: Sub portadoras en LTE	41
Tabla 3.1: Ubicación del eNodeB Ura Sicuani	62
Tabla 3.2: Equipamiento LTE-A eNodeB Ura Sicuani	64
Tabla 3.3: Ubicación del eNodeB Sicuani – Lechemoco	67
Tabla 3.4: Equipamiento LTE-A eNodeB Sicuani – Lechemoco.....	68
Tabla 3.5: Ubicación del eNodeB Arequipa – Sicuani	71
Tabla 3.6: Equipamiento LTE-A eNodeB Arequipa – Sicuani	73
Tabla 3.7: Ubicación de eNodeB Confederación – Cusco	76
Tabla 3.8: Equipamiento LTE-A eNodeB Confederación – Cusco.....	77
Tabla 3.9: Muestras detectadas por <i>Nemo Handy</i> por eNodeB para LTE-700.....	84
Tabla 3.10: Número de muestras por sector de cada eNodeB, para LTE-700.....	85
Tabla 3.11: Niveles de potencia y lista de colores para RSRP	86
Tabla 3.12: Muestras por eNodeB del indicador RSRP para la red LTE-700	89
Tabla 3.13: Niveles de calidad de señal y lista de colores para RSRQ	92
Tabla 3.14: Muestras por eNodeB del indicador RSRQ para la red LTE-700	95
Tabla 3.15: Rangos aceptables y lista de colores para SINR.....	98
Tabla 3.16: Muestras por eNodeB del indicador SINR para la red LTE-700.....	101
Tabla 3.17: Muestras detectadas por <i>Nemo Handy</i> por eNodeB, para LTE-AWS.....	104
Tabla 3.18: Número de muestras por sector de cada eNodeB, para LTE-AWS.....	105
Tabla 3.19: Muestras por eNodeB del indicador RSRP para la red LTE-AWS	109
Tabla 3.20: Muestras por eNodeB del indicador RSRQ para la red LTE-AWS	114

Tabla 3.21: Muestras por eNodeB del indicador SINR para la red LTE-AWS.....	119
Tabla 4.1: Número de canales para las bandas 4 y 28	125
Tabla 4.2: Tipos de modulaciones para LTE	131
Tabla 4.3: Valores máximos y mínimos por modulación para LTE.....	131
Tabla 4.4: Parámetros del enlace <i>downlink</i> para el <i>Link Budget</i>	132
Tabla 4.5: Límites de sensibilidad en <i>downlink</i> , según el tipo de modulación.....	133
Tabla 4.6: Valores para las pérdidas por propagación en el enlace <i>downlink</i>	136
Tabla 4.7: Parámetros del enlace <i>uplink</i> para el <i>Link Budget</i>	136
Tabla 4.8: Límites de sensibilidad en <i>uplink</i> , según el tipo de modulación	137
Tabla 4.9: Valores para las pérdidas por propagación en el enlace <i>uplink</i>	139
Tabla 4.10: Valores según tipo de modulación, de los radios de cobertura.....	140
Tabla 4.11: Valores de área de cobertura según modulación	142
Tabla 5.1: Parámetros de canalización.....	147
Tabla 5.2: Valores de nivel medio para los indicadores de la red existente	157
Tabla 6.1: Niveles aceptables de los indicadores.....	183
Tabla 6.2: Resumen de resultados para indicadores de desempeño de la red.....	186
Tabla 6.3: Tabla comparativa de los niveles de señal (<i>signal level</i>).....	187
Tabla 6.4: Tabla comparativa de los niveles de RSRP.....	188
Tabla 6.5: Tabla comparativa de los niveles de SINR.....	189
Tabla 6.6: Tabla comparativa de los niveles de <i>throughput</i>	190

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Arquitectura LTE	30
Figura 2.2: Red de acceso E-UTRAN.....	31
Figura 2.3: Arquitectura básica de la red troncal EPC.....	32
Figura 2.4: Elementos del UE (equipo de usuario).....	34
Figura 2.5: Estructura del <i>frame</i> en LTE	35
Figura 2.6: Ancho de banda de transmisión.....	36
Figura 2.7: Duplexado FDD y TDD	38
Figura 2.8: Representación en el tiempo y frecuencia de la señal OFDM	40
Figura 2.9: Asignación de subportadoras en OFDM y OFDMA.....	41
Figura 2.10: Comparación entre OFDMA y SC-FDMA	42
Figura 2.11: <i>Carrier aggregation</i> intra e inter banda	45
Figura 2.12: <i>Codewords</i> y <i>layers</i> para 8 puertos de antena	47
Figura 2.13: Esquema de acceso múltiple.....	48
Figura 2.14: <i>Coordinated multipoint (CoMP)</i>	49
Figura 2.15: Elementos de <i>Relaying</i>	50
Figura 2.16: Técnica MIMO – funcionamiento.....	51
Figura 2.17: Modos MIMO para LTE-ADVANCED.....	52
Figura 2.18: Factores que afectan la calidad de las redes móviles	54
Figura 2.19: Trayectoria del transmisor al receptor de la señal	56
Figura 3.1: Ubicación geográfica - estaciones base Sicuani.....	61
Figura 3.2: Ubicación geográfica eNodeB Ura Sicuani.....	63
Figura 3.3: Vista panorámica eNodeB Ura Sicuani.....	63
Figura 3.4: Baseband LTE-A eNodeB Ura Sicuani.....	64
Figura 3.5: Distribución RRUS eNodeB Ura Sicuani	65
Figura 3.6: Azimut de sectores eNodeB Ura Sicuani	65
Figura 3.7: Parámetros sistema radiante eNodeB Ura Sicuani	66
Figura 3.8: Test de velocidad LTE-A eNodeB Ura Sicuani	66
Figura 3.9: Ubicación geográfica eNodeB Sicuani – Lechemoco.....	67
Figura 3.10: Vista panorámica eNodeB Sicuani – Lechemoco	68
Figura 3.11: Baseband LTE-A eNodeB Sicuani – Lechemoco	69
Figura 3.12: Distribución RRUS eNodeB Sicuani – Lechemoco.....	69

Figura 3.13: Azimut de sectores eNodeB Sicuani - Lechemoco	70
Figura 3.14: Parámetros sistema radiante eNodeB Sicuani – Lechemoco	70
Figura 3.15: Test de velocidad LTE-A eNodeB Sicuani – Lechemoco	71
Figura 3.16: Ubicación geográfica eNodeB Arequipa – Sicuani.....	72
Figura 3.17: Vista panorámica eNodeB Arequipa – Sicuani.....	72
Figura 3.18: Baseband LTE-A eNodeB Arequipa – Sicuani.....	73
Figura 3.19: Distribución RRUS eNodeB Arequipa – Sicuani.....	74
Figura 3.20: Azimut de sectores eNodeB Arequipa – Sicuani	74
Figura 3.21: Parámetros sistema radiante eNodeB Arequipa – Sicuani	75
Figura 3.22: Test de velocidad LTE-A eNodeB Arequipa – Sicuani	75
Figura 3.23: Ubicación geográfica eNodeB Confederación – Cusco	76
Figura 3.24: Vista panorámica eNodeB Confederación – Cusco	77
Figura 3.25: Baseband LTE-A eNodeB Confederación – Cusco	78
Figura 3.26: Distribución RRUS eNodeB Confederación – Cusco.....	78
Figura 3.27: Azimut de sectores eNodeB Confederación – Cusco.....	79
Figura 3.28: Parámetros sistema radiante eNodeB Confederación – Cusco	79
Figura 3.29: Test de velocidad LTE-A eNodeB Confederación – Cusco.....	80
Figura 3.30: Características UE <i>Samsung Galaxy S8+ - Nemo Handy</i>	81
Figura 3.31: Aplicativo <i>Nemo Handy</i> instalado en el UE.....	82
Figura 3.32: Área geografía de estudio delimitada.....	82
Figura 3.33: Selección de LTE FDD 700 (banda 28) en <i>Nemo Handy</i>	83
Figura 3.34: Porcentaje de acceso por eNodeB para LTE-700.....	84
Figura 3.35: Acceso de conectividad por sector en cada eNodeB para LTE-700	85
Figura 3.36: Medición RSRP para LTE-700, eNodeB Ura Sicuani	87
Figura 3.37: Medición RSRP para LTE-700, eNodeB Sicuani – Lechemoco.....	87
Figura 3.38: Medición RSRP para LTE-700, eNodeB Arequipa – Sicuani	88
Figura 3.39: Medición RSRP para LTE-700, eNodeB Confederación – Cusco.....	88
Figura 3.40: Resultado estadístico RSRP - LTE 700, eNodeB Ura Sicuani.....	89
Figura 3.41: Resultado estadístico RSRP - LTE 700, eNodeB Sicuani-Lechemoco.....	90
Figura 3.42: Resultado estadístico RSRP - LTE 700, eNodeB Arequipa-Sicuani	90
Figura 3.43: Resultado estadístico RSRP - LTE 700, eNodeB Confederación-Cusco.....	91
Figura 3.44: Medición RSRQ para LTE-700, eNodeB Ura Sicuani.....	93
Figura 3.45: Medición RSRQ para LTE-700, eNodeB Sicuani – Lechemoco.....	93

Figura 3.46: Medición RSRQ para LTE-700, eNodeB Arequipa – Sicuani.....	94
Figura 3.47: Medición RSRQ para LTE-700, eNodeB Confederación – Cusco.....	94
Figura 3.48: Resultado estadístico RSRQ - LTE 700, eNodeB Ura Sicuani.....	95
Figura 3.49: Resultado estadístico RSRQ - LTE 700, eNodeB Sicuani-Lechemoco.....	96
Figura 3.50: Resultado estadístico RSRQ - LTE 700, eNodeB Arequipa-Sicuani.....	96
Figura 3.51: Resultado estadístico RSRQ - LTE 700, eNodeB Confederación-Cusco....	97
Figura 3.52: Medición SINR para LTE-700, eNodeB Ura Sicuani.....	99
Figura 3.53: Medición SINR para LTE-700, eNodeB Sicuani – Lechemoco.....	99
Figura 3.54: Medición SINR para LTE-700, eNodeB Arequipa – Sicuani.....	100
Figura 3.55: Medición SINR para LTE-700, eNodeB Confederación – Cusco.....	100
Figura 3.56: Resultado estadístico SINR - LTE 700, eNodeB Ura Sicuani.....	101
Figura 3.57: Resultado estadístico SINR - LTE 700, eNodeB Sicuani-Lechemoco.....	102
Figura 3.58: Resultado estadístico SINR - LTE 700, eNodeB Arequipa-Sicuani.....	102
Figura 3.59: Resultado estadístico SINR - LTE 700, eNodeB Confederación-Cusco ...	103
Figura 3.60: Selección de LTE FDD 2100 AWS (banda 4) en <i>Nemo Handy</i>	104
Figura 3.61: Porcentaje de acceso por eNodeB para LTE-AWS.....	105
Figura 3.62: Acceso de conectividad por sector en cada eNodeB para LTE-AWS.....	106
Figura 3.63: Medición RSRP para LTE-AWS, eNodeB Ura Sicuani.....	107
Figura 3.64: Medición RSRP para LTE-AWS, eNodeB Sicuani – Lechemoco.....	107
Figura 3.65: Medición RSRP para LTE-AWS, eNodeB Arequipa – Sicuani.....	108
Figura 3.66: Medición RSRP para LTE-AWS, eNodeB Confederación – Cusco.....	108
Figura 3.67: Resultado estadístico RSRP - LTE AWS, eNodeB Ura Sicuani.....	109
Figura 3.68: Resultado estadístico RSRP - LTE AWS, eNodeB Sicuani-Lechemoco...	110
Figura 3.69: Resultado estadístico RSRP - LTE AWS, eNodeB Arequipa-Sicuani.....	110
Figura 3.70: Resultado estadístico RSRP - LTE AWS eNodeB Confederación-Cusco.	111
Figura 3.71: Medición RSRQ para LTE-AWS, eNodeB Ura Sicuani.....	112
Figura 3.72: Medición RSRQ para LTE-AWS, eNodeB Sicuani – Lechemoco.....	112
Figura 3.73: Medición RSRQ para LTE-AWS, eNodeB Arequipa – Sicuani.....	113
Figura 3.74: Medición RSRQ para LTE-AWS, eNodeB Confederación – Cusco.....	113
Figura 3.75: Resultado estadístico RSRQ - LTE AWS, eNodeB Ura Sicuani.....	114
Figura 3.76: Resultado estadístico RSRQ - LTE AWS, eNodeB Sicuani-Lechemoco..	115
Figura 3.77: Resultado estadístico RSRQ - LTE AWS, eNodeB Arequipa-Sicuani.....	115
Figura 3.78: Resultado estadístico RSRQ - LTE AWS eNodeB Confederación-Cusco	116

Figura 3.79: Medición SINR para LTE-AWS, eNodeB Ura Sicuani	117
Figura 3.80: Medición SINR para LTE-AWS, eNodeB Sicuani – Lechemoco	117
Figura 3.81: Medición SINR para LTE-AWS, eNodeB Arequipa – Sicuani	118
Figura 3.82: Medición SINR para LTE-AWS, eNodeB Confederación – Cusco	118
Figura 3.83: Resultado estadístico SINR - LTE AWS, eNodeB Ura Sicuani	119
Figura 3.84: Resultado estadístico SINR - LTE AWS, eNodeB Sicuani-Lechemoco ...	120
Figura 3.85: Resultado estadístico SINR - LTE AWS, eNodeB Arequipa-Sicuani	120
Figura 3.86: Resultado estadístico SINR - LTE AWS, eNodeB Confederación-Cusco	121
Figura 4.1: Banda 700 MHz.....	122
Figura 4.2: Banda 1700/2100 MHz (AWS).....	123
Figura 4.3: <i>Link Budget</i> para enlace <i>downlink</i>	124
Figura 4.4: <i>Link Budget</i> para el enlace <i>uplink</i>	124
Figura 4.5: Área de un eNodeB con tres sectores	141
Figura 5.1: Creación en el <i>software Atoll</i> de un nuevo proyecto.....	143
Figura 5.2: Coordenadas ciudad de Sicuani en <i>software Atoll</i>	144
Figura 5.3: Generación de archivo .grd	144
Figura 5.4: a) Mapa en relieve b) Mapa online de ubicación – <i>software atoll</i>	145
Figura 5.5: a) Coordenadas y b) Ubicación de los eNodeB – Sicuani.....	146
Figura 5.6: Configuración de parámetros globales	147
Figura 5.7: Configuración de banda de frecuencia	148
Figura 5.8: Valores por defecto del parámetro k	149
Figura 5.9: Calibración del modelo SPM en <i>Atoll</i>	149
Figura 5.10: Calibración del modelo SPM con datos del <i>drive test</i>	150
Figura 5.11: Configuración de antena para eNodeB Ura Sicuani.....	151
Figura 5.12: Configuración de antena para eNodeB Sicuani – Lechemoco	151
Figura 5.13: Configuración de antena para eNodeB Arequipa – Sicuani.....	152
Figura 5.14: Configuración de antena para eNodeB Confederación – Cusco	153
Figura 5.15: Configuración del transmisor	153
Figura 5.16: Configuración MU-MIMO en el eNodeB para Tx/ Rx.....	154
Figura 5.17: Adición de portadora secundaria.....	155
Figura 5.18: Configuración de servicios – <i>software atoll</i>	155
Figura 5.19: Terminal móvil configurado.....	156
Figura 5.20: Configuración de movilidad.....	156

Figura 5.21: Parámetros iniciales en cada eNodeB	157
Figura 5.22: Configuración automática de vecinos	158
Figura 5.23: Configuración automática de frecuencias	159
Figura 5.24: Configuración automática del <i>Physical Cell ID</i>	160
Figura 5.25: Mapa de tráfico creada	161
Figura 5.26: Visualización de cambios de parámetros en las antenas	162
Figura 5.27: Cobertura por transmisor.....	163
Figura 5.28: Cobertura por nivel de señal.....	164
Figura 5.29: Predicción de zonas solapadas	165
Figura 5.30: Predicción de RSRP	166
Figura 5.31: Cobertura por nivel de <i>throughput</i> en <i>downlink</i>	167
Figura 5.32: Potencia del canal PDSCH – <i>downlink</i>	168
Figura 5.33: Predicción $C/(I+N)$ – PDSCH <i>downlink</i>	169
Figura 5.34: Área de servicio en <i>downlink</i> con mejora	170
Figura 5.35: Configuración de nuevos eNodeBs (site5).....	171
Figura 5.36: Ubicación de nuevos eNodeBs.....	171
Figura 5.37: Configuración de transmisores para nuevos eNodeBs	172
Figura 5.38: Implementación de MU-MIMO y <i>carrier aggregation</i>	173
Figura 5.39: Cambio de parámetros de las antenas.....	174
Figura 5.40: Parámetros finales de la red.....	174
Figura 5.41: Cobertura por transmisor con mejora.....	175
Figura 5.42: Cobertura por nivel de señal con mejora	176
Figura 5.43: Predicción de zonas solapadas con mejora	177
Figura 5.44: Predicción de RSRP con mejora	178
Figura 5.45: Cobertura por nivel de <i>throughput</i> en <i>downlink</i> con mejora.....	179
Figura 5.46: Potencia de canal PDSCH – <i>downlink</i> con mejora.....	180
Figura 5.47: Predicción $C/(I+N)$ – PDSCH <i>downlink</i> con mejora	181
Figura 5.48: Área de servicio en <i>downlink</i> con mejora	182
Figura 6.1: (a) Nivel de señal existente optimizado, (b) Nivel de señal mejorado.....	184
Figura 6.2: (a) RSRP existente optimizado, (b) RSRP mejorado.....	184
Figura 6.3: (a) SINR existente optimizado, (b) SINR mejorado	185
Figura 6.4: (a) <i>Throughput</i> existente optimizado, (b) <i>Throughput</i> mejorado.....	186

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo principal: Analizar los indicadores de desempeño de una red LTE-Advanced y plantear una propuesta de diseño para la mejora de la calidad de servicio de un operador de telefonía móvil en la ciudad de Sicuani. En el desarrollo de la investigación, se emplea una metodología enmarcada en el ámbito descriptivo y aplicativo, para lo cual primeramente se llegó a identificar el estado actual de los parámetros RSRP, RSRQ y SINR mediante recorridos *drive test* independientes para las redes LTE-700 y LTE-AWS (frecuencias que mediante un *carrier aggregation* constituyen la red LTE-Advanced) con el uso de la aplicación para *smartphone Nemo Handy* en el UE de prueba, donde se obtuvieron 7023 y 7035 muestras respectivamente, las cuales fueron analizadas y evaluadas. Posteriormente haciendo uso de los modelos de propagación *Okumura-Hata* para la banda 28 frecuencia de 700 MHz y *Cost-231* para la banda 4 frecuencia 2100 MHz (AWS) se eligió la frecuencia de cálculo con la cual se determinó que se necesitan seis estaciones base como mínimo para poder garantizar una adecuada cobertura y calidad del servicio de la red LTE-Advanced en el área geográfica de estudio de 11km². Haciendo uso del *software* de planificación *Atoll* se realizó la configuración del diseño y evaluación del estado actual de los indicadores de la red, para luego realizar su optimización con el fin de mejorar su desempeño. Posterior a ello se analiza la propuesta que mejoraría la calidad de servicio de la red LTE-Advanced actual, donde los resultados de las simulaciones muestran que al incorporar los dos nuevos eNodeBs, el nivel de la señal aumentaría un 39.59%, el valor RSRP aumentaría un 34.76%, el valor SINR aumentaría un 24.03% y el nuevo *mean throughput* sería de 54.81Mbps.

Palabras Clave: Indicadores de desempeño, LTE-Advanced, Calidad de Servicio (QoS).

ABSTRACT

The main objective of this research is to analyze the performance indicators of an LTE-Advanced network and to propose a design proposal to improve the quality of service of a mobile telephony operator in the city of Sicuani. In the development of the research, a methodology framed in the descriptive and applicative scope is used, for which first came to identify the current state of the RSRP, RSRQ and SINR parameters through independent drive test runs for LTE-700 and LTE-AWS networks (frequencies that through carrier aggregation constitute the LTE-Advanced network) with the use of the smartphone application Nemo Handy in the test UE, where 7023 and 7035 samples were obtained respectively, which were analyzed and evaluated. Subsequently, using the Okumura-Hata propagation models for the 700 MHz frequency band 28 and Cost-231 for the 2100 MHz frequency band 4 (AWS), the calculation frequency was chosen with which it was determined that a minimum of six base stations are needed to ensure adequate coverage and quality of service of the LTE-Advanced network in the geographical area of study of 11km². Using the Atoll planning software, the design configuration and evaluation of the current state of the network indicators was carried out, and then optimized to improve its performance. Subsequently, the proposal that would improve the quality of service of the current LTE-Advanced network was analyzed, where the results of the simulations show that by incorporating the two new eNodeBs, the signal level would increase by 39.59%, the RSRP value would increase by 34.76%, the SINR value would increase by 24.03% and the new mean throughput would be 54.81Mbps.

Keywords: Performance indicators, LTE-Advanced, Quality of Service (QoS).

INTRODUCCIÓN

El proyecto de investigación presenta el análisis de desempeño de los indicadores de una red móvil LTE-Advanced y así mismo una propuesta de diseño para incrementar la calidad de servicio para un operador móvil en la ciudad de Sicuani, con el fin de lograr una mejora de la cobertura y calidad de señal para así ofrecer un mejor servicio de la red móvil. Para tal fin se propone un diseño de mejora utilizando la herramienta de simulación *Atoll*. La presente tesis se compone de 6 capítulos. Por consiguiente, en el capítulo 1 se expone la problemática con la cual surge el proyecto, del mismo modo los objetivos que se plantearon, la justificación, los alcances y limitaciones del mismo. A continuación, en el capítulo 2 se alegan los antecedentes y se exponen conceptos teóricos esenciales para el entendimiento del proyecto introduciendo al lector en detalle de la tecnología LTE-Advanced. Seguidamente en el capítulo 3 se describe el diagnóstico situacional de la actual red LTE-Advanced en la ciudad de Sicuani, en el que también se analizan y evalúan los resultados de la prueba de *drive test*. Para luego continuar en el capítulo 4 con la explicación del proceso de dimensionamiento de la red LTE-Advanced, con el fin de estimar el mínimo número de eNodeBs necesarios para ofrecer una adecuada calidad de servicio. Enseguida en el capítulo 5 haciendo uso del *software Atoll*, se realiza la configuración del diseño de la red actual, para luego de una evaluación plantear su optimización con el fin de lograr un aumento en su desempeño; seguidamente se plantea la propuesta de diseño que lograría mejoras en la calidad de servicio de la red LTE-Advanced de la ciudad de Sicuani, donde se incorporan dos nuevos eNodeBs al diseño existente y se realiza también su optimización. Luego se evalúan varias simulaciones de los indicadores para la red actual optimizada y de la propuesta de mejora. Por último, en el capítulo 6 se realiza un análisis comparativo de resultados de las predicciones entre la red actual optimizada, que tiene cuatro eNodeBs, y la red mejorada, que se elevó a seis eNodeBs.

CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1 Ámbito geográfico

El presente trabajo de investigación tendrá como ámbito geográfico el distrito de Sicuani, ubicado en la provincia de Canchis, departamento del Cusco – Perú, esta ciudad se encuentra ubicada a 3698msnm, con Latitud Sur: 14°21'23" Longitud Oeste: 71°10'06" y una población de 59,833 habitantes.

1.2 Planteamiento del problema

Actualmente el sector de las telecomunicaciones tiene un gran impacto sobre el crecimiento del aspecto social y económico del país, siendo las redes de telefonía móvil el área que experimenta un crecimiento más rápido, ello debido a la creciente demanda de usuarios que buscan acceder a una mejor disposición de servicio de datos y voz, sobre todo de la red LTE-Advanced (4G), la cual les permita y ofrezca un mejor servicio, con un mayor ancho de banda permitiendo una conexión de alta velocidad a Internet superando en gran medida a las red LTE y 3G, ofreciendo video y audio en tiempo real (*streamings* de calidad) esto para las video llamadas con alta definición. De acuerdo a lo expresado por (Blasco, 2016), poseer un celular con internet es una necesidad imperante, debido a que no solo se considera necesario navegar sino además se requieren realizar video llamadas y poseer la mayor velocidad posible para poder observar retransmisiones en directo.

Lamentablemente todo lo mencionado aún no es una realidad en la totalidad del departamento del Cusco y se tienen distritos que no gozan de una adecuada calidad de señal y más aún zonas sin acceso a las redes móviles LTE-Advanced. Se debe de tener en cuenta que para poder analizar el buen desempeño de una red así como su cobertura y calidad de señal, según indica

Luzuriaga (2019), las empresas de telefonía tienen parámetros de medición como los *KPI's (Key Performance Indicator)* que les permite analizar el desempeño de sus redes en tiempo real y así tomar acciones que ayuden a mejorar e incrementar los niveles de calidad en los servicios que brindan por medio de la identificación de zonas que carecen de cobertura.

Es justamente ahí el problema en el distrito de Sicuani, donde se tiene un déficit en cuanto a la cantidad de eNodeBs con los que cuenta actualmente la empresa operadora de telefonía móvil en estudio de la ciudad, así como la ausencia de un estudio de campo de su red móvil que ayude a identificar las zonas geográficas que carecen de cobertura LTE-Advanced. Ambas carencias influyen en una mala calidad de servicio y esta es una preocupación para la población, empresas y sector turístico en una creciente demanda de estos servicios que no presenten inconvenientes de lentitud en la navegación por internet, mala calidad de voz, caídas de llamadas durante su desarrollo, falta de cobertura, saturación de la red, entre otros inconvenientes. Esto genera una limitación de acceso a la red LTE-Advanced y a todos sus beneficios tecnológicos y en muchas ocasiones origina que los usuarios opten por migrar a otro operador móvil que sí cubra y satisfaga estas necesidades y expectativas.

Un adecuado análisis de desempeño de los indicadores (RSRP, RSRQ y SINR) de la red móvil LTE-Advanced del operador móvil en investigación a través de un estudio de campo donde se realicen mediciones de la calidad de servicio, nos ayudará a ubicar de mejor manera las zonas que presentan ausencia de cobertura, para así poder evaluar y estimar la ubicación de nuevos *sites* de telefonía y poder plantear un diseño adecuado de la red LTE-Advanced, la cual logre mejoras en cuanto a calidad de servicio que se les brinda a los usuarios en la ciudad de Sicuani.

1.3 Formulación del problema

En una población en continuo desarrollo y crecimiento, como en la ciudad de Sicuani, el incremento de demanda de mejores servicios y mejor conexión de datos en los teléfonos móviles inteligentes es cada vez mayor. Todo ello demanda una mejor cobertura de red y promueve realizar un análisis de desempeño de los indicadores de la red LTE-Advanced existente de un operador móvil en la ciudad de Sicuani, para poder identificar zonas dentro de la ciudad que carecen de una adecuada cobertura. Lo cual origina limitaciones a la población para poder acceder a los beneficios que brinda esta red, siendo una limitante para el desarrollo tecnológico en los ámbitos de la educación, sector empresarial, turismo, entre otros y he ahí la necesidad de ejecutar un análisis de desempeño de la red actual para poder plantear un diseño de red móvil LTE-Advanced en base a la red ya existente para poder cubrir estas necesidades e incrementar los índices de la calidad de señal y por consiguiente la calidad de servicio.

1.3.1 Problema general

- ¿Cómo el análisis de los indicadores de desempeño de una red LTE-Advanced, ayudarán a plantear una propuesta de diseño que mejore la calidad de servicio de un operador de telefonía móvil en la ciudad de Sicuani?

1.3.2 Problemas específicos

- ¿En qué estado se encuentra actualmente la red LTE-Advanced del operador en estudio instalada en la ciudad de Sicuani?
- ¿Cómo evaluar en la red LTE-Advanced existente el nivel de calidad de servicio, mediante los indicadores de desempeño del *drive test* en la ciudad de Sicuani?

- ¿De qué modo se puede planificar la suficiente cantidad de eNodeBs de la red móvil LTE-Advanced que garanticen una buena calidad de servicio en la ciudad de Sicuani?
- ¿Como optimizará el nivel de los indicadores de desempeño de una red LTE-Advanced, la adecuada planificación de eNodeBs, a través de una propuesta de diseño en un entorno simulado en la ciudad de Sicuani?

1.4 Objetivos del estudio

1.4.1 Objetivo general

- Analizar los indicadores de desempeño de una red LTE-Advanced y plantear una propuesta de diseño para la mejora de la calidad de servicio de un operador de telefonía móvil en la ciudad de Sicuani.

1.4.2 Objetivos específicos

- Conocer el estado actual de la red LTE-Advanced de un operador de la ciudad de Sicuani mediante un diagnóstico técnico *TSS (Technical Site Survey)*.
- Estimar el comportamiento actual de la calidad de servicio de la red LTE-Advanced, a través de un estudio de los indicadores de desempeño obtenidos mediante el *drive test*.
- Establecer criterios para la ubicación de nuevos eNodeBs en la ciudad de Sicuani.
- Proponer una mejora al diseño actual de la red LTE-Advanced de un operador de la ciudad de Sicuani que aumente el nivel de los indicadores, haciendo uso de herramientas de simulación.

1.5 Justificación

Esta investigación pretende mejorar en la red móvil LTE-Advanced la calidad de servicio de un operador de la ciudad de Sicuani, por medio de un análisis de los indicadores de desempeño. Se realizará una simulación de diseño de la red LTE-Advanced, tomando como referencia a la red existente (actualmente el operador cuenta con cuatro estaciones base celular que cubren la zona geográfica a estudiar). De esta manera se podrá lograr una mayor cobertura de la red y con ello mejorar la calidad de señal y de servicio, el uso eficiente del espectro y por lo tanto aumentar la velocidad de navegación por internet, obtener una mejor calidad de voz, disminuir las caídas de llamadas y la saturación de la red, entre otros beneficios.

El distrito de Sicuani tiene un alto valor histórico y comercial con afluencia del turismo y comercios emergentes. La falta de una adecuada calidad de servicio de la red móvil LTE-Advanced de la empresa operadora en estudio, limita el desarrollo social, tecnológico y académico de la población, empresas y sector turístico. Siendo una gran necesidad poder realizar un análisis de los más importantes indicadores de desempeño (RSRP, RSRQ y SINR) de la red existente para así poder mejorar la calidad de señal. Este trabajo de investigación será de gran ayuda para la ubicación y posterior implementación de nuevos eNodeB que ayuden con el problema descrito anteriormente, a través de la identificación de las zonas carentes de cobertura y mala calidad de señal. Así mismo servirá de guía a los estudiantes que quieran conocer más de esta tecnología.

La presente investigación nos permitirá identificar y conocer la forma en la que se comportan los indicadores el desempeño de la red móvil LTE-Advanced durante el desarrollo del diseño en el *software* de simulación, lo cual nos llevará a comprender las características necesarias y requeridas para tener un incremento de la calidad de servicio en la ciudad de Sicuani.

Este estudio brindará un diseño de ingeniería que contribuirá a mejorar la calidad de servicio de la red LTE-Advanced existente de un operador de la ciudad de Sicuani, sirviendo como base para futuras investigaciones en esta u otras tecnologías emergentes (quinta generación 5G) en distintas zonas y/o escenarios, ayudando a los profesionales de las telecomunicaciones en la elección de las herramientas de análisis y *software* de simulación que ayuden a realizar el diseño de ingeniería más apropiado.

1.6 Alcances y limitaciones

1.6.1 Alcances

En la investigación que se propone, se realizará una mejora al diseño actual de la red móvil LTE-Advanced a partir del análisis de los indicadores de desempeño, para lo cual se realizará una descripción del estado actual de los eNodeBs de telefonía móvil de un operador de la ciudad de Sicuani. Esto involucra también la realización de un estudio de campo que recoja el nivel de los indicadores de desempeño (RSRP, RSRQ y SINR) obtenidos mediante el *drive test* en la red LTE-Advanced para evaluar y estimar la ubicación de nuevos eNodeB.

Además, el trabajo de investigación pretende proponer una alternativa adecuada de solución, la cual permita incrementar la calidad del servicio de la red LTE-Advanced en un entorno simulado usando la herramienta de planificación de redes *Atoll*, y se cubra las zonas que presenten ausencia de cobertura, contribuyendo así en el desarrollo tecnológico de la ciudad de Sicuani.

1.6.2 Limitaciones

- El presente estudio se limita al distrito de Sicuani perteneciente a la provincia de Canchis del departamento del Cusco.

- El proyecto se limita al estudio de los indicadores de desempeño (RSRP, RSRQ y SIRN obtenidos a través de dos recorridos de *drive test*) de cuatro eNodeB, de un operador de telefonía móvil de la ciudad de Sicuani, que tiene presencia de cobertura LTE-Advanced en el área geográfica.
- Este trabajo precisa realizar una mejora al diseño de la red móvil LTE-Advanced, para lo cual se propondrá la ubicación de nuevos eNodeB, con el fin de lograr mejoras en la calidad del servicio. Para tal fin se hará el dimensionamiento respectivo, todo ello basado en un análisis del desempeño de los indicadores obtenidos a través del *drive test* de la red actual.
- No se seleccionará equipamiento ni tecnología para los nuevos eNodeB que se propondrán, tomando en consideración que la propuesta planteada se enmarcara en el ámbito del diseño de ampliación de la red móvil haciendo uso de herramientas informáticas.

1.7 Metodología

En el trabajo de investigación que se presenta, se usará una metodología enmarcada en el ámbito descriptivo y aplicativo, ya que se hará uso de conocimientos existentes para analizar y describir los indicadores de desempeño de la red móvil LTE-Advanced de un operador de la ciudad de Sicuani, para posteriormente aplicar estos conocimientos adquiridos en la creación de un diseño y simulación de la red móvil LTE-Advanced que mejore la red actual, haciendo uso de la herramienta informática de simulación *Atoll*, así como se especificarán las características del diseño, los diferentes parámetros de configuración y se evaluará la forma en la que se comportan los indicadores de desempeño de la red en un ambiente modelado y simulado.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Molina (2020), en su tesis titulada: “Estudio de factibilidad para la implementación de la Tecnología LTE en la Banda de 700 MHz como complemento a la Banda de 2100 MHz para mejorar el Servicio de Internet Inalámbrico en la Zona Norte de la Ciudad de Quito”. Comenta que su proyecto estudió la viabilidad de utilizar la tecnología LTE para el operador móvil CNT E.P en la zona norte de ciudad de Quito en la banda de 700 MHz. Actualmente se brinda Internet móvil inalámbrico en la banda de 2100 MHz. Se utilizaron especificaciones de diseño de radiofrecuencia para añadir la banda de 700 MHz al servicio existente con el fin de mejorar la cobertura en esta zona. Se crearon tres clústers para distinguir el nivel de cobertura actual de la zona, se hizo uso del aplicativo G-NetTrack Lite para el drive test. Los bajos porcentajes del indicador RSRP del 3% en clúster 1, 2% en clúster 2 y 5% en clúster 3, indicaban problemas de cobertura. Luego con el *software Atoll*, se evaluó el rendimiento de la banda de 2100 MHz actual y con el complemento de 700 MHz futuro. Las simulaciones proyectaron aumentos significativos en la cobertura LTE donde para RSRP se obtuvo 60.80% en clúster 1, 63.21% en clúster 2 y 68.02% en clúster 3.

Maltez & Valle (2019), en su tesis. “Diseño y simulación de una red LTE-A para la zona urbana de la ciudad de Granada”. Afirman que el objetivo de su investigación fue diseñar y simular una red LTE-A para la ciudad de Granada (Nicaragua). Para ello, examinaron sus ventajas frente a su predecesora y utilizaron tanto el software de planificación *Atoll* como la metodología *Radio Network Planning* para el dimensionamiento de la red. En los resultados obtenidos para las predicciones de cobertura por señal, se obtuvo valores superiores a -95 dB en la potencia de señal, admisible para la red LTE-A; para el caso de $C/(I+N)$, en la mayor parte del área de estudio, se logró más señal que ruido, entre 10dB y más de 20 dB. Para las predicciones de *throughput*

efectivo, se observó que los sectores más próximos al eNodeB, logran 220 Mbps. Con el uso de las predicciones Monte Carlo, se comprobó que la red no presenta un rechazo importante que pueda repercutir, aunque exista una alta carga de usuarios.

Nlend & Tonye (2019), en su investigación titulada: “Planning and simulation of LTE radio network: case of the city of Yaounde”, comentan que su artículo de investigación es una simulación en la banda de 1800 MHz de la red LTE en un canal de 20 MHz, haciendo uso del software Atoll en la ciudad de Yaundé, la capital de Camerún, que cubre un área de aproximadamente 183 km². Esta investigación, que considera los sitios 3G existentes, realiza una planificación de cobertura basada en el modelo Cost-231 de propagación y la planificación de capacidad basada en un modelo de servicio y tráfico. Se demuestra a través de la simulación y sus resultados que la ciudad de Yaundé requiere 244 sitios LTE. Las simulaciones de *Atoll* muestra un nivel de señal recibida de más de -95 dB ello casi en toda el área de interés.

Zapata (2022) en su tesis “Diseño y planificación de una red móvil 4G LTE para las localidades de Samán Chico, San Rolando y La Noria, distrito de Marcavelica, Sullana, Piura”, Menciona que diseñó y planificó la cobertura 4G LTE como parte de su investigación. El proceso de planificación comienza con la determinación de la cobertura y la capacidad necesaria en cada localidad en función del volumen de tráfico y la zona de cobertura. Seguidamente se desarrollan radioenlaces IP completos desde las localidades hasta el nodo central de Marcavelica para la red de transporte. En sus conclusiones señala que se planifican y diseñan las capacidades de enlace descendente y ascendente, así como la cobertura 4G LTE. La red de transmisión por microondas se crea teniendo en cuenta las localidades, lo que da lugar a enlaces robustos y óptimos.

Barrantes & Saenz (2019) en su tesis. “Identificación de factores que afectan la calidad de servicio de la red móvil LTE en la ciudad de Otuzco - 2018, mediante una medición drive-test”. Menciona que como parte de su investigación llevo a cabo un análisis del rendimiento de los indicadores clave para una red LTE en la ciudad de Otuzco, lo cual se realizó con el fin de identificar cualquier factor potencial que pudiera tener un impacto en los niveles de calidad del servicio. Para dicho análisis a través de un *Drive Test* se recolectaron 3098 muestras para la RSRP, RSRQ, SINR y velocidad de datos de enlace descendente. En las conclusiones de esta investigación, se incluye que a partir de las pruebas realizadas se encontró que existen niveles de deficiencias en la accesibilidad a la red, así como baja velocidad de descarga. Además, se encontró que existen factores que degradan los niveles de calidad, como la ubicación del nodo Ermita, que impide una cobertura uniforme de la zona de servicio.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Tecnología LTE

El *Release 8* de LTE, diseñada por el 3GPP, se publicó en 2008, donde se dio a conocer sus especificaciones, tras un periodo de desarrollo que comenzó en 2004. Uno de los principales cambios del diseño de esta tecnología es que se basa en el dominio de datos IP y convierte la voz en un servicio de datos externo denominado VoLTE (Chancasana, 2015).

LTE seguirá desarrollándose de forma constante mientras soporta una gran cantidad de tráfico de servicios móviles, sobre todo con la llegada y la expansión de la red 5G. LTE impulsó la velocidad de transmisión de datos, la eficiencia del espectro electromagnético y el rendimiento de la red, y permitió tanto a fabricantes como a operadores ofrecer un método de transmisión de datos más eficaz y asequible, implementando redes menos complejas (Molina, 2020).

2.2.2 Características de la tecnología LTE

Según menciona Grau (2019), la tecnología LTE posee las siguientes características:

- Datos a una tasa de 100 Mbps para *downlink* y de 50 Mbps para *uplink*.
- Alta eficiencia y flexibilidad espectral.
- Velocidades para usuarios de 120 km/h.
- Radios de cobertura de celda hasta de 30 km.
- Latencia menor a 10 ms.
- Anchos de banda escalable desde 1.4 a 20 MHz
- Puede operar en FDD y TDD
- Todas las soluciones de despliegue utilizan antenas MIMO (Molina, 2020).

2.2.3 Arquitectura LTE

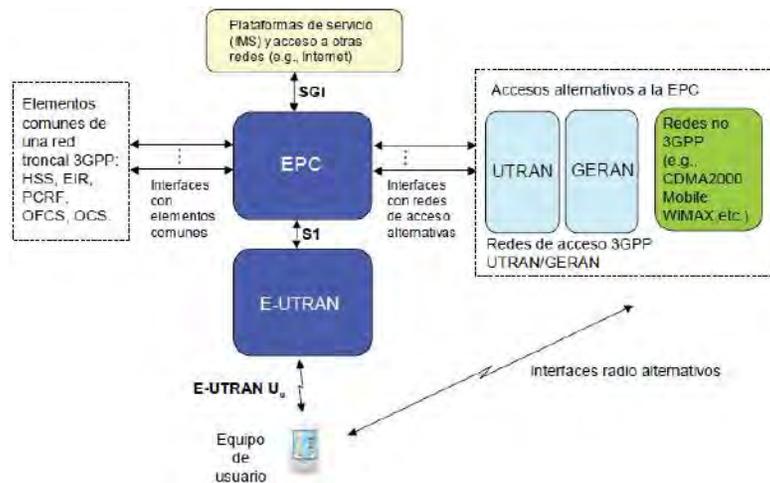
La arquitectura LTE en comparación de las tecnologías GSM y UMTS, utiliza conmutación de paquetes y circuitos, siendo diseñado específicamente para permitir servicios de conmutación de paquetes basados en IP (Molina, 2020).

Según menciona Agusti et al. (2010). Considera que la arquitectura general para los sistemas 3GPP, el cual se muestra en la figura 2.1, donde se detalla de una forma abreviada la arquitectura completa para LTE, la cual es denominada formalmente *Evolved Packet System* (EPS). Los componentes esenciales para la tecnología LTE están conformados por la E-UTRAN que es la nueva red de acceso; el EPC que es el nuevo dominio de paquetes de la red troncal (red troncal EPC) y como también por la evolución del sistema IMS concebida primeramente en el entorno de las tecnologías UMTS.

A través del uso de la tecnología IP, la red física que alberga las funcionalidades de la red troncal EPC y de los componentes operativos de la red E-UTRAN, se conectan a los equipos que conforman la red del sistema LTE (Cruz & Flores, 2016).

Figura 2.1

Arquitectura LTE



Fuente: Obtenida de Agusti et al. (2010)

Las interfaces principales para E-UTRAN y EPC se muestran en la Figura 2.1. Donde la interfaz entre E-UTRAN y EPC se conoce como S1, y proporciona a EPC las herramientas que necesita para controlar cómo se conectan mediante E-UTRAN los terminales móviles. E-UTRAN U_s es el nombre de la interfaz de radio entre el UE y E-UTRAN (Cruz & Flores, 2016).

La interfaz SGI de la EPC se utiliza para conectar con las redes de paquetes IP externas y las plataformas de servicio IMS. La información utilizada por otros componentes de la red troncal, que no son específicos del sistema LTE, sino que pueden dar servicio a otros dominios del sistema 3GPP, constituye la base del control del servicio de transporte suministrado por el EPC (Cruz & Flores, 2016).

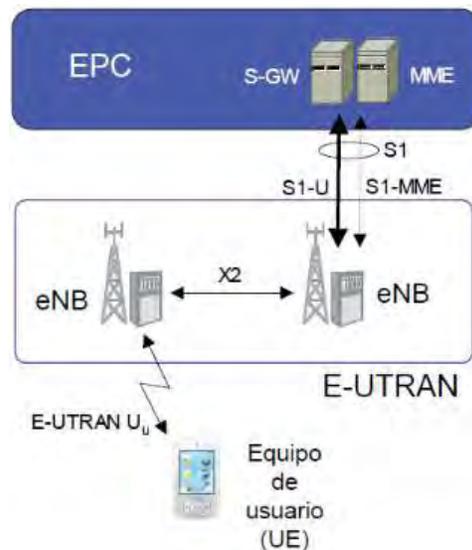
2.2.3.1 E-UTRAN (Evolved Radio Access Network)

La arquitectura de acceso de la red LTE, está formada por una entidad única de red conocida como eNodeB (*Evolved NodeB*) la cual conforma la estación base E-UTRAN. La estación base incorpora todas las funciones de la red de acceso. Lo cual constituye una variación a diferencia de generaciones previas como GSM y UMTS, en las que la red de acceso estaba formada por estaciones base (BTS, NodeB) y equipos controladores (BSC y RNC), correspondientemente (Iglesias, 2016).

Según describe Agusti et al. (2010), la figura 2.2 muestra una red de acceso E-UTRAN formada por eNodeBs que conectan los equipos de usuario (UE) y la red troncal EPC. E-UTRAN, Uu, S1 y S2 son las tres interfaces que utiliza un eNodeB para conectarse con los demás componentes del sistema.

Figura 2.2

Red de acceso E-UTRAN



Fuente: Obtenida de Agusti et al. (2010)

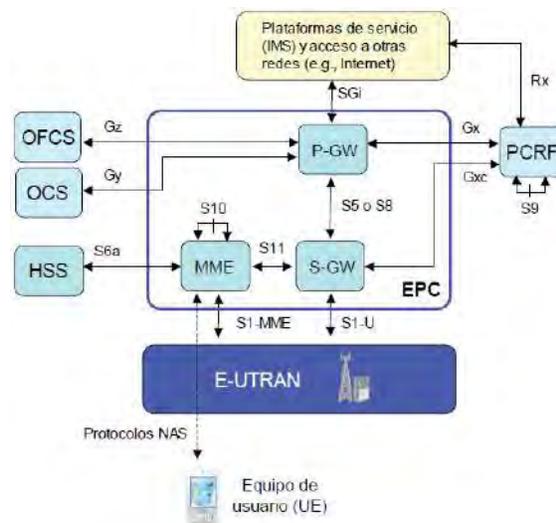
Como se ha visto en la ilustración anterior, la interfaz S1 conecta el eNodeB con la red troncal EPC. S1-MME y S1-U son las dos interfaces que soportan el plano de control y el plano de usuario, respectivamente, de esta interfaz. Un aspecto importante de la organización de las torres de protocolos conectadas a las interfaces de red LTE es la separación del plano de control y el plano de usuario (Cruz & Flores, 2016).

2.2.3.2 EPC (Evolved Packet Core)

El objetivo primordial de la creación de la red troncal EPC ha sido ofrecer un servicio de conectividad IP a través de una red mejorada que permita explorar las nuevas posibilidades que ofrece la red de acceso E-UTRAN. La capacidad de acceder a sus servicios mediante otras redes de acceso 3GPP (UTRAN y GERAN) y del ámbito externo del 3GPP (cdma2000, WIMAX, 802.11) ha sido una consideración clave en el diseño de la arquitectura de la red troncal (Cruz & Flores, 2016).

Figura 2.3

Arquitectura básica de la red troncal EPC



Fuente: Obtenida de Agusti et al. (2010)

La figura 2.3 muestra que las entidades de red MME, S-GW y P-GW constituyen los principales componentes de red, del núcleo para el sistema EPC. Estas tres entidades sirven como bloques de construcción fundamentales para la prestación del servicio de conexión IP entre los UE enlazados por E-UTRAN y las redes externas a las que se encuentra conectada la troncal de red EPC, junto con la base de datos principal del sistema 3GPP nominado HSS (Cruz & Flores, 2016).

Mientras que la entidad MME se encarga de las operaciones del plano de control y la señalización, las funciones del plano de usuario se centran en S-GW y P-GW. La interfaz S1 se utiliza para la conexión del enlace entre E-UTRAN y EPC. La interfaz S1-U del plano de usuario finaliza en la S-GW, mientras que la interfaz S1-MME, que soporta el plano de control, finaliza en la entidad MME (Cruz & Flores, 2016).

2.2.3.3 UE (User Equipment)

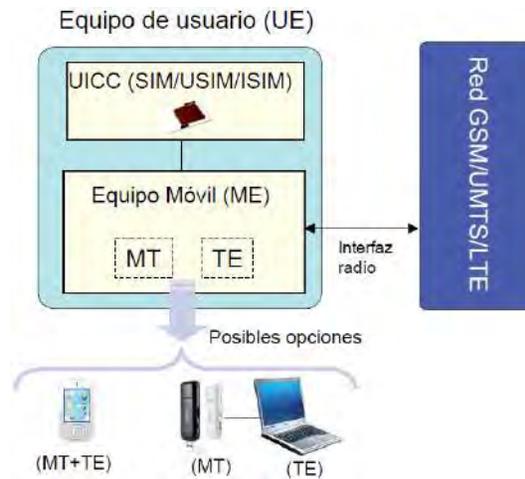
Según Agusti et al. (2010), un equipo de usuario viene a ser un equipo que nos permite mediante la interfaz radio, el acceso al uso de los servicios que brinda la red LTE. La arquitectura funcional del UE es idéntica a los usados por UMTS y GSM. El UE se encuentra conforma de los siguientes elementos:

- Terminal móvil (MT)
- Equipo Terminal (TE)
- Tarjeta SIM (UICC)

Mientras que la UICC o tarjeta SIM se encarga de identificar en la red al usuario y de proporcionarle elementos de seguridad como el cifrado de la información, el equipo terminal y el terminal móvil se encargan de las operaciones de comunicación (Solórzano, 2018).

Figura 2.4

Elementos del UE (equipo de usuario)



Fuente: Obtenida de Agusti et al. (2010)

2.2.4 Resource Block (Bloque de recurso)

El RE (*Resource Element*) es el elemento mínimo en la estructura LTE. Cada símbolo tiene una subportadora de 15 kHz denominada RE. Un RB (*Resource Block*) se compone de los REs (*Resource Elements*). las subportadoras y los símbolos son dimensiones de un RB. Para el caso de un RB este suele constar de 6 o 7 símbolos en el dominio temporal y 12 subportadoras en el dominio de la frecuencia (Anritzu Company, 2009).

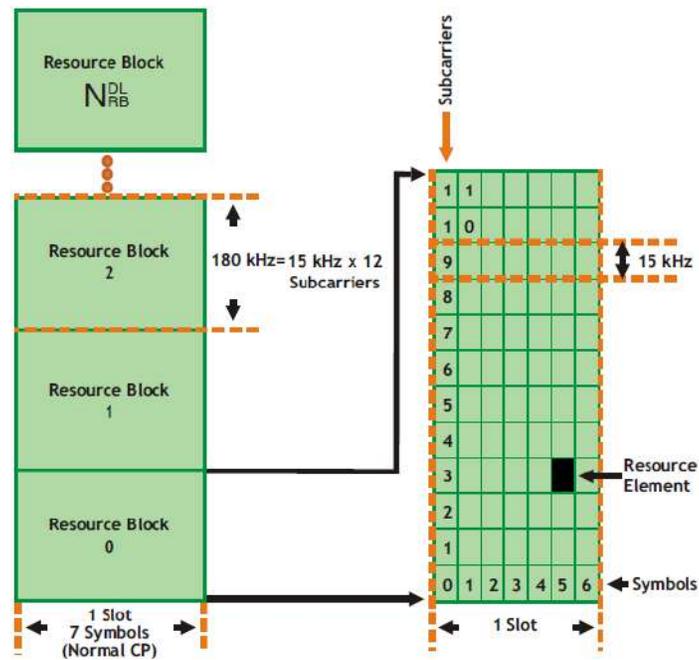
Se debe tomar en cuenta que el ancho de banda determinado de un RB es de 180 kHz, constituido por 12 subportadoras con una duración de 0,5 ms (un *slot*) y separadas a intervalos de 15 kHz, y que la combinación de RBs proveen un ancho de banda total (Palacios Pérez, 2015).

El uso del CP (*Cyclic Prefix*) afecta al número de símbolos que se utilizan. El *Resource Blocks* tiene siete símbolos cuando se aplica el CP normal. En cambio, el *Resource Blocks* tiene

seis símbolos cuando se emplea un CP extendido; cuando hay una dispersión de retardo, suele darse esta última condición (Anritzu Company, 2009).

Figura 2.5

Estructura del Frame en LTE



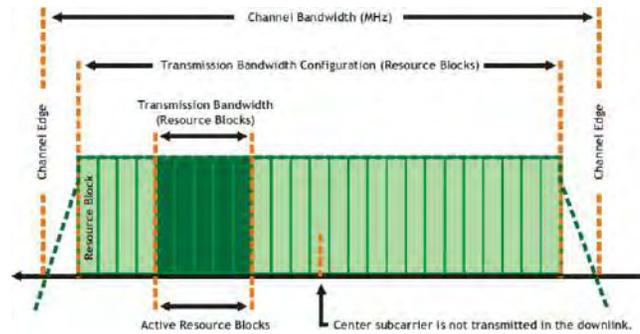
Fuente: Obtenida de (Anritzu Company, 2009)

2.2.4.1 Anchos de banda de transmisión

El número de RB (*Resource Blocks*) activos en una transmisión, viene a ser el ancho de banda de transmisión o denominado *Transmission Bandwidth*, que es el ancho de banda activo utilizado para la comunicación. A medida que se incrementa el ancho de banda, incrementara también la cantidad de RBs. El resultado de multiplicar la cantidad de RBs por 180 kHz es el ancho de banda máximo ocupado (Jurado & Analuisa, 2014).

Figura 2.6

Ancho de banda de transmisión



Fuente: Obtenida de (Anritzu Campany, 2009)

Los estándares LTE proporcionan anchos de banda de canal variables, ajustables entre 1.4 y 20 MHz, con un espaciado entre subportadoras de 1.5 kHz. El ancho de banda del canal no afecta al espaciado entre subportadoras. La interfaz aérea LTE fue definida por el 3GPP para que tuviera efectos mínimos sobre el rendimiento del sistema y la capacidad de adaptarse a distintos anchos de banda (Valle, 2016). La tabla 2.1 muestra el número máximo de RB que puede soportar cada ancho de banda de transmisión.

Tabla 2.1

RB en cada ancho de banda

Ancho de Banda (MHz)	Número Máximo de RBs (Transmission Bandwidth Configuration)	Máximo Ancho de Banda Utilizable (MHz)
1.4	6	1.08
3	15	2.7
5	25	4.5
10	50	9
15	75	13.5
20	100	18

Fuente: Obtenida de (Anritzu Campany, 2009)

2.2.4.2 Bandas de operación para LTE

Los intervalos de frecuencia del espectro electromagnético que se emplean para las comunicaciones radioeléctricas constituyen las bandas operativas. En la Tabla 2.2 se enumeran las numerosas bandas de frecuencia que puede utilizar la tecnología LTE.

Tabla 2.2

Bandas de operación usadas para LTE

Banda	Categorización	Rango enlace Ascendente (MHz)	Rango Enlace Descendente (MHz)	Modo Dúplex
1	Banda - 2100	1920 - 1980	2110 - 2170	FDD
2	Banda - 1900	1850 - 1910	1930 - 1990	FDD
3	Banda - 1800	1710 - 1785	1805 - 1880	FDD
4	Banda - AWS	1710 - 1755	2110 - 2155	FDD
5	Banda - 850	824 - 849	869 - 894	FDD
7	B-Extensión - 2600	2500 - 2570	2620 - 2690	FDD
8	Banda - 900	880 - 915	925 - 960	FDD
12	US 700 Inferior	699 - 716	729 - 746	FDD
13	US 700 Superior C	777 - 787	746 - 756	FDD
14	US 700 Superior D	788 - 798	758 - 768	FDD
17	US 700 Inferior B, C	704 - 716	734 - 746	FDD
18	Banda 850 (Japón_4)	815 - 830	860 - 875	FDD
19	Banda 850 (Japón_5)	830 - 845	875 - 890	FDD
20	Banda 800	832 - 862	791 - 821	FDD
21	B 1500 (Japón_6)	1447.9 - 1462.9	1495.9 - 1510.9	FDD
24	US L - Banda - 1600	1626.5 - 1660.5	1525 - 1559	FDD
25	Banda 1900 G	1850 - 1915	1930 - 1995	FDD
26	Banda E850 Superior	814 - 849	859 - 894	FDD
28	Banda APT 700	703 - 748	758 - 803	FDD
29	Banda LTE DL FDD	N/A	717 - 728	SDL
44	US Banda APT 700	703 - 803	703 - 803	TDD
45	China TDD 1400	1447 - 1467	1447 - 1467	TDD
50	TDD L - band	1432 - 1517	1432 - 1517	TDD
51	TDD L - band, local	1427 - 1432	1427 - 1432	TDD

Fuente: Obtenido de (Molina, 2020)

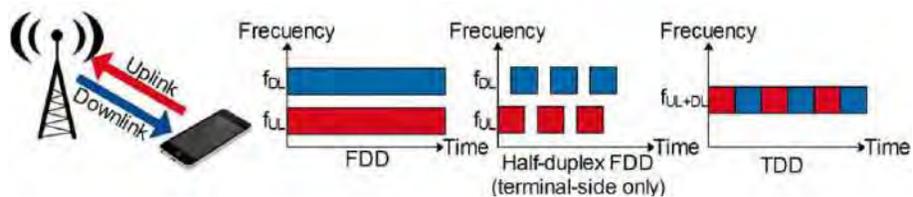
2.2.5 Técnicas de duplexado FDD y TDD

Frequency Division Duplex (FDD): Esta duplexación utiliza una frecuencia portadora para el enlace ascendente y otra diferente para el enlace descendente. En este modo, el UE establece una comunicación *full dúplex*. Las transmisiones entre el enlace ascendente y el descendente se separan mediante filtros de transmisión y recepción (filtros dúplex) (Toapanta, 2019).

Time Division Duplex (TDD): La misma frecuencia portadora se utiliza tanto para el enlace ascendente como para el descendente en esta duplexación. El uso de la misma banda de frecuencias y la multiplexación temporal en este método TDD permite el funcionamiento en modo *full dúplex*. La conmutación entre las transmisiones de enlace ascendente y descendente, son programadas en ranuras de tiempo distintas y en la misma frecuencia, lo cual requiere de un periodo de tiempo (transmisión discontinua). Para prevenir interferencias entre ambas direcciones, las estaciones base comúnmente en celdas vecinas hacen uso de la misma configuración para los enlaces ascendente y descendente y se sincronizan entre sí a nivel de trama (Toapanta, 2019).

Figura 2.7

Duplexado FDD y TDD



Fuente: Obtenida de (Ramos Mis, 2017)

La red LTE puede operar haciendo uso de los dos métodos de duplexado sea FDD y/o TDD. A raíz de la transmisión no continua en el tiempo, TDD logra una cobertura menor que FDD, que es en donde reside la diferencia entre ambas (Toapanta, 2019).

Debido a su rendimiento superior en términos de latencia, eficiencia espectral y uso de un periodo de guarda más corto, FDD se utiliza más ampliamente. En tanto que TDD es más sofisticada en términos de capa MAC, aunque sus gastos de equipamiento son menores (Solórzano, 2018).

2.2.6 Tecnologías de nivel Físico

En este apartado se describirán brevemente los fundamentos a nivel físico empleados en la tecnología LTE. Estos conceptos permiten obtener mayores niveles en cuanto a capacidad y eficiencia en la utilización de los recursos de radio, que es uno de los cambios clave con respecto a los sistemas de comunicaciones móviles precedentes. Primeramente, se describirán los principios de la técnica de transmisión OFDM, en la que se basan los nuevos enfoques, y a continuación se describirán las técnicas OFDMA y SC-FDMA de acceso múltiple, que se utilizan para el enlace descendente y ascendente, de forma respectiva (Agusti et al., 2010).

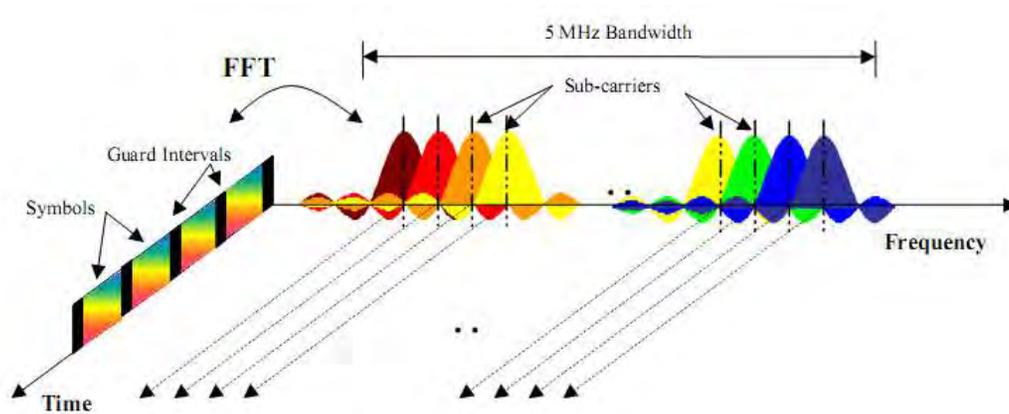
2.2.6.1 OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*)

Agusti et al. (2010). Menciona que esta técnica de transmisión multiplexa un grupo de símbolos sobre un grupo de subportadoras, integrando un mecanismo de transmisión de multi-portadora.

OFDM utiliza un amplio número de subportadoras separadas ortogonalmente, y estas son transmitidas en paralelo. Se utiliza un sistema de modulación convencional (QPSK, 16QAM o 64QAM) para modular cada una de las subportadoras a una tasa de símbolo baja. Es posible aumentar la tasa de las velocidades combinando cientos o miles de subportadoras (Madrigal, 2015). En la figura 2.8 se muestra la representación en el tiempo - frecuencia para la señal OFDM.

Figura 2.8

Representación en el tiempo y frecuencia de la señal OFDM



Fuente: Obtenida de (Arimas, 2016)

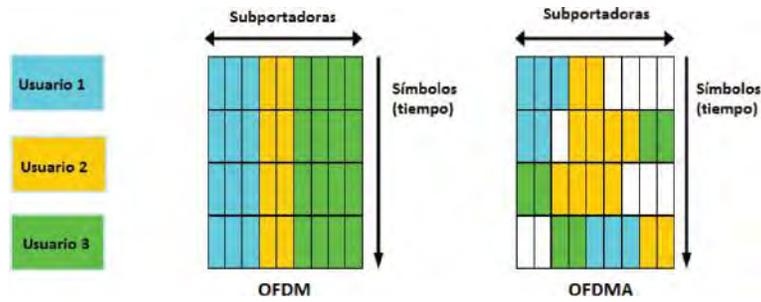
2.2.6.2 OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)

El enlace descendente de las redes LTE utiliza el método de Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales (OFDMA), basado en OFDM. Donde OFDMA se fundamenta en el acceso múltiple por división de frecuencia y la modulación multiportadora. Las subportadoras se pueden asignar indistintamente a varios usuarios y, al asignar más subportadoras, se puede llegar a mejorar tanto la velocidad de transmisión como la calidad del servicio prestado a un usuario. Gracias a OFDMA, pueden enviarse múltiples transmisiones de datos simultáneas de distintos usuarios haciendo uso de diferentes subportadoras (Calle & Jiménez, 2014).

Algunas de las ventajas que proporciona OFDMA se mencionan, que ofrece: Mayor robustez frente a la propagación multi trayecto, flexibilidad en el ancho de banda asignado, mayor eficiencia del uso del espectro, mejora el uso del ancho de banda para lograr velocidades de transmisión más rápidas (Palacios Pérez, 2015).

Figura 2.9

Asignación de subportadoras en OFDM y OFDMA



Fuente: Obtenida de (Palacios Pérez, 2015)

Se debe de considerar que el número total de subportadoras varía en función de las portadoras admitidas para LTE, ya que cada portadora tiene una banda de guarda del 10% y subportadoras de 15 kHz. El número permitido de subportadoras LTE por portadora se detalla en la Tabla 2.3 (Chancasana, 2015).

Tabla 2.3

Sub portadoras en LTE

Ancho de Banda	Número de Resource Blocks	Número de subportadoras	Banda óptima	Banda de guarda
1.4 MHz	6	72	1.08 MHz	2x0.16 MHz
3 MHz	15	180	2.7 MHz	2x0.15 MHz
5 MHz	25	300	4.5 MHz	2x0.25 MHz
10 MHz	50	600	9 MHz	2x0.5 MHz
15 MHz	75	900	13.5 MHz	2x0.75 MHz
20 MHz	100	1200	18 MHz	2x1 MHz

Fuente: Obtenida de (Chancasana, 2015)

La principal desventaja de OFDMA es que tiene una potencia pico instantánea elevada, lo que aumenta el consumo de energía de los equipos terminales, siendo perjudicial para el enlace ascendente. Siendo una de las razones principales por las que OFDMA se emplea solamente en

enlaces descendentes, también debido a la mayor potencia, los amplificadores más potentes y la mayor inversión realizada por las empresas operadoras (Chancasana, 2015).

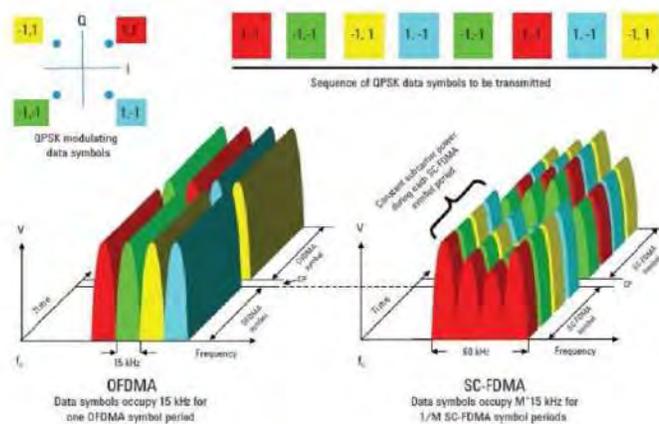
2.2.6.3 SC - FDMA (Single Carrier - Frequency Division Multiple Access)

Para lograr ajustar las distintas variaciones de potencias, el acceso múltiple por división de frecuencia en una sola portadora (SC-FDMA) combina los símbolos previamente a ser asignados a las subportadoras. Además, sólo utiliza un bloque continuo de portadoras, lo que permite a los demás usuarios utilizarlas libremente. SC-FDMA es adecuado para el enlace ascendente por su gestión de picos de potencia y el empleo de pocas subportadoras (Chancasana, 2015).

En comparación con OFDM, SC-FDMA tiene una PAPR (*Peak to Average Power Ratio*) más baja, lo que permite a los UE ahorrar batería. A diferencia de OFDMA, que transmite información en cada subportadora, este método transmite la información en múltiples subportadoras (Solórzano, 2018). Lo cual se ilustra en la siguiente figura 2.10.

Figura 2.10

Comparación entre OFDMA y SC-FDMA



Fuente: Obtenida de (Arimas, 2016)

De la figura 2.10, a la izquierda, se muestran 4 subportadoras utilizando OFDM ocupando un ancho de banda de 15 kHz, las mismas que se modulan para cada símbolo QPSK en un periodo OFDMA. A la derecha, para cada uno de los símbolos de datos QPSK, se tiene un grupo de subportadoras moduladas en un periodo SC-FDMA (Palacios Pérez, 2015).

2.2.7 LTE-Advanced

La ITU en el año 2008 atribuyó la denominación de IMT-Avanzadas, a los sistemas que tengan capacidades superiores a las tecnologías IMT-2000. El sistema LTE ha evolucionado hasta convertirse en LTE-Advanced el cual aspira superar las especificaciones determinadas para IMT-Advanced. Para ser considerada candidata a 4G IMT-Advanced, la organización 3GPP presentó el año 2009 las especificaciones de LTE-Advanced al UIT-R para su revisión y evaluación (Castillo Contreras, 2017).

Con la tecnología LTE-Advanced se busca marcar una nueva era en la que se mejore tres aspectos específicos: Eficiencia espectral, velocidad de transmisión de datos máxima y media, así como la latencia en planos de usuario y control (Castillo Contreras, 2017)

Mantener la compatibilidad con tecnologías predecesoras es uno de los objetivos en los cuales está enfocado LTE-Advanced. Cuya característica brinda a los operadores continuar brindando el servicio LTE a sus abonados, a medida que actualiza su equipo de red de manera progresiva. Este enfoque fue independiente de las peticiones establecidas por IMT-Advanced, ello dio como resultado que varios objetivos hayan sido superados por el LTE-Advanced ejemplo de lo mencionado, la eficiencia espectral y los índices de latencia (Castillo Contreras, 2017).

2.2.7.1 Arquitectura LTE-Advanced

LTE-Advanced tiene la misma arquitectura que se describió para LTE con la diferencia, que para este caso se tiene en la red de acceso un elemento adicional, esta arquitectura nueva incluye el empleo de los RN (Relay Nodes). Cuyas características serán expuestas más adelante en el presente capítulo. Los bloques funcionales que conforman la arquitectura LTE-Advanced son: E-UTRAN, EPC, IMS y UE (equipo de usuario), en cada uno de los bloques, las interfaces y los elementos de red que conectan a cada uno de los equipos en las diversas redes de acceso del CORE y externas, llegan a ser idénticas a las descritas para el caso del LTE (Castillo Contreras, 2017).

2.2.7.2 Características para LTE-Advanced

Las características más relevantes para LTE-Advanced, según menciona Calle & Jiménez (2014) llegaron a ser añadidas en la versión 10 del LTE y son:

- Agregación de portadora (*Carrier Aggregation*)
- Transmisión de múltiples antenas para el *downlink* mejorado
- Transmisión de múltiples antenas para el *uplink*
- CoMP (Coordinated multipoint transmisión and reception)
- *Relaying*

1. Agregación de portadora (Carrier Aggregation)

El ancho de banda requerido por LTE-Advanced para que pueda operar como tecnología 4G es de 100MHz, una limitante es que los operadores no cuentan con espectro asignado en tal cantidad. Pero cuenta con bloques de frecuencia en distintas bandas. Siendo la razón para poder

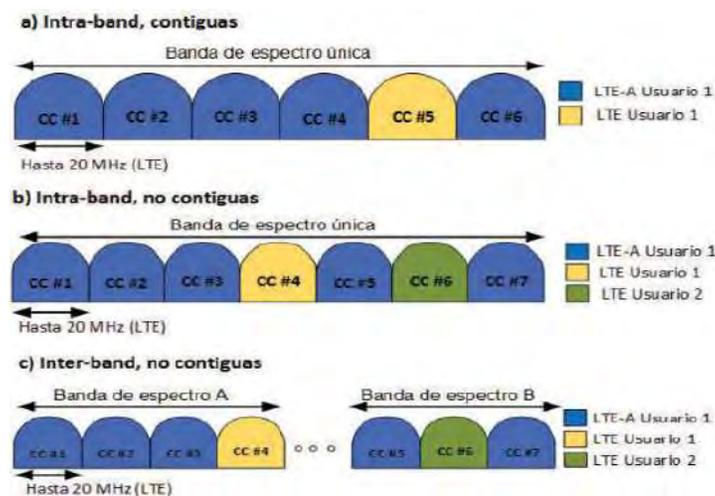
usar la agregación de portadora, pudiendo usar de esta manera el espectro fragmentado de forma eficaz independiente del pico de velocidad (Calle & Jiménez, 2014).

El *Release 8* de LTE hace uso de un *Component Carrier (CC)* único, el cual ocupa 20MHz como máximo ancho de banda. Para poder alcanzar un gran ancho de banda de transmisión, LTE-A emplea la agregación de portadoras de hasta cinco CC. Se debe de considerar que un CC logra tener diferentes anchos de banda y pueden ser de 1, 4, 3, 5, 10 o 20MHz (Calle & Jiménez, 2014).

Los operadores móviles no siempre pueden tener bloques de frecuencia en una misma banda de operación, motivo por el cual sienten la necesidad de poder usar bloques de distintas bandas de frecuencia lo que conlleva a que los CC utilizados para la agregación de portadoras, pueden existir varios tipos de bandas espectrales, contiguas (misma banda de espectro) y no contiguas (diferentes bandas de espectro) (Chicango & Lupera, 2018). La figura 2.11 muestra las tres configuraciones de agregación de portadoras que usa LTE-Advanced.

Figura 2.11

Carrier aggregation intra e inter banda



Fuente: Obtenida de (Chicango & Lupera, 2018)

2. Técnica de múltiples antenas para LTE-Advanced

Dado que el principal objetivo de LTE-Advanced es superar a las generaciones anteriores, los métodos de múltiples antenas son cruciales. Se asignan distintos modos o esquemas de transmisión (TM: *Transmission Modes*) en función del entorno radio en el que se encuentra un equipo de usuario. En el *Release 10* se introdujeron los modos TM9 para downlink y TM2 para *uplink*. LTE-Advanced es capaz de soportar 8x8 en *downlink* y 4x4 en *uplink* gracias a estos modos de transmisión (Calle Cáceres , 2013).

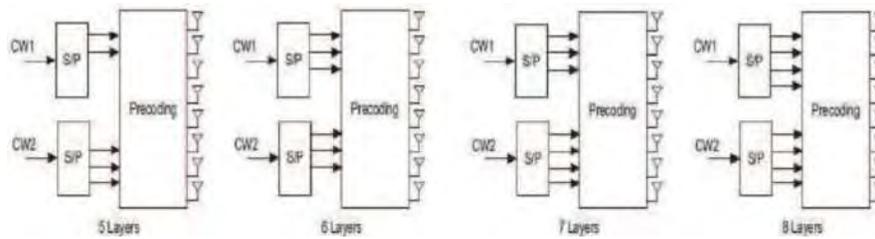
Al mejorar SU-MIMO en el enlace descendente, se elevan las velocidades de transmisión y se mejoran las técnicas MU-MIMO, lo que conlleva a un aumento de la eficiencia espectral. La primera introducción de SU-MIMO en el enlace ascendente mejoró las técnicas de acceso. Para ello, se introdujeron nuevas señales de referencia y se mejoran los equipos de usuario (Calle & Jiménez, 2014).

Transmisión de múltiples antenas para el enlace de bajada

SU-MIMO y MU-MIMO son dos métodos utilizados por LTE-Advanced para transmitir información. Para mejorar la velocidad de transmisión cuando se utiliza SU-MIMO, se tiende a utilizar 5, 6, 7 y 8 capas espaciales, con un máximo de 2 *codewords* y 8 puertos de antena. Además de la mejora que supone transmitir a través del canal PDSCH, MU-MIMO se basa en el método dinámico de conmutación entre SU-MIMO y MU-MIMO (Yupanki, 2016).

Figura 2.12

Codewords y layers para 8 puertos de antena



Fuente: Obtenida de (Maltez & Valle, 2019)

Los UE en el enlace de bajada utilizan señales de referencia y dado que los datos se demodulan adecuadamente a partir de estas señales, es posible conocer la información del canal de radio. *Downlink Channel State Information - Reference Signal (CSI-RS)* y *Demodulation Reference Signal (DMRS)* son los dos tipos que utiliza el enlace de bajada (Maltez & Valle, 2019).

Transmisión de múltiples antenas para el enlace de subida

Como menciona Yupanki (2016). Para aumentar la velocidad de transmisión en el canal PUSCH, en la transmisión SU-MIMO se implementa 4 capas espaciales. Se introdujeron dos modos disponibles de transmisión

- Transmisión de Modo 1: A través de una antena única.
- Transmisión de Modo 2: A través de antenas múltiples, lo que indica que el UE debe configurarse para utilizar dos o cuatro antenas para la transmisión.

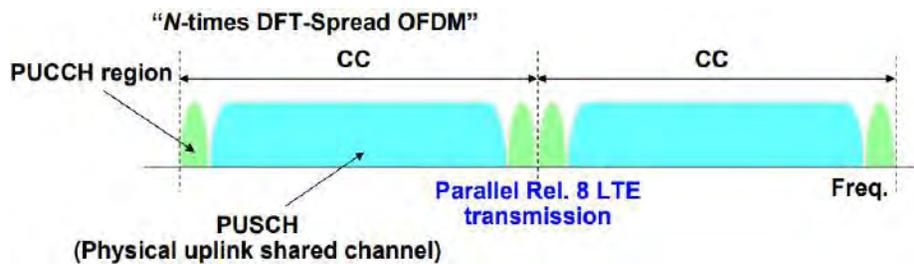
Esquema de acceso mejorado en el Uplink

LTE-Advanced utiliza la tecnología de agregación de portadoras, es decir, el protocolo SC-FDMA. No utiliza tecnología de bloques de espectro continuo ni una única portadora. Este

esquema de acceso se muestra en la figura 2.13, donde puede verse que está formado por dos CC, cada uno de los cuales ha recibido los canales PUSCH y PUCCH, los cuales corresponden a dos conexiones (Yupanki, 2016).

Figura 2.13

Esquema de acceso múltiple



Fuente: Obtenida de (Nakamura, 2009)

Uplink Sounding Reference Signal (SRS) y *Uplink Demodulation Reference Signal (DM-RS)*, son las señales de referencia en el enlace ascendente (Maltez & Valle, 2019).

3. CoMP (*Coordinated multipoint transmisión and reception*)

Los criterios que resaltan de la técnica *coordinated multipoint* son:

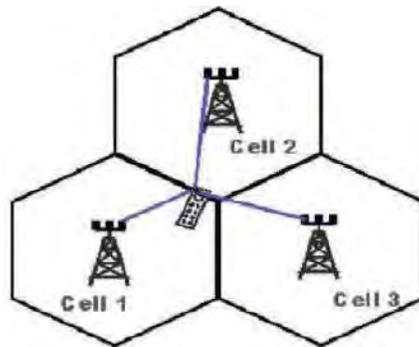
Esta gestión mejora significativamente la calidad de la señal que es recibida por el eNodeB y el UE, también reduce la interferencia co-canal de las celdas vecinas mediante la utilización de múltiples antenas de diferentes celdas, incluyendo las antenas de la celda que proporciona el servicio y las antenas de celdas vecinas (Yupanki, 2016).

Varios eNodeBs cooperan dinámicamente para permitir la planificación, transmisión y procesamiento conjunto (con la finalidad de poder incrementar la ganancia en los límites de la

celda). Gracias a ello, el UE puede ser atendido por dos o más eNodeBs en el límite de una celda, lo que mejora así el *throughput* y la transmisión/recepción (Calle & Jiménez, 2014).

Figura 2.14

Coordinated Multipoint (CoMP)



Fuente: Obtenido de (Yupanki, 2016)

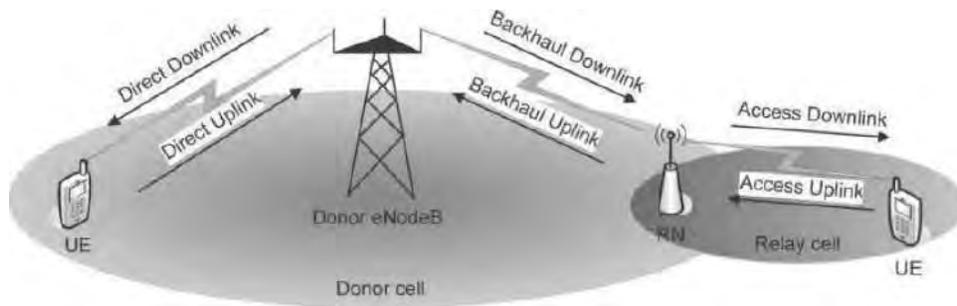
4. Relaying

Una nueva característica de LTE-Advanced es el llamado *Relaying* la cual se basa en el uso de una red de RNs (*Relay Nodes*), que complementan a las macro celdas para ampliar la capacidad y cobertura de la red. Un RN (*Relay Node*) llega a procesar la señal que recibe antes de poder enviarla, a diferencia de un repetidor; este proceso implica acciones de las capas 1, 2 y 3. Además, hay que destacar que un repetidor produce menos retardo mínimo que un RN. Para transmitir la señal desde el eNodeB donante al UE, un RN utiliza dos etapas de transmisión (Calle & Jiménez, 2014).

Se muestran los elementos de la arquitectura de *relaying* en la figura 2.15, y también se observan las denominaciones para cada uno de los enlaces.

Figura 2.15

Elementos de relaying



Fuente: Obtenida de (Sesia, Toufik, & Baker, 2011)

Según describe Yupanki (2016), los elementos de la arquitectura *relaying* son:

- *Direct link (downlink - uplink)*: Enlace que conecta el eNodeB donante con el UE, y viceversa.
- Donor eNodeB: Viene a ser el eNodeB el cual permite la comunicación con los RNs y los UEs a través de los enlaces *Backhaul* y el *direct link*, de forma respectiva.
- Donor cell: Es el perímetro de cobertura establecido por el eNodeB donante.
- *Backhaul link (downlink - uplink)*: Enlace que se presenta entre el eNodeB donante y el *Relay Node*, y viceversa.
- *Relay cell*: Viene a ser el área de cobertura determinada por el *Relay Node*.
- *Access link (downlink - uplink)*: Enlace entre el RN y el UE y viceversa (Yupanki, 2016).

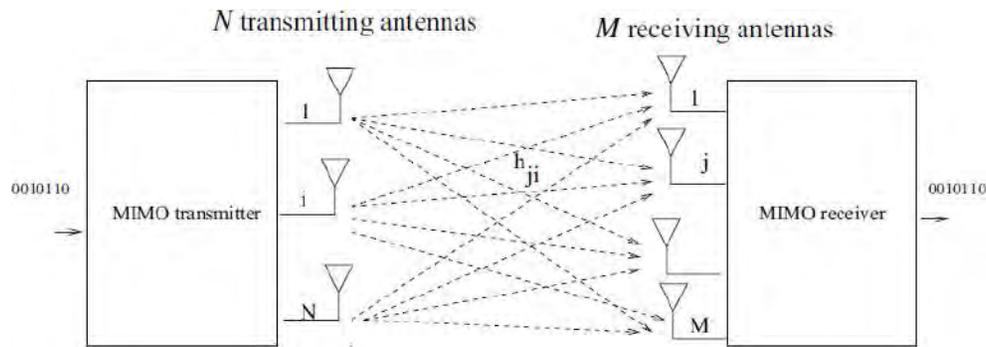
2.2.7.3 MIMO (Multiple Input – Multiple Output)

Uno de las características clave de la tecnología LTE es el enfoque MIMO, que emplea múltiples entradas y salidas en el transmisor y el receptor. A través del fenómeno de la propagación

multitrayecto de un canal inalámbrico, proporciona un mayor rendimiento en la transferencia de datos y la eficiencia espectral (Molina, 2020). Lo cual conlleva a poder obtener por cada celda más usuarios, así como tener mejoras en las velocidades de transmisión por cada usuario. El funcionamiento de la técnica MIMO es representado en la figura 2.16.

Figura 2.16

Técnica MIMO – Funcionamiento



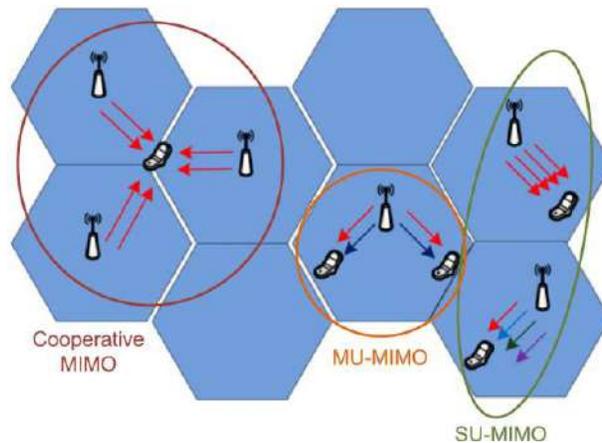
Fuente: Obtenida de (Sesia, Toufik, & Baker, 2011)

MIMO Mejorado

Un aspecto primordial de LTE-Advanced, lo constituye el concepto de MIMO mejorado, el cual permitirá al sistema satisfacer los criterios de velocidad de IMT-Advanced establecidos por el UIT-R. LTE-Advanced soporta el MIMO adaptativo para poder cubrir los requerimientos de áreas más amplias de cobertura así como de mayor velocidad de datos, lo cual se consigue seleccionando el esquema MIMO apropiado de acuerdo con el requisito actual del sistema (Akyildiz, Gutierrez-Estevez, & Chavarria Reyes, 2010).

Figura 2.17

Modos MIMO para LTE-Advanced



Fuente: Obtenido de (Akyildiz, Gutierrez-Estevez , & Chavarria Reyes, 2010)

- *Single-User* MIMO (Único usuario, SU-MIMO): Esta técnica (conocida también como punto a punto) se utiliza con un solo usuario. Mejora la eficiencia espectral, el coste, la probabilidad de error y la capacidad del canal gracias a la multiplexación espacial. Sin embargo, como la comunicación se realiza entre una única estación base y un único usuario, no es aprovechado la multiplicidad de usuarios (Coello, 2016).
- *Multi-User* MIMO (Multiusuario, MU-MIMO): Diversos usuarios pueden comunicarse con la misma estación base gracias a la innovación MIMO, logrando aún más mejoras en la capacidad de comunicación individual para cada usuario. Esta técnica es considerada como un MIMO avanzado debido a que aprovecha que varias antenas sean usadas para que transmitan y recepcionen, así como es aprovechada la multiplicidad de usuarios (Coello, 2016).

- Cooperative MIMO: Al utilizar la tecnología *Cooperative Multipoint* (CoMP), aumenta la calidad de la señal para los usuarios ubicados en el borde de las celdas, al tiempo que duplica con creces la eficiencia espectral (Bravo & Ñauta, 2013)

2.2.8 QoS - Quality of Service

En cuanto al concepto de QoS (Calidad de Servicio), según aconseja la ITU-T E.800 está definido como: “El efecto colectivo de la prestación del servicio, que determina el grado de satisfacción de un usuario del servicio” (ITU-International Telecommunication Union, 2006, pág. 55).

La calidad de servicio está comprendida por varios aspectos en la conexión como el tiempo que los servicios demoran en responder, relación señal/ruido, pérdida de señal y/o paquetes, interferencias, ecos, alarmas, niveles de sonido y la frecuencia de respuesta, por mencionar algunos. QoS tiene por sub escala el GoS (*Grade of Service*) siendo este un requisito de servicio, el cual comprende factores de un enlace con respecto a su capacidad y la cobertura la red (Gómez B. , 2018).

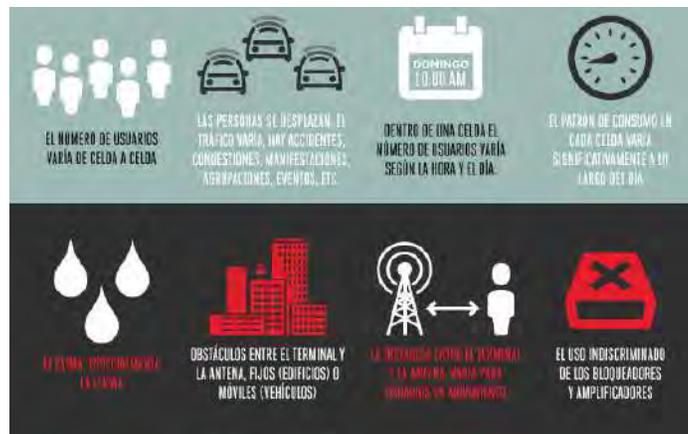
A las empresas proveedoras de servicio, les resulta fundamental la identificación de los servicios a medir y/o monitorear, lo cual constituye como uno de los pasos primordiales para poder mejorar la calidad y cobertura del servicio, así como el rendimiento de la red, se debe realizar las mediciones de la forma más verídicamente posible, con la finalidad de lograr reducir las discordancias entre expectativas y percepción de los usuarios. La calidad de servicio identifica como aspectos medibles: La accesibilidad al servicio, la retenibilidad del servicio, la cobertura de la red y también la integridad del servicio (Gómez B. , 2018).

2.2.8.1 Factores que afectan la calidad de las redes móviles

La instalación de estaciones base para poder brindar cobertura y capacidades de prestación, forma parte de las grandes inversiones en infraestructuras de red que realizan los proveedores de servicios de telefonía móvil. No obstante, la cantidad de antenas instaladas no es el único factor que influye en la calidad del servicio. En contraste a las redes fijas, las redes móviles se ven afectadas por diversos factores que influyen en su desempeño. Los factores exógenos de la planificación, al igual que la construcción de nuevas estaciones base repercuten en la calidad entre antena transmisora y el UE (GSMA, 2016). Algunos factores son presentados por la figura 2.18.

Figura 2.18

Factores que afectan la calidad de las redes móviles



Fuente: Obtenida de (GSMA, 2016)

2.2.9 Indicadores de medición para LTE

Para las redes LTE se tienen ciertos indicadores específicos, con los cuales es posible evaluar la calidad y los niveles de la señal de recepcionada. En el procedimiento de *handover*, cuando el equipo de usuario evalúa las redes disponibles y selecciona la mejor señal para su

conexión, los valores de estos indicadores son cruciales (Iñiguez, 2018). A continuación, se detallan algunos indicadores de calidad, nivel y tasa de errores para LTE.

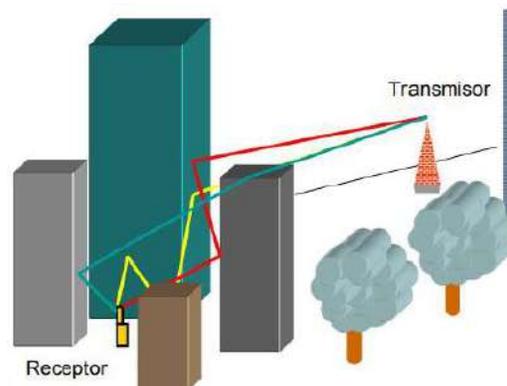
- **RSRP** (*Reference Signal Received Power*): Esta medición viene a ser uno entre los más cruciales para el UE y es el que da a conocer la información sobre la intensidad de la señal, el cual será usado en todo momento, desde que el UE se enciende hasta que este inactivo, este parámetro posibilita la realización de *handover*, al igual que la selección y reelección de la celda (Iñiguez, 2018).
- **RSRQ** (*Reference Signal Received Quality*): El 3GPP define este tipo de medición como una relación $N \cdot \text{RSRP} / (\text{portadora E-UTRA RSSI})$, en donde N viene a ser el número de *Resource Blocks* (RBs) del ancho de banda sobre el cual el RSSI es medido. Las medidas de este tipo evidencian la calidad de la señal de referencia recibida y es utilizada cuando RSRP es insuficiente para llevar a cabo la reelección de celda (Garzón, 2015).
- **SINR** (*Signal to Interference Plus Noise Ratio*): Para la medición de este tipo, la relación entre la potencia y la señal de referencia, junto con las interferencias de las celdas vecinas y el ruido, sirve a este indicador para estimar la calidad de la señal (Chancasana, 2015).
- **RSSI** (*Received Signal Strength Indicator*): Este indicador llega a medir la totalidad de potencia receptionada que es observada solamente en los símbolos OFDM que abarcan N bloques de recursos en el ancho de banda de medición y tiene en cuenta el ruido térmico, las interferencias de canales adyacentes y la potencia co-canal de la celda (Garzón, 2015).

2.2.10 Modelos de propagación

El comportamiento de las señales de ondas electromagnéticas cuando viajan del emisor al receptor puede predecirse utilizando modelos de propagación. Los rasgos de su comportamiento se representan mediante ecuaciones matemáticas, gráficos y algoritmos. Las señales pueden experimentar pérdidas como consecuencia de características ambientales como zonas rurales, lugares densamente poblados, entornos marítimos, zonas boscosas, frecuencias en las que se operan, entre otros factores (Molina, 2020). La figura 2.19 muestra para un ámbito urbano la trayectoria que puede seguir una señal.

Figura 2.19

Trayectoria del transmisor al receptor de la señal



Fuente: Obtenido de (Molina, 2020)

2.2.10.1 Modelo de Propagación Okumura – Hata

Uno de los modelos de mayor uso para la predicción de señales en entornos urbanos es el modelo Okumura-Hata. Este modelo es adecuado para las frecuencias que se sitúan entre 150 MHz a 1900 MHz, las expresiones matemáticas de pérdida de trayecto y factores de corrección de este modelo son obtenidas de (Chávez, 2015) siendo estas:

$$PL_{dB} = 69.55 + 26.16 \log(f) - 13.82 \log(h_b) - a(h_m) + [44.9 - 6.55 \log(h_b)] \log(d) \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Tomando en consideración las siguientes restricciones:

- $150\text{MHz} < f < 1500\text{MHz}$
- $30\text{m} < h_b < 200\text{m}$
- $1\text{m} < h_m < 10\text{m}$

Donde:

- f : Es la frecuencia en MHz de la portadora.
- h_b : Es la altura en metros para la antena transmisora, dentro del rango de 30 a 300 metros.
- h_m : Es la altura en metros para la antena receptora, dentro del rango de 1 a 10 metros.
- $a(h_m)$: Es el factor de corrección para la altura de antena de la unidad móvil en dB.
- d : Es la distancia en kilómetros del transmisor hacia el receptor.

El factor de corrección $a(h_m)$ es dependiente de la altura del móvil y es calculado con:

Para pequeñas o medianas ciudades, se establece $a(h_m)$ como:

$$a(h_m) = (1.11 \log(f) - 0.7)h_m - (1.56 \log(f) - 0.8) \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Para grandes ciudades, se establece $a(h_m)$ como:

$$a(h_m) = 8.29(\log 1.54 \times h_m)^2 - 1.1 \quad \text{si } f \leq 200\text{MHz} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$a(h_m) = 3.2(\log 11.75 \times h_m)^2 - 4.97 \quad \text{si } f \geq 400\text{MHz} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

2.2.10.2 Modelo de Propagación COST 231 – Hata

Es un modelo de propagación de radio ampliamente empleado para predecir las pérdidas de trayecto, en los sistemas de comunicaciones móviles inalámbricos. El cual se basa en el modelo Okumura-Hata, pudiendo así proporcionar más rango de frecuencia. Este modelo fue diseñado para un rango de frecuencia que va de 1500 a 2000 MHz, se considera que la altura de la antena móvil puede variar de 1m a 10m, en tanto que la altura para las antenas de las estaciones base pueden oscilar en el rango de 30m a 200m. Además de ser aplicable en entornos urbanos, suburbanos y también zonas rurales con factores de corrección. La expresión matemática para determinar las pérdidas de trayecto es obtenida de (Imoize & Dosunmu, 2018).

$$PL_{db} = 46.3 + 33.9 \log(f) - 13.82 \log(h_b) - a(h_m) + [44.96 - 6.55 \log(h_b)] \log d + C_m \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Donde

- f : Es la frecuencia en (MHz).
- d : Es la distancia en (km) del transmisor entre el receptor
- h_b : Altura en metros (m) para antena de la estación base sobre el nivel del suelo.
- h_m : Altura en metros (m) de la antena móvil.
- C_m : Constante de desviación estándar. Para ambientes suburbano o abierto es 0 dB y de 3 dB para entornos urbanos.

Para $a(h_m)$ en entornos urbanos (grandes ciudades) (Beciez, Flores, & Pérez, 2013), será:

$$a(h_m) = 3.20(\log(11.75h_m))^2 - 4.97 \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Para $a(h_m)$ en zonas suburbanas y rurales, (Beciez, Flores, & Pérez, 2013), será:

$$a(h_m) = (1.11 \log(f) - 0.7)h_m - (1.56 \log(f) - 0.8) \quad (\text{Ec. 2.7})$$

2.2.10.3 Modelo SPM (Standard Propagation Model)

El SPM es un modelo de propagación que se sustenta a partir de la fórmula de Hata, la cual es adaptada para poder realizar predicciones en la cobertura de señal entre 150 MHz a 3500 MHz, en distancias que van de 1 a 20 km. El modelo se aplica de mejor manera en tecnologías como LTE y LTE-Advanced, entre otras análogas o equivalentes (de Freitas & Tertuliano Filho, 2017).

La frecuencia de operación, la geografía del terreno (clima, vegetación, relieve), el tipo de zona (rural, suburbano, urbana), y las alturas para la antena de transmisión y de la antena de recepción, son factores que el modelo SPM tiene en cuenta para poder calcular la pérdida de trayecto (Gómez & Romero, 2018). El SPM está basada en la siguiente expresión matemática:

$$P_R = P_{Tx} - [K_1 + K_2 * \log(d) + K_3 * \log(H_{Tx_{eff}}) + K_4 * (DiffractionLoss) + K_5 * \log(d) * \log(H_{Tx_{eff}}) + K_6 * H_{Rx_{eff}} + K_7 * \log(H_{Rx_{eff}}) + K_{clutter} * f(clutter) + K_{hill,LOS}] \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Donde:

- P_R : Es la Potencia recibida (dBm)
- P_{Tx} : Es la Potencia transmitida (EIRP) en (dBm)
- K_1 : Viene a ser la constante de desplazamiento (dB)
- K_2 : Es el factor múltiplo de $\log(d)$
- d : Es la distancia en metros (m) del transmisor entre el receptor
- K_3 : Viene a ser el factor múltiplo de $\log(H_{Tx_{eff}})$
- $H_{Tx_{eff}}$: Es la altura efectiva en metros (m) de la antena transmisora
- K_4 : Factor múltiplo de la difracción calculada (K_4 tiene que ser un valor numérico positivo).

- *DiffractionLoss*: Pérdida debido a la difracción de más de una trayectoria obstruida (dB).
- K_5 : Es el factor múltiple para: $\log(H_{Tx_{eff}}) \log(d)$
- K_6 : Es el factor múltiple de: $H_{Rx_{eff}}$
- K_7 : Es el Factor múltiple de: $\log(H_{Rx_{eff}})$
- $H_{Rx_{eff}}$: Viene a ser la altura en metros (m) de la antena receptora
- $K_{clutter}$: Es el factor múltiple de: $f(clutter)$
- $f(clutter)$: Es el promedio de las pérdidas ponderadas en el *clutter*.
- $K_{hill,LOS}$: Es el factor de corrección para las zonas montañosas (= 0 en caso de NLOS)

Según se observa en la expresión matemática para el SPM especifica cómo varían la potencia de transmisión y la potencia de recepción, donde se toma en consideración las pérdidas como el elemento de la radiación y la geografía del terreno en el transcurso que la onda se desplaza (Gómez & Romero, 2018).

CAPÍTULO III: DIAGNOSTICO SITUACIONAL DEL CASO DE ESTUDIO

3.1 Reporte de recolección de datos

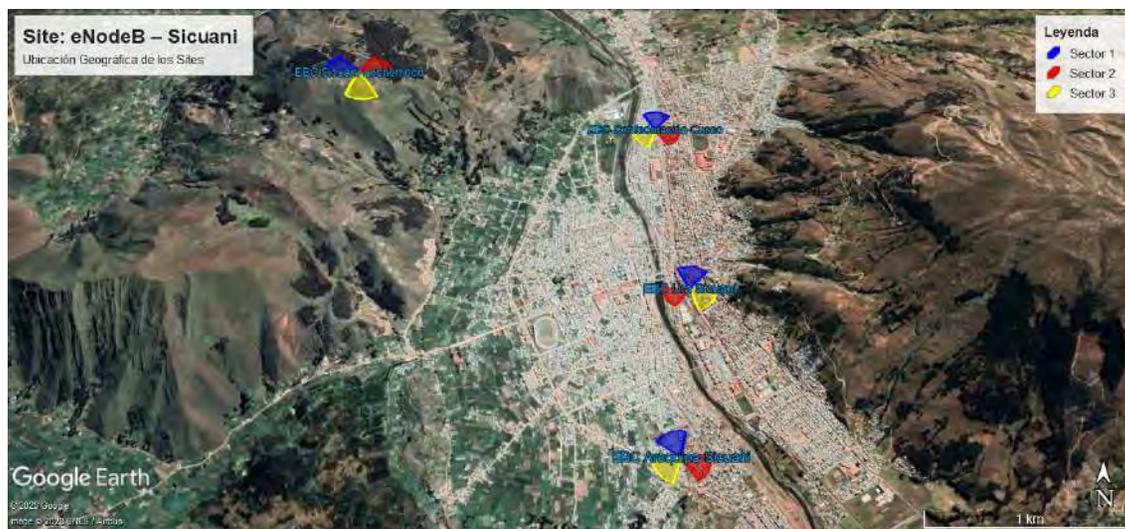
3.1.1 Descripción general del ámbito geográfico

La ciudad de Sicuani, ubicada en la provincia de Canchis, departamento del Cusco con una población de 59,833 habitantes. Actualmente dispone de 4 estaciones base celular del operador móvil en estudio y cada una de ellas cuenta con la tecnología LTE-Advanced y como presenta la figura 3.1, estos *sites* se encuentran localizadas en distintas zonas de la ciudad. La ubicación exacta de cada eNodeB fue tomada en cuenta a la hora de recopilar los distintos datos del estudio.

Se debe de considerar que la ciudad de Sicuani, está dentro de un valle, por lo cual, el terreno accidentado (arboles, quebradas y lomas) limita la cobertura LTE-A en ciertas zonas.

Figura 3.1

Ubicación geográfica - estaciones base Sicuani



Fuente: Imagen obtenida de Google Earth

3.1.2 Diagnostico situacional de la red LTE-Advanced actual

En la presente sección, para poder describir la situación actual de la red LTE-Advanced, se visitó las 4 estaciones base celular (eNodeB) con los que cuenta la empresa operadora en estudio en la ciudad de Sicuani. Para tener un panorama más claro de la implementación actual de esta tecnología se realizó un *Technical Site Survey (TSS)*, haciendo uso de las herramientas: GPS, inclinómetro, brújula, *laptop*, *Smart Tilt*. Para lo cual se contó con la debida autorización.

Seguidamente de una forma muy genérica, se pasa a detallar las ubicaciones, equipamiento por cada *site*, al igual que algunos detalles técnicos que describen el equipamiento de la tecnología LTE-Advanced, implementada actualmente por la empresa operadora en estudio.

1. eNodeB Ura Sicuani

Iniciamos la visita a los locales de la empresa operadora, con el nodo principal denominado estación base (eNodeB) Ura Sicuani, ubicada a espaldas de la municipalidad provincial de Canchis, cuyos datos para su identificación son los siguientes.

Tabla 3.1

Ubicación del eNodeB Ura Sicuani

Nombre Node	Código Único Estación	Tecnología	Banda Frecuencia	Latitud	Longitud
Ura Sicuani	CU230	LTE-Advanced	700 AWS	-14.26833	-71.22611

Fuente: Datos de la empresa operadora (elaboración propia)

Este site viene a ser el punto de concentración de todo el tráfico de red de la ciudad de Sicuani y partiendo de los datos de tabla 3.1; la figura 3.2 ilustra su localización geográfica.

Figura 3.2

Ubicación geográfica eNodeB Ura Sicuani



Fuente: Imagen obtenida de Google Earth

La figura 3.3, muestra la ubicación del *site*. Se puede apreciar la fachada y torre.

Figura 3.3

Vista panorámica eNodeB Ura Sicuani



Fuente: Obtenida de la empresa operadora (elaboración propia)

Se especifica la distribución del equipamiento LTE-Advanced empleado en el servicio de telefonía móvil, todas en la marca Ericsson, en la siguiente tabla 3.2.

Tabla 3.2

Equipamiento LTE-A eNodeB Ura Sicuani

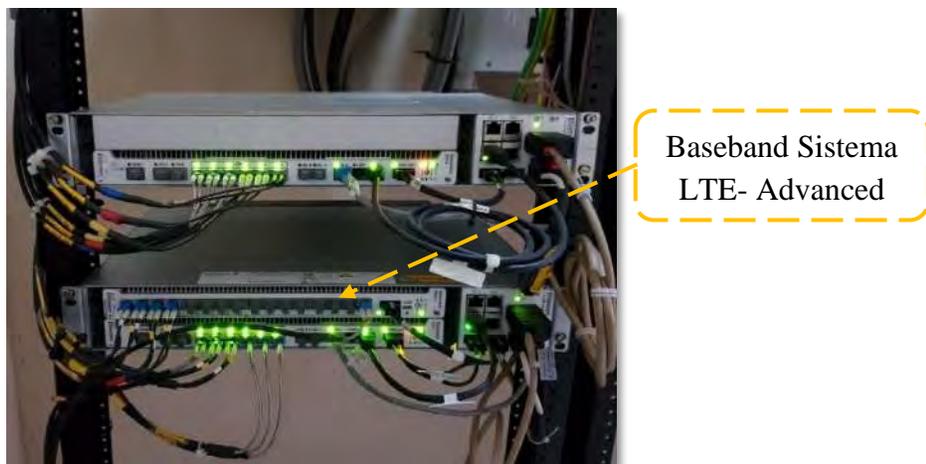
Equipo	Cantidad	Descripción	Tecnologías	Sectores	RRUS por sector	Descripción
Baseband 5216	1	Integran la Tecnología	LTE-700 Banda 28	3	1	RRUS Radio 2217 B28A
Baseband R503	1	LTE - Advanced	LTE-2100 Banda 4	3	1 Master 1 diversidad	RRUS 11 B4 RRUS A2 B4

Fuente: Datos de la empresa operadora (elaboración propia)

Se observa a partir de la figura 3.4, un equipo independiente para el servicio de LTE-A (parte inferior), conformado por las Baseband 5216 y Baseband R503 (ambas de la marca Ericsson), las bandas base integran mediante un *carrier aggregation* el sistema LTE-Advanced.

Figura 3.4

Baseband LTE-A eNodeB Ura Sicuani



Fuente: Obtenida de la empresa operadora (elaboración propia)

Se observa en la figura 3.5 como se distribuyen las RRUS del sistema radiante en LTE-A.

Figura 3.5

Distribución RRUS eNodeB Ura Sicuani



Fuente: Obtenida de la empresa operadora (elaboración propia)

Se presenta el azimut en cada sector desde las antenas, en la siguiente figura 3.6.

Figura 3.6

Azimut de sectores eNodeB Ura Sicuani

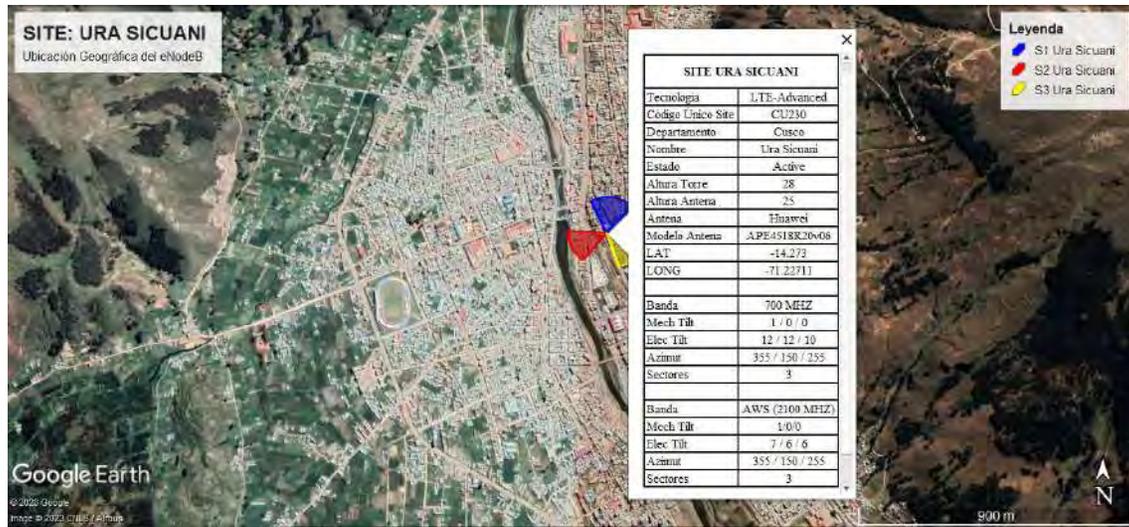


Fuente: Obtenida de la empresa operadora (elaboración propia)

Algunos detalles de parámetros de distribución de las antenas en el sistema radiante para el *site* Ura Sicuani, son mostrados de acuerdo a la figura 3.7.

Figura 3.7

Parámetros sistema radiante eNodeB Ura Sicuani

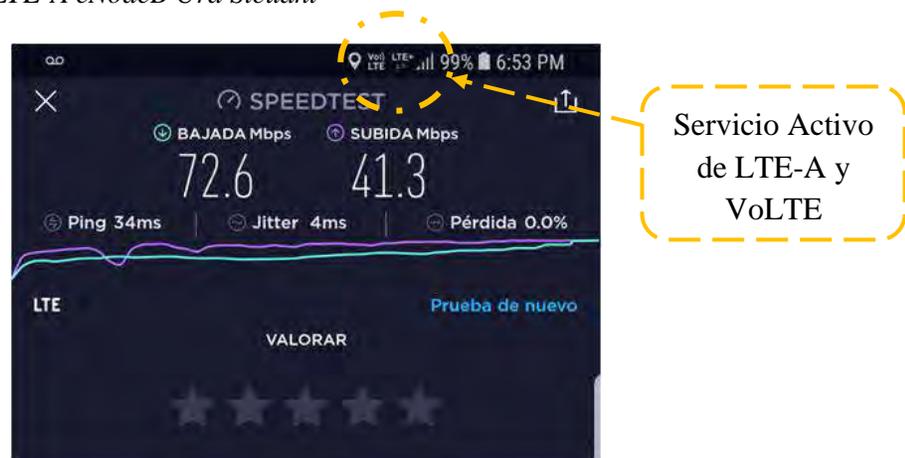


Fuente: Datos de la empresa operadora - Google Earth (elaboración propia)

Se realizó pruebas de *Speedtest* en diferentes puntos dentro del área de cobertura del site, obteniendo una velocidad de 72.6Mbps/41.3Mbps (asimétrica), medición tomada cerca del eNodeB, el UE cuenta con señal LTE-A y servicio VoLTE, según describe detalles la figura 3.8.

Figura 3.8

Test de velocidad LTE-A eNodeB Ura Sicuani



Fuente: Elaboración Propia

2. eNodeB Sicuani - Lechemoco

Para llegar a este local se tuvo que acceder a la ubicación de las antenas de telecomunicaciones en el cerro Lechemoco, justamente aquí es donde se ubica la estación base (eNodeB) Sicuani - Lechemoco, cuyos datos para su ubicación son los siguientes.

Tabla 3.3

Ubicación del eNodeB Sicuani – Lechemoco

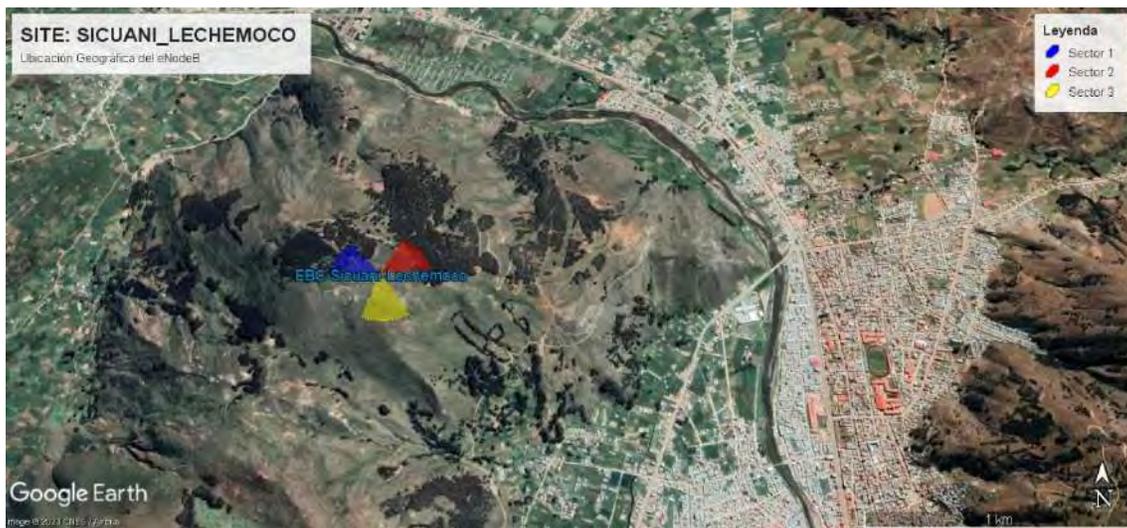
Nombre Node	Código Único Estación	Tecnología	Banda Frecuencia	Latitud	Longitud
Sicuani - Lechemoco	CU014	LTE-Advanced	700 AWS	-14.2605556	-71.2455556

Fuente: Datos de la empresa operadora (elaboración propia)

La figura 3.9 muestra la ubicación geográfica exacta, según las coordenadas de la tabla 3.3.

Figura 3.9

Ubicación geográfica eNodeB Sicuani – Lechemoco



Fuente: Imagen obtenida de Google Earth

Los detalles de ubicación, fachada y torre del eNodeB, son expuestos por la figura 3.10.

Figura 3.10

Vista panorámica eNodeB Sicuani – Lechemoco



Fuente: Obtenida de la empresa operadora (elaboración propia)

La tabla 3.4 muestra el equipamiento para LTE-Advanced, todas en la marca Ericsson.

Tabla 3.4

Equipamiento LTE-A eNodeB Sicuani - Lechemoco

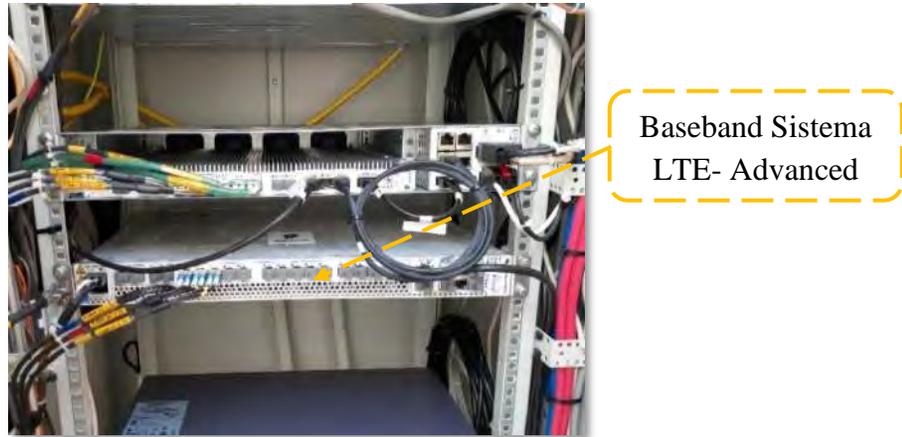
Equipo	Cantidad	Descripción	Tecnologías	Sectores	RRUS por sector	Descripción
Baseband 6630	1	Integra la Tecnología LTE - Advanced	LTE-700 Banda 28	3	1	RRUS Radio 2217 B28A
			LTE-2100 Banda 4	3	1	RRUS 11 B4

Fuente: Datos de la empresa operadora (elaboración propia)

Según detalles de figura 3.11 (parte inferior), se aprecia la Baseband 6630 para el sistema LTE-Advanced que integra mediante *carrier aggregation* a las tecnologías LTE-AWS y LTE-700.

Figura 3.11

Baseband LTE-A eNodeB Sicuani - Lechemoco



Fuente: Obtenida de la empresa operadora (elaboración propia)

Se detalla en figura 3.12 como se distribuyen las RRUS del sistema radiante en LTE-A.

Figura 3.12

Distribución RRUS eNodeB Sicuani – Lechemoco



Fuente: Obtenida de la empresa operadora (elaboración propia)

Se presenta el azimut en cada sector desde las antenas, en la siguiente figura 3.13.

Figura 3.13

Azimut de sectores eNodeB Sicuani - Lechemoco

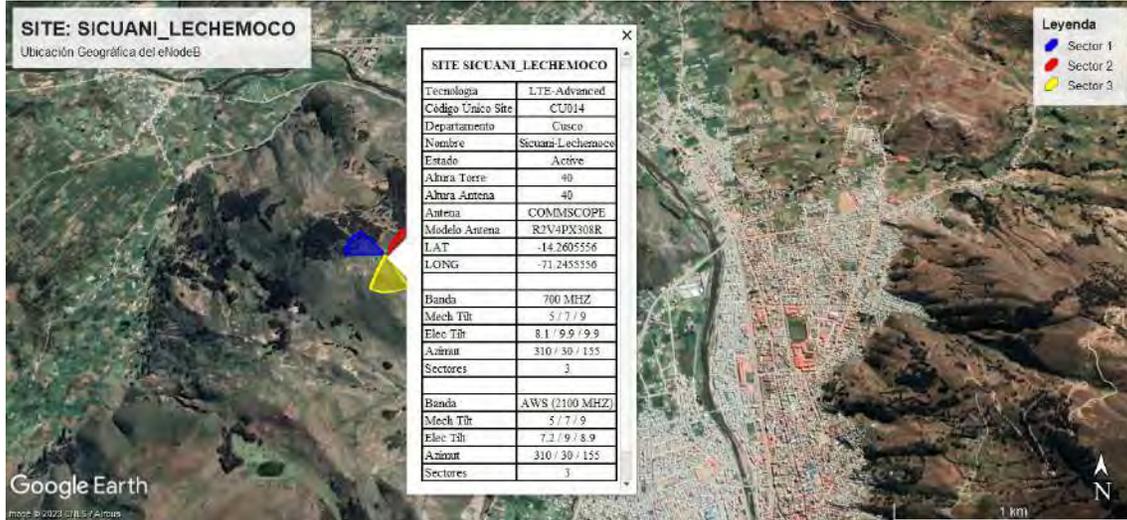


Fuente: Datos de la empresa operadora (elaboración propia)

Algunos detalles de parámetros de distribución de las antenas en el sistema radiante para el *site* Sicuani - Lechemoco, son mostrados de acuerdo a la figura 3.14.

Figura 3.14

Parámetros sistema radiante eNodeB Sicuani – Lechemoco

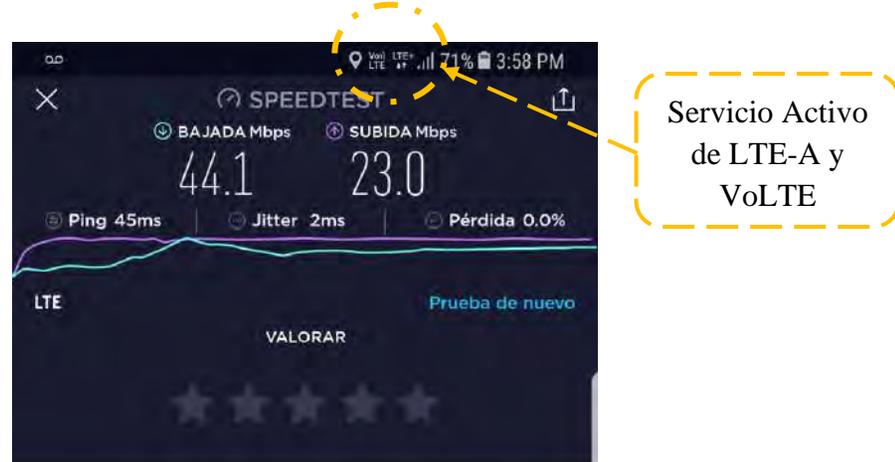


Fuente: Imagen obtenida de Google Earth

La prueba de *Speedtest*, obtuvo como resultado velocidades de 44.1Mbps/23Mbps (asimétrico), el UE cuenta con señal LTE-Advanced y servicio VoLTE según la figura 3.15 detalla.

Figura 3.15

Test de velocidad LTE-A eNodeB Sicuani – Lechemoco



Fuente: Elaboración Propia

3. eNodeB Arequipa – Sicuani

La tercera estación base (eNodeB) que se visita tiene por denominación Arequipa-Sicuani, cuyos datos para su identificación fueron los siguientes.

Tabla 3.5

Ubicación del eNodeB Arequipa - Sicuani

Nombre Node	Código Único Estación	Tecnología	Banda Frecuencia	Latitud	Longitud
Arequipa - Sicuani	CU568	LTE-Advanced	700 AWS	-14.282321	-71.228271

Fuente: Datos de la empresa operadora (elaboración propia)

Este *site* tiene como medio de transmisión hacia la Ura Sicuani, un enlace de fibra óptica y la figura 3.16 muestra la ubicación geográfica exacta, según las coordenadas presentadas en la tabla 3.5.

Figura 3.16

Ubicación geográfica eNodeB Arequipa – Sicuani



Fuente: Imagen obtenida de Google Earth

La figura 3.17, muestra la ubicación del *site*. Se aprecia la fachada y la torre.

Figura 3.17

Vista panorámica eNodeB Arequipa – Sicuani



Fuente: Obtenida de la empresa operadora (elaboración propia)

La tabla 3.6 describe el equipamiento para LTE-Advanced, todas en la marca Ericsson.

Tabla 3.6

Equipamiento LTE-A eNodeB Arequipa - Sicuani

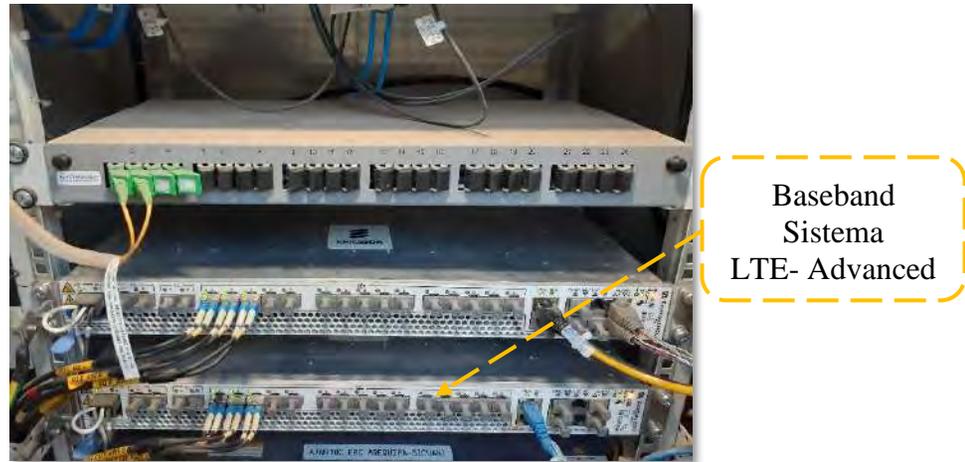
Equipo	Cantidad	Descripción	Tecnologías	Sectores	RRUS por sector	Descripción
Baseband 6630	1	Integra la Tecnología	LTE-700 Banda 28	3	1	RRUS Radio 2217 B28
		LTE - Advanced	LTE-2100 Banda 4	3	1	Radio 4415 B66A

Fuente: Datos de la empresa operadora (elaboración propia)

La figura 3.18, muestra en la parte inferior una Baseband 6630 para el sistema LTE-Advanced que realiza un *carrier aggregation* entre el LTE-700 y LTE-AWS.

Figura 3.18

Baseband LTE-A eNodeB Arequipa – Sicuani

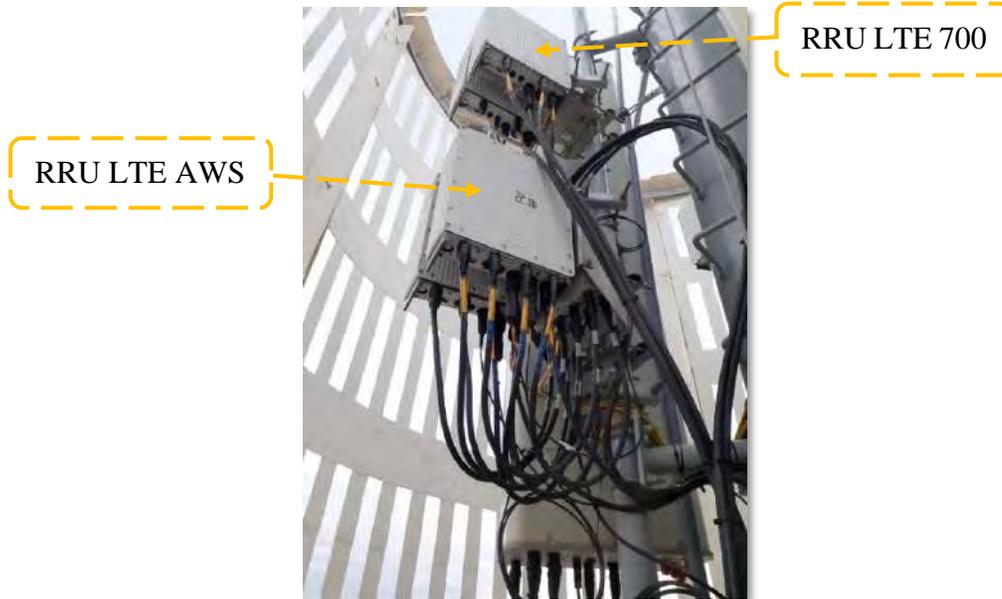


Fuente: Propia - Obtenida de la empresa operadora

La figura 3.19, muestra la distribución de RRUS en el sistema radiante para LTE-A

Figura 3.19

Distribución RRUS eNodeB Arequipa – Sicuani



Fuente: Obtenida de la empresa operadora (elaboración propia)

La figura 3.20 presentan los azimuts de cada sector desde las antenas.

Figura 3.20

Azimut de sectores eNodeB Arequipa - Sicuani

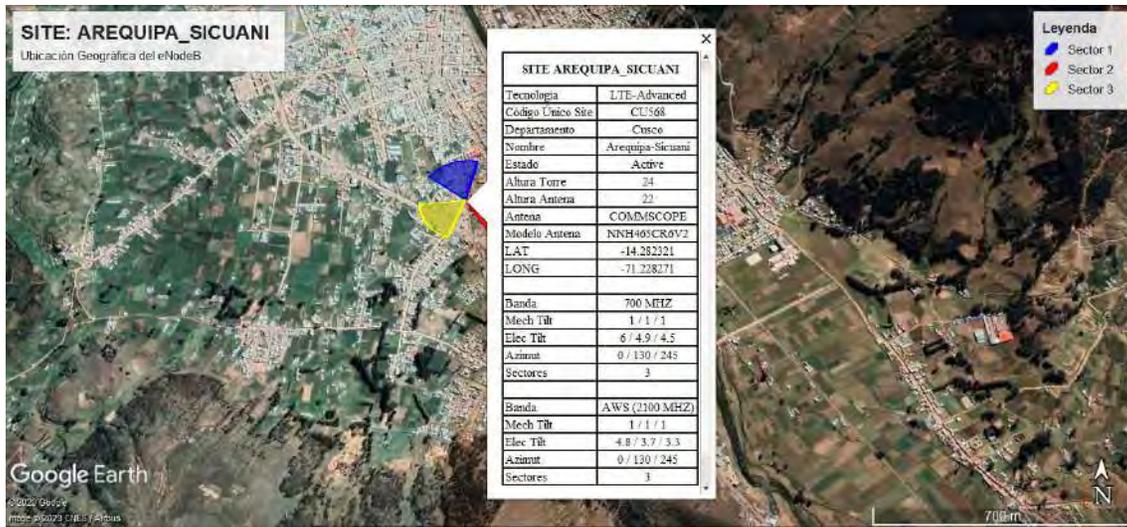


Fuente: Obtenida de la empresa operadora (elaboración propia)

La figura 3.21, presenta detalles de la distribución de algunos parámetros para las antenas en el sistema radiante.

Figura 3.21

Parámetros sistema radiante eNodeB Arequipa – Sicuani

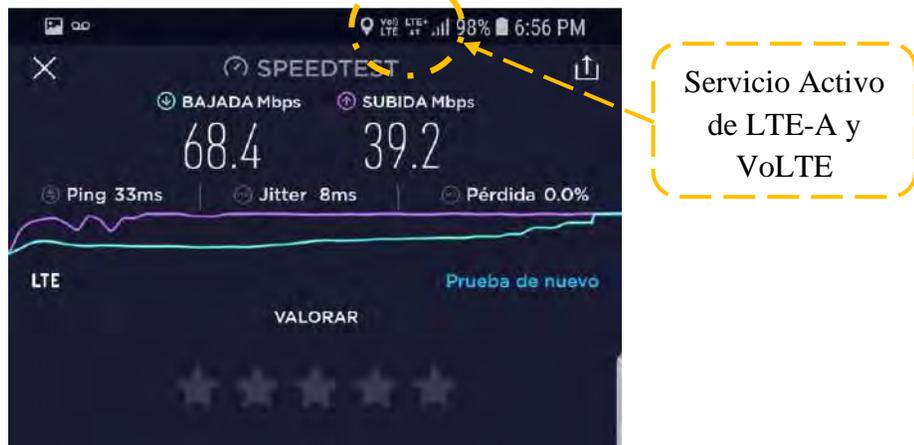


Fuente: Imagen obtenida de Google Earth

En la prueba de *Speedtest* cerca al eNodeB, se obtuvo la velocidad de 68.4Mbps/39.2Mbps (asimétrico), El UE cuenta con señal LTE-Advanced y servicio VoLTE, más detalles figura 3.22.

Figura 3.22

Test de velocidad LTE-A eNodeB Arequipa – Sicuani



Fuente: Elaboración Propia

4. eNodeB Confederación - Cusco

La última visita se realiza a la estación base (eNodeB) denominación Confederación - Cusco, cuyos datos para su identificación fueron los siguientes.

Tabla 3.7

Ubicación de eNodeB Confederación – Cusco

Nombre Node	Código Único Estación	Tecnología	Banda Frecuencia	Latitud	Longitud
Confederación - Cusco	CU556	LTE - Advanced	$\frac{700}{\text{AWS}}$	-14.2620676	-71.2285073

Fuente: Elaboración propia

El medio de transmisión del *site*, es un enlace de fibra óptica hacia la Ura Sicuani, la figura 3.23, ilustra la ubicación geográfica exacta, según las coordenadas presentadas en la tabla 3.7.

Figura 3.23

Ubicación geográfica eNodeB Confederación – Cusco



Fuente: Imagen obtenida de Google Earth

Los detalles de ubicación, fachada y torre del eNodeB, son expuestos por la figura 3.24.

Figura 3.24

Vista panorámica eNodeB Confederación – Cusco



Fuente: Obtenida de la empresa operadora (elaboración propia)

Se especifica la distribución del equipamiento LTE-Advanced empleado en el servicio de telefonía móvil, todas en la marca Ericsson, en la siguiente tabla 3.8.

Tabla 3.8

Equipamiento LTE-A eNodeB Confederación – Cusco

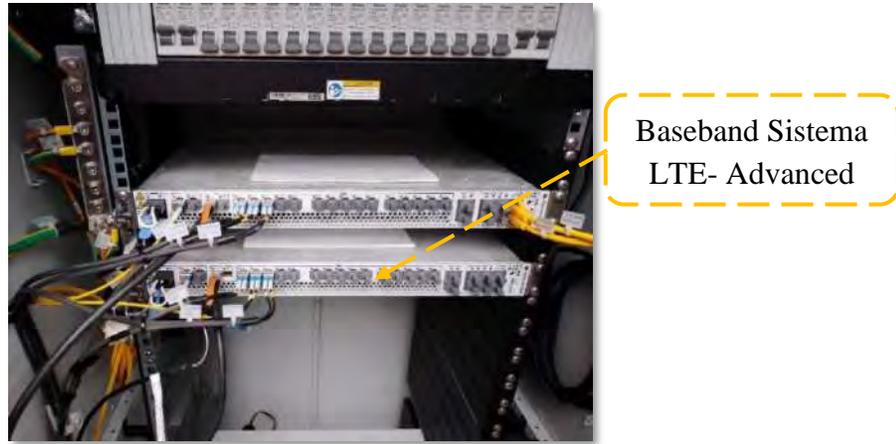
Equipo	Cantidad	Descripción	Tecnologías	Sectores	RRUS por sector	Descripción
Baseband 6630	1	Integra la Tecnología LTE-Advanced	LTE-700 Banda 28	3	1	RRUS Radio 2219 B28
			LTE-2100 Banda 4	3	1	Radio 4415 B66A

Fuente: Datos de la empresa operadora (elaboración propia)

Según ilustra la figura 3.25 (parte inferior), se tiene una Baseband 6623 marca Ericsson, para el sistema LTE-Advanced, que realiza un *carrier aggregation* entre el LTE-700 y LTE-AWS.

Figura 3.25

Baseband LTE-A eNodeB Confederación – Cusco

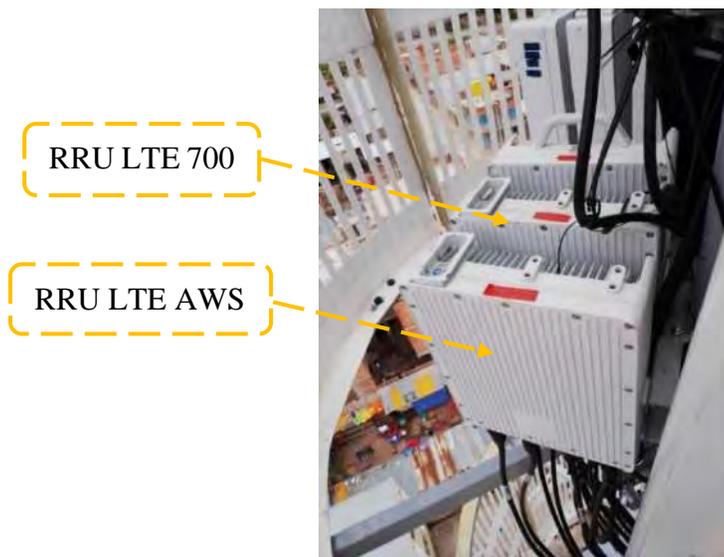


Fuente: Obtenida de la empresa operadora (elaboración propia)

Se detalla en figura 3.26 como se distribuyen las RRUS del sistema radiante en LTE-Advanced, la cual se repite en los tres sectores.

Figura 3.26

Distribución RRUS eNodeB Confederación – Cusco



Fuente: Obtenida de la empresa operadora (elaboración propia)

La figura 3.27, presenta los azimuts de cada sector, tomados desde las antenas.

Figura 3.27

Azimut de sectores eNodeB Confederación – Cusco



Fuente: Obtenida de la empresa operadora (elaboración propia)

Algunos detalles de parámetros de distribución de las antenas en el sistema radiante (ello para los tres sectores con los que cuenta) para el *site* Sicuani - Lechemoco, son mostrados de acuerdo a la figura 3.28.

Figura 3.28

Parámetros sistema radiante eNodeB Confederación – Cusco

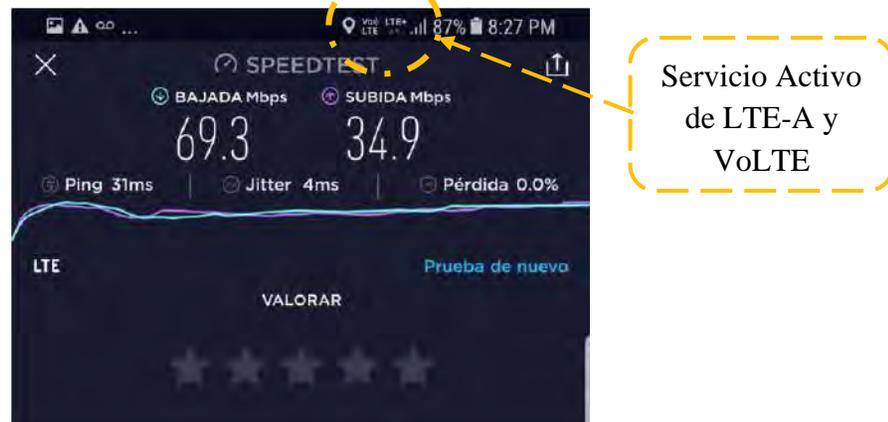


Fuente: Imagen obtenida de Google Earth

La prueba de *Speedtest* cerca al eNodeB, obtuvo una velocidad de 69.3Mbps/34.9Mbps (asimétrico), el UE cuenta con señal LTE-Advanced y servicio VoLTE, detalles figura 3.29.

Figura 3.29

Test de velocidad LTE-A eNodeB Confederación – Cusco



Fuente: Elaboración Propia

3.2 Medición y evaluación de parámetros LTE-Advanced en la ciudad de Sicuani

Para recopilar los datos se emplea la técnica *Drive Test* usando el aplicativo *Nemo Handy* con el fin de obtener la información necesaria para la evaluación y análisis de indicadores, parámetros que nos ayudarán a estimar la calidad y funcionamiento del servicio de la red LTE-A.

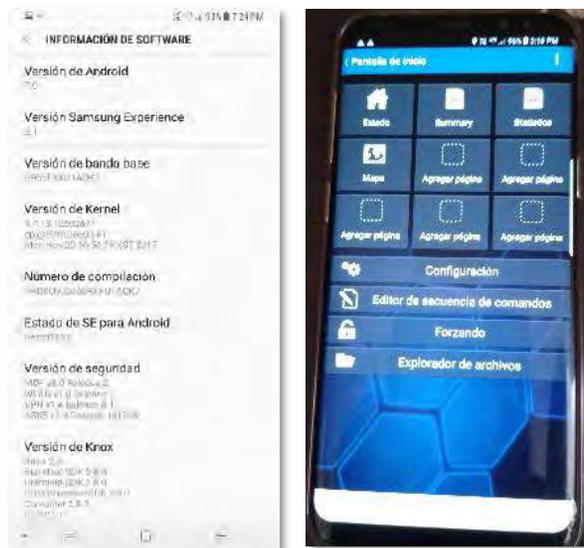
La red en evaluación está integrada a través de un *carrier aggregation* por la red LTE-700 (Banda 28, frecuencia 700MHz) y LTE-AWS (banda 4, frecuencia 2100MHZ), por lo cual se realizó dos recorridos, uno para cada caso, a una velocidad máxima de 40km/h, según recomendaciones del proveedor del *software Nemo Handy*, la velocidad durante la toma de muestras no debe de exceder los 50km/h, de ser el caso u omitir esta recomendación se corre el riesgo de obtener muestras erróneas. El recorrido se realizó por las principales avenidas, calles, alrededores y el centro de la ciudad de Sicuani, con la finalidad de tener un panorama más claro y

especifico en cuanto a la velocidad y estabilidad del acceso a la red LTE-Advanced, que ofrece la empresa operadora en estudio en el distrito de Sicuani.

Para la obtención del desempeño de los indicadores en la red de estudio, se hizo uso del equipo *Samsung Galaxy S8+*, con un sistema operativo con versión de *Android 7.0*, la figura 3.30 presenta mayores detalles. Se tiene instalado en el equipo móvil el aplicativo *Nemo Handy*, que es un *software* profesional, tanto el UE y el *software* son exclusivos para este tipo de pruebas.

Figura 3.30

Características UE Samsung Galaxy S8+ - Nemo Handy



Fuente: Obtenida de UE Samsung Galaxy y Nemo Handy

Nemo Handy es una aplicación de *Android* que permite medir la información de diagnóstico inalámbrico de la interfaz aérea, la QoS (calidad de servicio) así como también la QoE (calidad de experiencia) de la aplicación móvil (Keysight, 2023). Además de ser un *software* de *Drive Test* profesional que permite registrar los indicadores de las redes de telefonía y es ampliamente usado por los operadores.

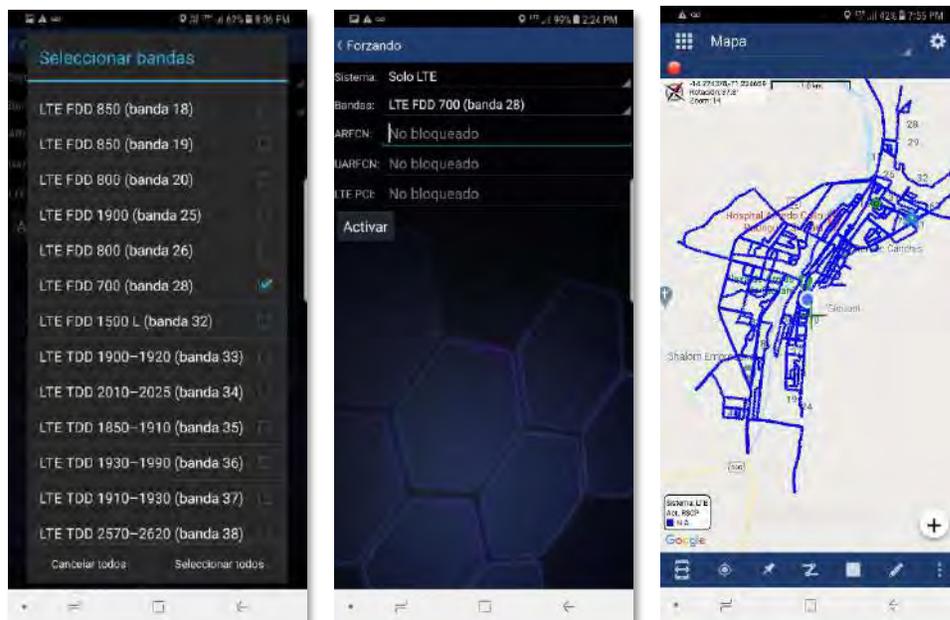
3.2.1 Reporte de medición de los indicadores para la red LTE-700

Se emplea el aplicativo *Nemo Handy* para recopilar los datos dentro del área de estudio y, posteriormente, generar los reportes de la red LTE-700 banda 28 del operador en evaluación, para lo cual se hace uso de información necesaria que conlleve a identificar cada eNodeB, así como de sus ubicaciones geográficas.

1. Para lograr muestras únicamente de esta tecnología, se selecciona en el UE la banda del operador LTE FDD 700 (banda 28) como muestra la figura 3.33. *Nemo Handy* permite visualizar el comportamiento de los indicadores en cualquier momento del recorrido.

Figura 3.33

Selección de LTE FDD 700 (banda 28) en Nemo Handy



Fuente: Obtenida de Nemo Handy

2. Culinado el recorrido los datos generados son almacenados para posteriormente ser transferidos a un ordenador para su procesado y análisis.

3.2.1.1 Resultados generales de medición de la red LTE-700

Los datos obtenidos del desempeño de los indicadores de la red LTE-700 banda 28, fueron procesados y se obtuvieron un total de 7023 muestras. Para el análisis estadístico se tomará el total de estas muestras. La tabla 3.9 detalla el resultado de muestras obtenidas por cada eNodeB.

Tabla 3.9

Muestras detectadas por Nemo Handy por eNodeB para LTE-700

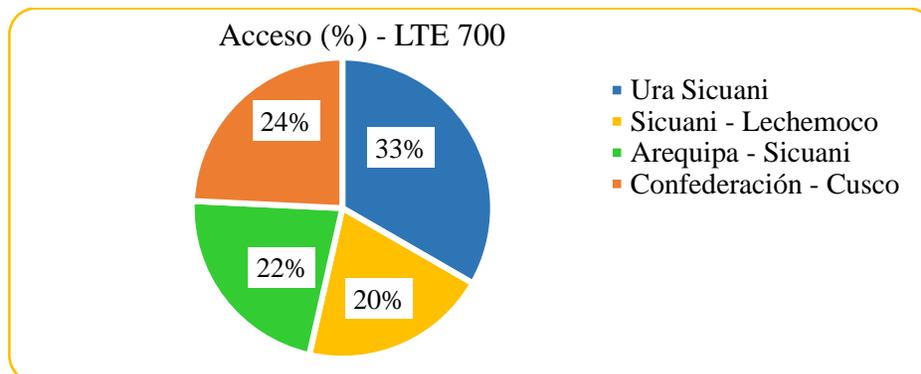
<i>Site Name</i>	Código Único Estación	Numero de muestras	Acceso (%) LTE-700
Ura Sicuani	CU230	2352	33%
Sicuani - Lechemoco	CU014	1389	20%
Arequipa - Sicuani	CU568	1566	22%
Confederación - Cusco	CU556	1716	24%
	Total	7023	100%

Fuente: Propia - Datos obtenidos de Nemo Handy

La proporción de muestras en cada eNodeB para LTE-700, es detallada por la figura 3.34.

Figura 3.34

Porcentaje de acceso por eNodeB para LTE-700



Fuente: Propia - Obtenido en base a la tabla 3.9

Las muestras que detecto *Nemo Handy* por cada sector, es precisada por la tabla 3.10.

Tabla 3.10

Número de muestras por sector de cada eNodeB, para LTE-700

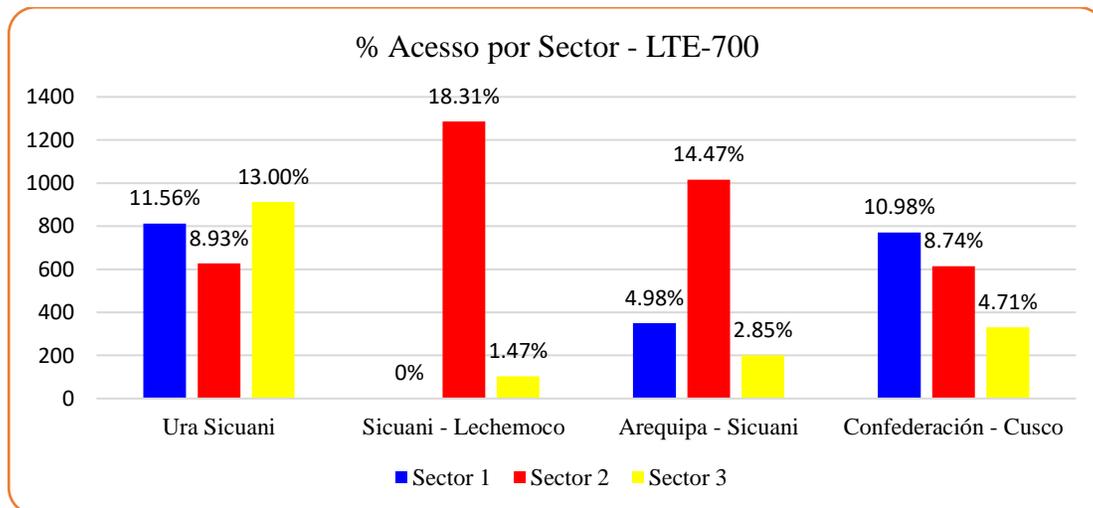
eNodeB	Sector	E-UTRAN Cell ID	#Muestras	Porcentaje %
Ura Sicuani	1	47162884	812	11.56%
	2	47162885	627	8.93%
	3	47162886	913	13.00%
Sicuani - Lechemoco	1	123907591	0	0%
	2	123907592	1286	18.31%
	3	123907593	103	1.47%
Arequipa – Sicuani	1	47249412	350	4.98%
	2	47249413	1016	14.47%
	3	47249414	200	2.85%
Confederación – Cusco	1	47246340	771	10.98%
	2	47246341	614	8.74%
	3	47246342	331	4.71%
Total			7023	100%

Fuente: Propia - Datos obtenidos de Nemo Handy

Los porcentajes de conectividad en cada sector por eNodeB, los ilustra la figura 3.35.

Figura 3.35

Acceso de conectividad por sector en cada eNodeB para LTE-700



Fuente: Obtenido en base a la tabla 3.10 (Elaboración propia)

3.2.1.2 Resultados de indicadores de desempeño para LTE-700

En el presente apartado, se detallarán los resultados obtenidos de tres indicadores de desempeño (RSRP, RSRQ y SINR) tomados en consideración para el análisis. En base a la obtención de muestras del recorrido *Drive Test* realizado para la red móvil LTE-700 banda 28.

a. RSRP – LTE 700

Para poder analizar el comportamiento de este indicador de desempeño se hará uso de las especificaciones mostradas por la tabla 3.11. Donde se precisan los colores por cada uno de los niveles que se obtiene de las mediciones, con relación al rango de la potencia de señal, el cual está acorde al criterio de aceptación del operador en estudio.

Tabla 3.11

Niveles de potencia y lista de colores para RSRP

Level RSRP (dBm)	Estatus
 RSRP ≥ -60	Excelente
 $-70 \leq \text{RSRP} < -60$	Muy Bueno
 $-80 \leq \text{RSRP} < -70$	Bueno
 $-90 \leq \text{RSRP} < -80$	Optimo
 $-100 \leq \text{RSRP} < -90$	Regular
 $-110 \leq \text{RSRP} < -100$	Bajo
 $-120 \leq \text{RSRP} < -110$	Muy Bajo
 RSRP < -120	Critico

Fuente: Adaptada a escala RSRP (Barrantes & Saenz, 2019)

Se ilustra el comportamiento del indicador RSRP de la red LTE-700 en la ruta de recorrido del *Drive Test* por las figuras 3.36, 3.37, 3.38 y 3.39; donde en cada caso se muestra el nivel de cobertura de cada eNodeB asociado a su leyenda de colores descrito en la tabla 3.11.

Figura 3.36

Medición RSRP para LTE-700, eNodeB Ura Sicuani



Fuente: Nemo Handy – Google Earth

Figura 3.37

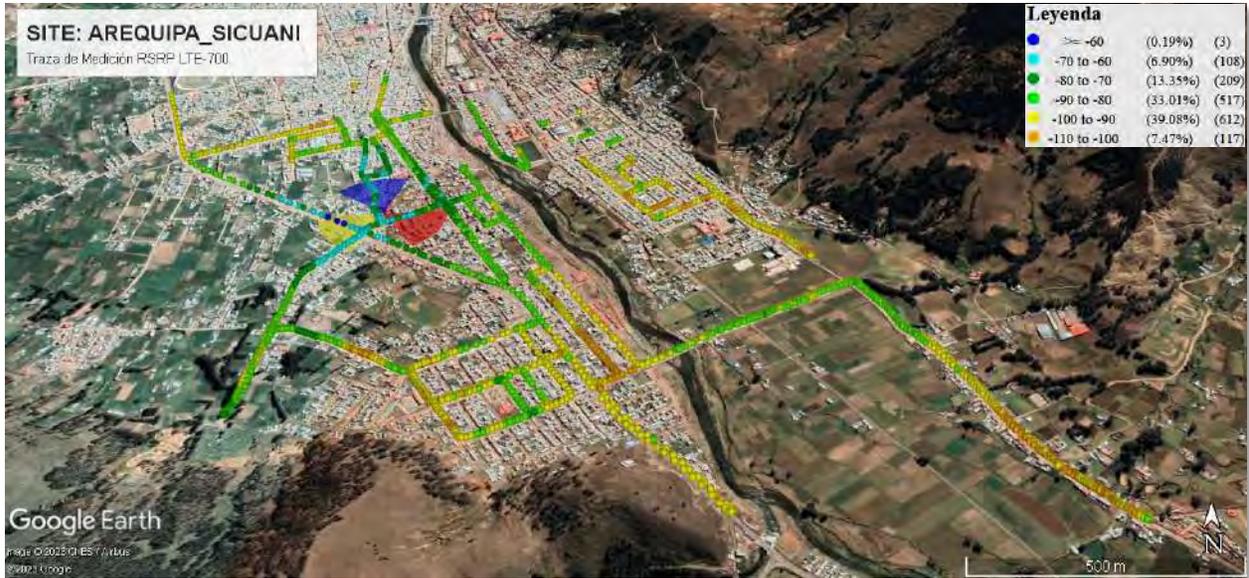
Medición RSRP para LTE-700, eNodeB Sicuani – Lechemoco



Fuente: Nemo Handy – Google Earth

Figura 3.38

Medición RSRP para LTE-700, eNodeB Arequipa – Sicuani



Fuente: Nemo Handy – Google Earth

Figura 3.39

Medición RSRP para LTE-700, eNodeB Confederación – Cusco



Fuente: Nemo Handy – Google Earth

En base a las muestras totales (7023) tomadas del comportamiento del indicador RSRP para LTE-700, se detalla para cada eNodeB la cantidad de muestras obtenidas en la tabla 3.12.

Tabla 3.12

Muestras por eNodeB del indicador RSRP para la red LTE-700

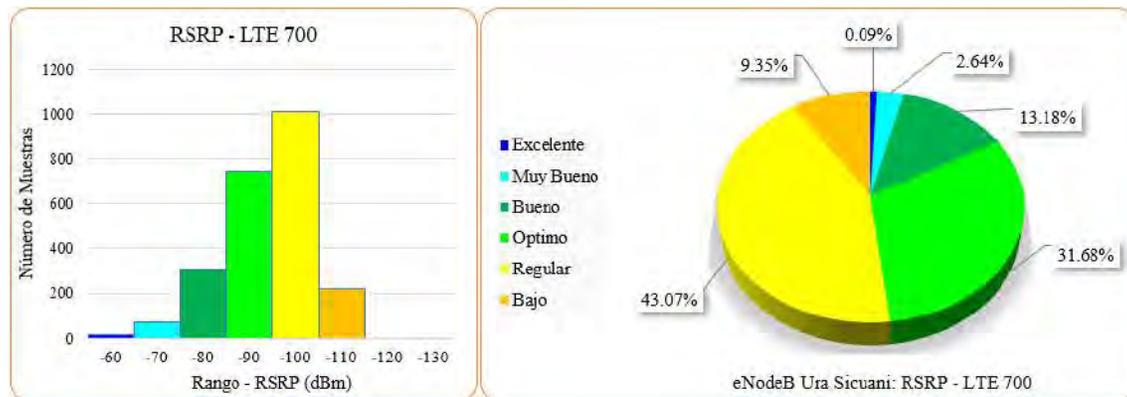
Estatus del Parámetro	Rango RSRP (dBm)	Numero de Muestras LTE 700 por eNodeB			
		Ura Sicuani	Sicuani - Lechemoco	Arequipa - Sicuani	Confederación - Cusco
Excelente	>= -60	2	0	3	0
Muy Bueno	-70 to -60	62	4	108	67
Bueno	-80 to -70	310	92	209	331
Optimo	-90 to -80	745	392	517	639
Regular	-100 to -90	1013	597	612	567
Bajo	-110 to -100	220	302	117	83
Muy bajo	-120 to -110	0	2	0	29
Critico	< -120	0	0	0	0
Total		2352	1389	1566	1716

Fuente: Datos obtenidos de Nemo Handy (elaboración propia)

Es presentado para el eNodeB Ura Sicuani, el resultado estadístico con base a los datos de la tabla 3.12, para la medición del indicador RSRP de cobertura para la red LTE-700.

Figura 3.40

Resultado estadístico RSRP - LTE 700, eNodeB Ura Sicuani

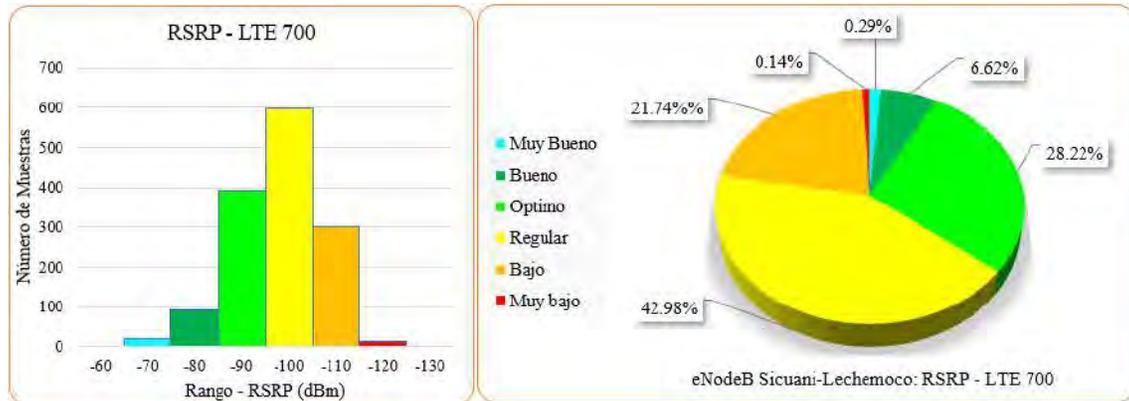


Fuente: Obtenido en base a la tabla 3.12 (elaboración propia)

La figura 3.41, muestra los resultados estadísticos para el indicador de cobertura RSRP del eNodeB Sicuani-Lechemoco para la red LTE-700, basado en datos registrados en la tabla 3.12.

Figura 3.41

Resultado estadístico RSRP - LTE 700, eNodeB Sicuani-Lechemoco

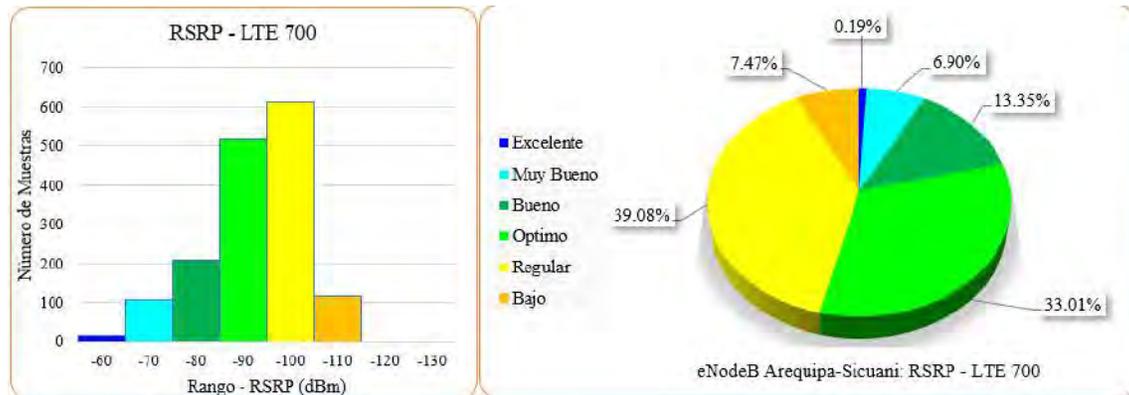


Fuente: Obtenido en base a la tabla 3.12 (elaboración propia)

Para el caso del eNodeB Arequipa-Sicuani, se presenta en la figura 3.42 para el indicador RSRP los resultados estadísticos obtenidos para la red LTE-700 acorde a los datos de la tabla 3.12.

Figura 3.42

Resultado estadístico RSRP - LTE 700, eNodeB Arequipa-Sicuani

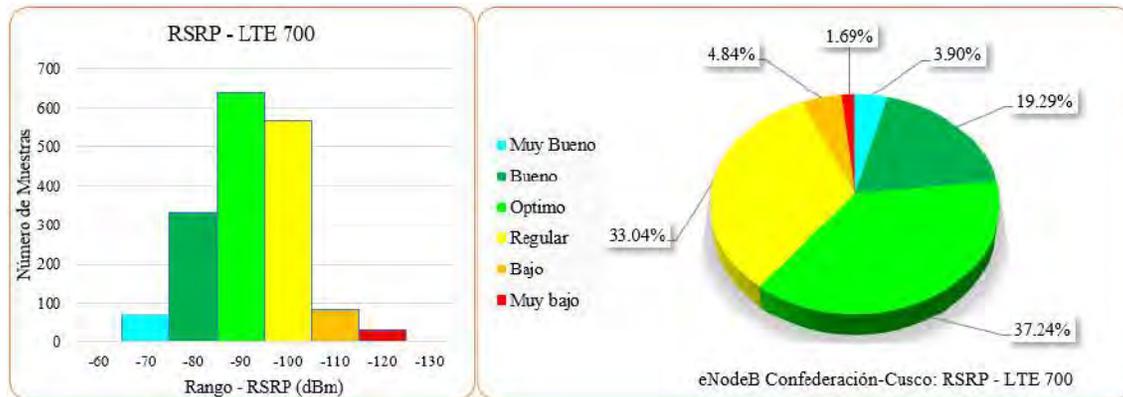


Fuente: Obtenido en base a la tabla 3.12 (elaboración propia)

De igual manera el resultado estadístico del indicador de cobertura RSRP para LTE-700 del eNodeB Confederación-Cusco, es ilustrado conforme a la cantidad de muestras de la tabla 3.12.

Figura 3.43

Resultado estadístico RSRP - LTE 700, eNodeB Confederación-Cusco



Fuente: Obtenido en base a la tabla 3.12 (elaboración propia)

Los resultados del desempeño para el indicador RSRP en la red LTE-700, evidencian que prepondera la señal de intensidad regular ($-100 \leq \text{RSRP} < -90$), lo cual nos da a conocer que la velocidad de datos y desarrollo de llamadas aún son confiables, pero la intensidad de señal puede llegar a presentar eventuales intermitencias, originando pérdidas de datos (datos marginales) con *drop-outs* (pérdidas de conexión) a medida que el valor se acerque a -100 dBm originando una caída del rendimiento, lo cual ocasiona que el UE sea forzado a buscar una conexión de una celda con mejor cobertura.

En el eNodeB Confederación-Cusco, se impuso el nivel óptimo ($90 \leq \text{RSRP} < -80$) con un 37.24% de un total de 1716 muestras (para el resto de *site* sería el segundo rango común), en este intervalo la intensidad de señal es de un nivel aceptable con buena velocidad de datos. De los resultados se evidencia que se tienen deficiencias en la calidad de cobertura, en el área de estudio.

b. RSRQ – LTE 700

Para analizar el indicador de desempeño RSRQ, se hará uso de las especificaciones detalladas por la tabla 3.13. Donde se muestra el color por cada nivel que se obtiene de las mediciones, con relación al nivel de calidad de señal recibida, el cual está acorde al criterio de aceptación del operador en estudio.

Tabla 3.13

Niveles de calidad de señal y lista de colores para RSRQ

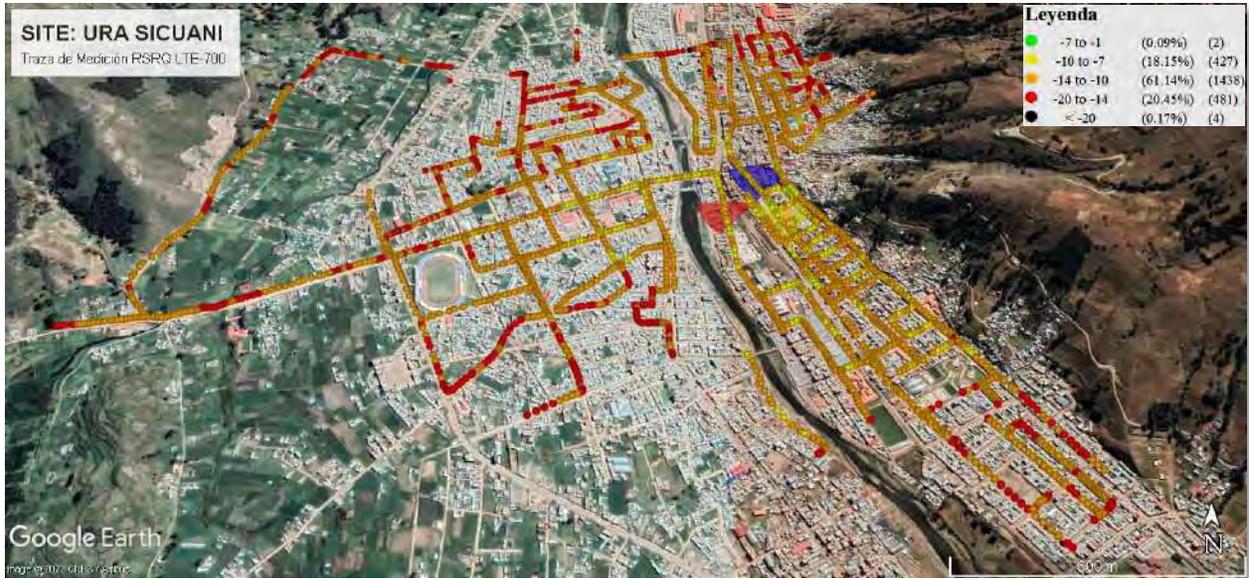
Level RSRQ (dB)	Estatus
 RSRQ ≥ 5	Excelente
 $2 \leq \text{RSRQ} < 5$	Muy Bueno
 $-1 \leq \text{RSRQ} < 2$	Bueno
 $-7 \leq \text{RSRQ} < -1$	Optimo
 $-10 \leq \text{RSRQ} < -7$	Regular
 $-14 \leq \text{RSRQ} < -10$	Bajo
 $-20 \leq \text{RSRQ} < -14$	Muy Bajo
 RSRQ < -20	Critico

Fuente: Adaptada a escala RSRQ (Barrantes & Saenz, 2019)

Se alcanza a observar los niveles del indicador RSRQ de la red LTE-700 en la ruta de recorrido del *Drive Test*, a partir de las ilustraciones mostradas por las figuras 3.44, 3.45, 3.46 y 3.47, para lo cual en cada caso se muestra el nivel de calidad de señal que se recibe de cada eNodeB asociado a su leyenda de colores descrito en la tabla 3.13.

Figura 3.44

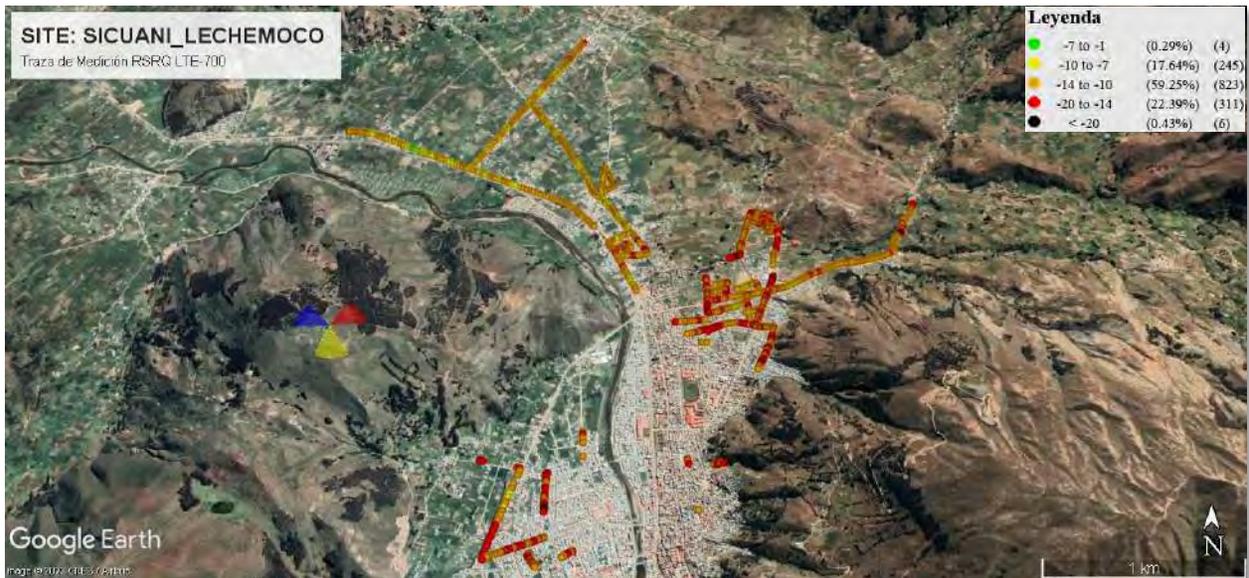
Medición RSRQ para LTE-700, eNodeB Ura Sicuani



Fuente: Nemo Handy – Google Earth

Figura 3.45

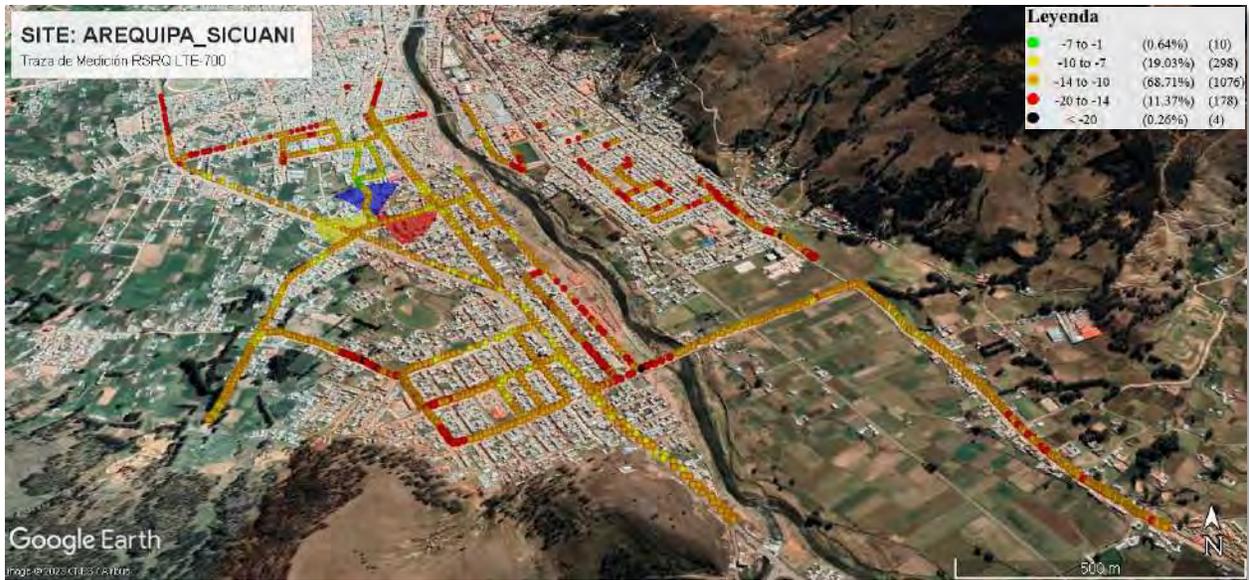
Medición RSRQ para LTE-700, eNodeB Sicuani - Lechemoco



Fuente: Nemo Handy – Google Earth

Figura 3.46

Medición RSRQ para LTE-700, eNodeB Arequipa - Sicuani



Fuente: Nemo Handy – Google Earth

Figura 3.47

Medición RSRQ para LTE-700, eNodeB Confederación – Cusco



Fuente: Nemo Handy – Google Earth

Se precisa en la tabla 3.14, las muestras de desempeño obtenidas del indicador RSRQ en la red LTE-700, asociados a su nivel de rango correspondiente y especificadas para cada eNodeB.

Tabla 3.14

Muestras por eNodeB del indicador RSRQ para la red LTE-700

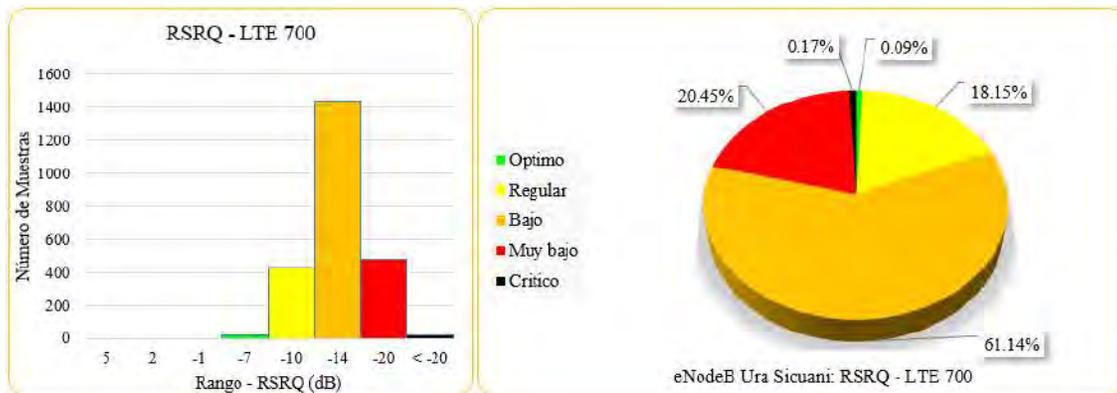
Estatus del Parámetro	Rango RSRQ (dB)	Numero de Muestras LTE 700 por eNodeB			
		Ura Sicuani	Sicuani - Lechemoco	Arequipa - Sicuani	Confederación - Cusco
Excelente	>= 5	0	0	0	0
Muy Bueno	2 to 5	0	0	0	0
Bueno	-1 to 2	0	0	0	0
Optimo	-7 to -1	2	4	10	25
Regular	-10 to -7	427	245	298	213
Bajo	-14 to -10	1438	823	1076	1045
Muy bajo	-20 to -14	481	311	178	430
Critico	< -20	4	6	4	3
Total		2352	1389	1566	1716

Fuente: Datos obtenidos de Nemo Handy (elaboración propia)

Con el número de muestras obtenidas para el indicador RSRQ del eNodeB Ura Sicuani, según la tabla 3.14 detalla, se esquematiza su resultado estadístico.

Figura 3.48

Resultado estadístico RSRQ - LTE 700, eNodeB Ura Sicuani

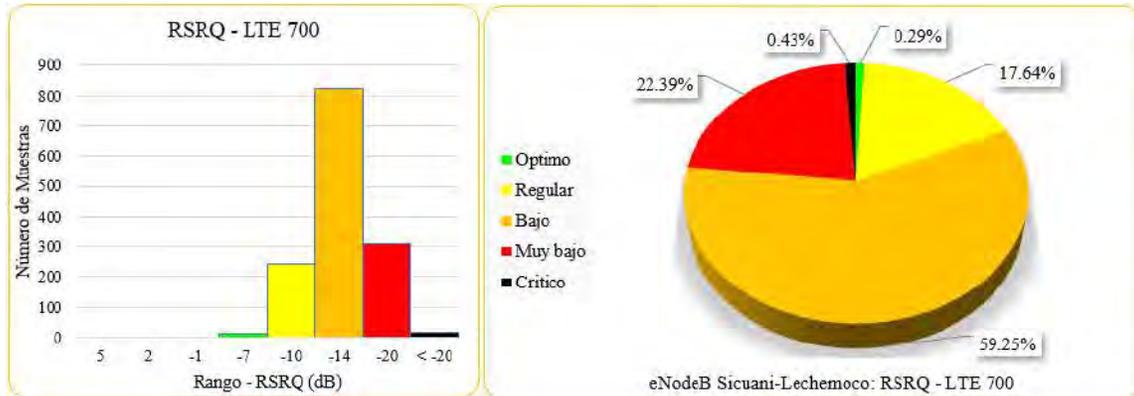


Fuente: Obtenido en base a la tabla 3.14 (elaboración propia)

Para el indicador RSRQ del eNodeB Sicuani - Lechemoco, se hará uso de los datos detallados en la tabla 3.14, para mostrar los datos estadísticos siguientes.

Figura 3.49

Resultado estadístico RSRQ - LTE 700, eNodeB Sicuani - Lechemoco

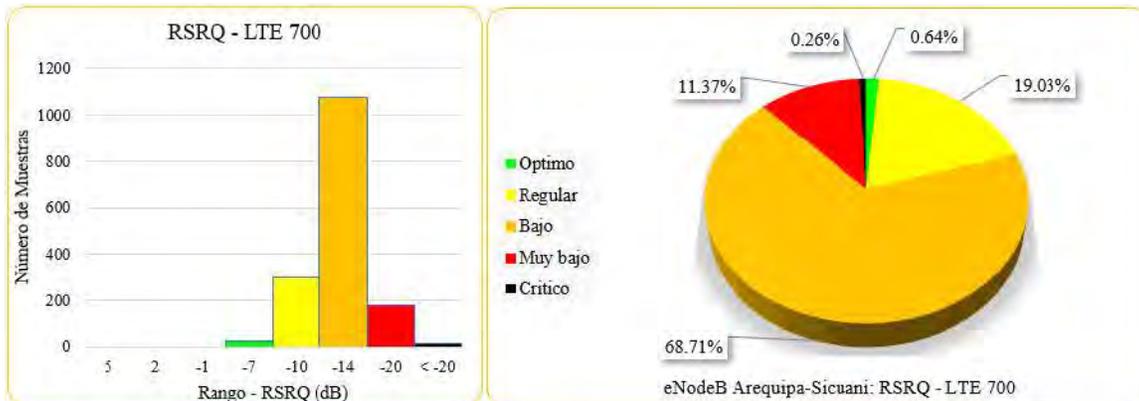


Fuente: Obtenido en base a la tabla 3.14 (elaboración propia)

Para el caso del eNodeB Arequipa - Sicuani, los resultados estadísticos del indicador RSRQ se ilustran a continuación y son basados en las especificaciones presentadas por la tabla 3.14

Figura 3.50

Resultado estadístico RSRQ - LTE 700, eNodeB Arequipa - Sicuani

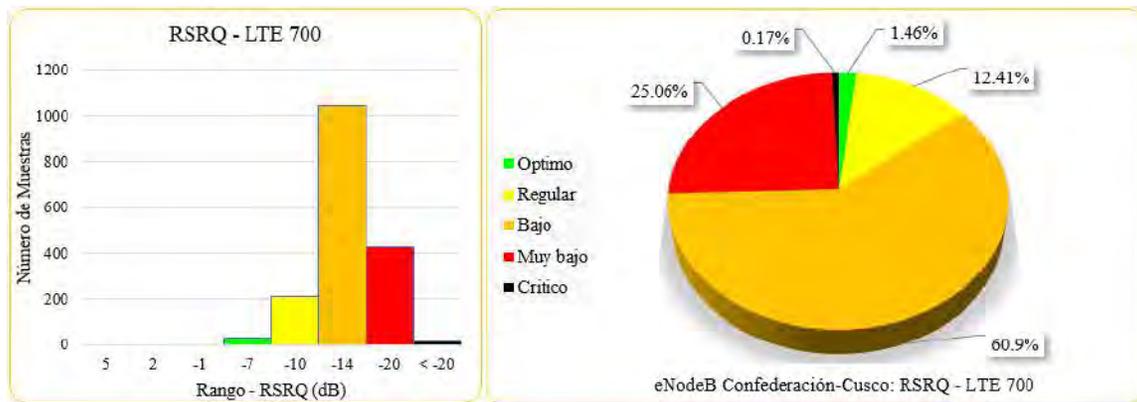


Fuente: Obtenido en base a la tabla 3.14 (elaboración propia)

Finalmente se muestra el resultado estadístico del indicador RSRQ para el eNodeB Confederación - Cusco, que se elaboró también a partir de la tabla 3.14.

Figura 3.51

Resultado estadístico RSRQ - LTE 700, eNodeB Confederación – Cusco



Fuente: Obtenido en base a la tabla 3.14 (elaboración propia)

Los resultados para el RSRQ (indicador que determina la calidad de señal recibida) de la red LTE-700. Evidencian que el nivel predominante en cada caso es el bajo ($-14 \leq \text{RSRQ} < -10$). Las muestras dentro de este rango experimentan una disminución en la calidad y el rendimiento de la señal, pero aún pueden lograr velocidades de datos y desarrollo de llamadas confiables.

Otros rangos comunes: Nivel regular ($-10 \leq \text{RSRQ} < -7$) donde se asegura una aceptable calidad de señal. El nivel muy bajo ($-20 \leq \text{RSRQ} < -14$), donde existe la posibilidad de obtener pérdidas de datos, de conexión y caídas de llamadas, a medida que este valor se acerque a -20dB .

Los resultados corroboran que se tienen zonas con poca cobertura, donde la calidad de señal esta degradada. La posición del UE dentro de la celda influye en la RSRQ cuando se está cerca del eNodeB la calidad de señal es óptima y disminuye a medida que nos alejamos, pasando al nivel regular y la calidad de señal llega a los niveles de -20 dB al estar en los bordes de la celda.

c. SINR – LTE 700

La tabla 3.15 muestra la leyenda de colores para el análisis de este indicador de desempeño, el cual expresa como se relacionan la potencia de señal (de referencia) entre la potencia no deseada (interferencias más ruido). Se muestra el color por cada nivel que se obtiene de las mediciones, el cual está acorde al criterio de aceptación del operador en estudio.

Tabla 3.15

Rangos aceptables y lista de colores para SINR

Level SINR (dB)	Estatus
 SINR ≥ 20	Excelente
 $15 \leq \text{SINR} < 20$	Muy Bueno
 $10 \leq \text{SINR} < 15$	Bueno
 $5 \leq \text{SINR} < 10$	Optimo
 $0 \leq \text{SINR} < 5$	Regular
 $-5 \leq \text{SINR} < 0$	Bajo
 $-10 \leq \text{SINR} < -5$	Muy Bajo
 SINR < -10	Critico

Fuente: Adaptada a escala SINR (Barrantes & Saenz, 2019)

A través de las figuras 3.52, 3.53, 3.54 y 3.55 se muestra el desempeño de los niveles para el indicador SINR en la ruta recorrida del *Drive Test* de la red LTE-700, asociándose las muestras obtenidas a la leyenda de colores descrita en la tabla 3.15. Categorizando de esta manera la relación: señal (de referencia) / (interferencias más ruido), para cada uno de los casos, en cada estación base (eNodeB) ubicado en el área geográfica de estudio.

Figura 3.52

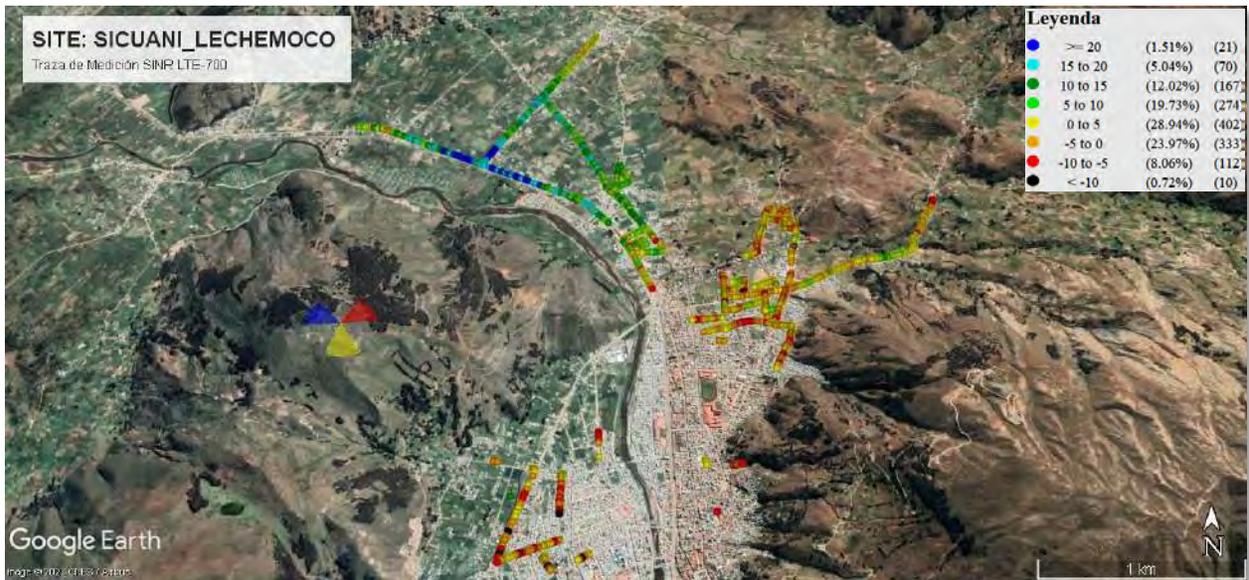
Medición SINR para LTE-700, eNodeB Ura Sicuani



Fuente: Nemo Handy – Google Earth

Figura 3.53

Medición SINR para LTE-700, eNodeB Sicuani – Lechemoco



Fuente: Nemo Handy – Google Earth

Figura 3.54

Medición SINR para LTE-700, eNodeB Arequipa – Sicuani



Fuente: Nemo Handy – Google Earth

Figura 3.55

Medición SINR para LTE-700, eNodeB Confederación – Cusco



Fuente: Nemo Handy – Google Earth

A partir de las muestras del indicador SINR de la red LTE-700, se elaboró la tabla 3.16, detallándose las muestras obtenidas por cada eNodeB. asociándolo a su nivel de rango respectivo.

Tabla 3.16

Muestras por eNodeB del indicador SINR para la red LTE-700

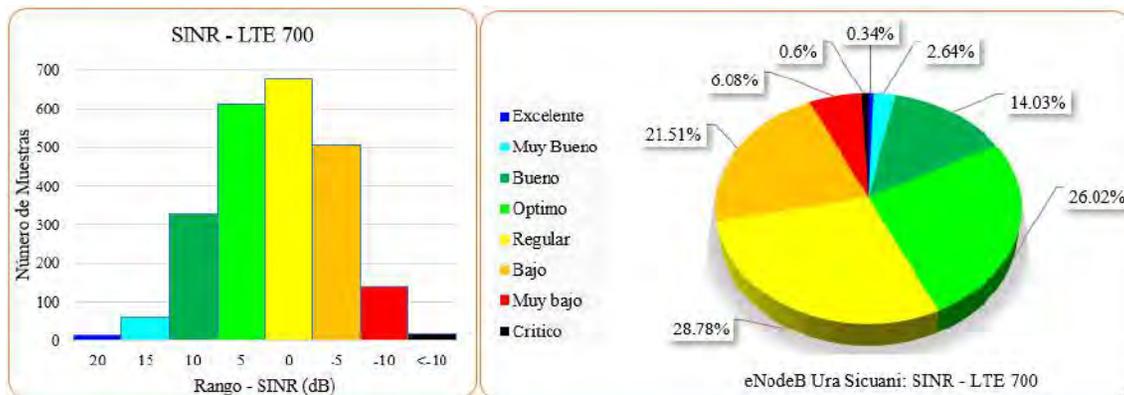
Estatus del Parámetro	Rango SINR (dB)	Numero de Muestras LTE 700 por eNodeB			
		Ura Sicuani	Sicuani - Lechemoco	Arequipa - Sicuani	Confederación - Cusco
Excelente	≥ 20	8	21	4	17
Muy Bueno	15 to 20	62	70	82	53
Bueno	10 to 15	330	167	241	141
Optimo	5 to 10	612	274	360	351
Regular	0 to 5	677	402	446	513
Bajo	-5 to 0	506	333	301	493
Muy bajo	-10 to -5	143	112	114	130
Critico	< -10	14	10	18	18
Total		2352	1389	1566	1716

Fuente: Datos obtenidos de Nemo Handy (elaboración propia)

Las cifras estadísticas del indicador SINR, son determinadas a partir de la información de la tabla 3.16 de la red LTE-700, en el eNodeB Ura Sicuani.

Figura 3.56

Resultado estadístico SINR - LTE 700, eNodeB Ura Sicuani

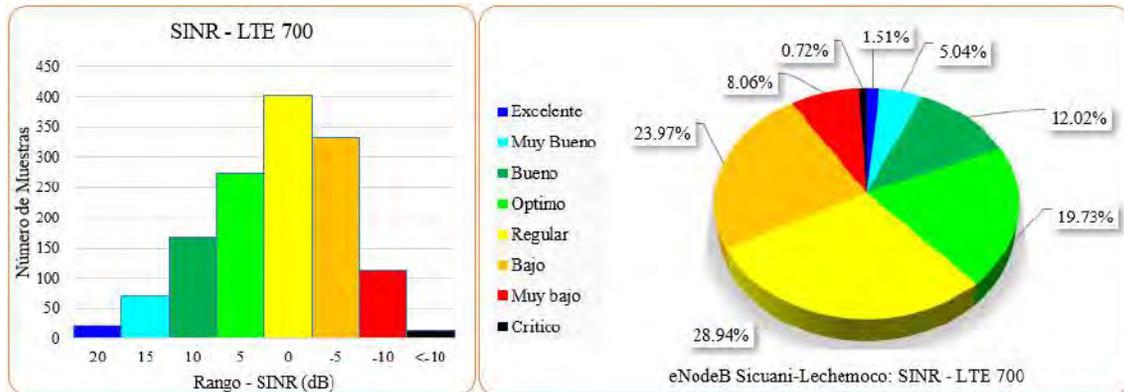


Fuente: Obtenido en base a la tabla 3.16 (elaboración propia)

La representación estadística para el indicador SINR de la red LTE-700 del eNodeB Sicuani-Lechemoco, es concebida a partir de las cifras que detalla tabla 3.16.

Figura 3.57

Resultado estadístico SINR - LTE 700, eNodeB Sicuani – Lechemoco

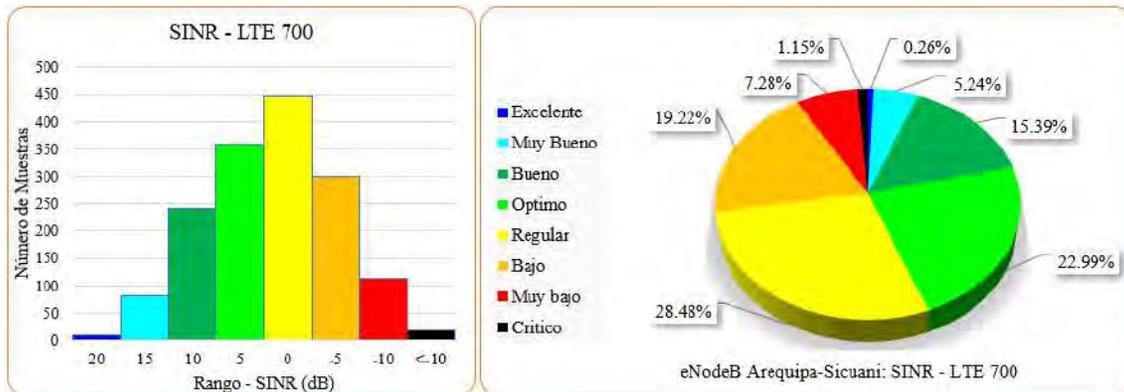


Fuente: Obtenido en base a la tabla 3.16 (elaboración propia)

Para las muestras obtenidas del indicador SINR de la red LTE-700 del eNodeB Arequipa-Sicuani detalladas en la tabla 3.16, se hace la siguiente representación estadística.

Figura 3.58

Resultado estadístico SINR - LTE 700, eNodeB Arequipa – Sicuani

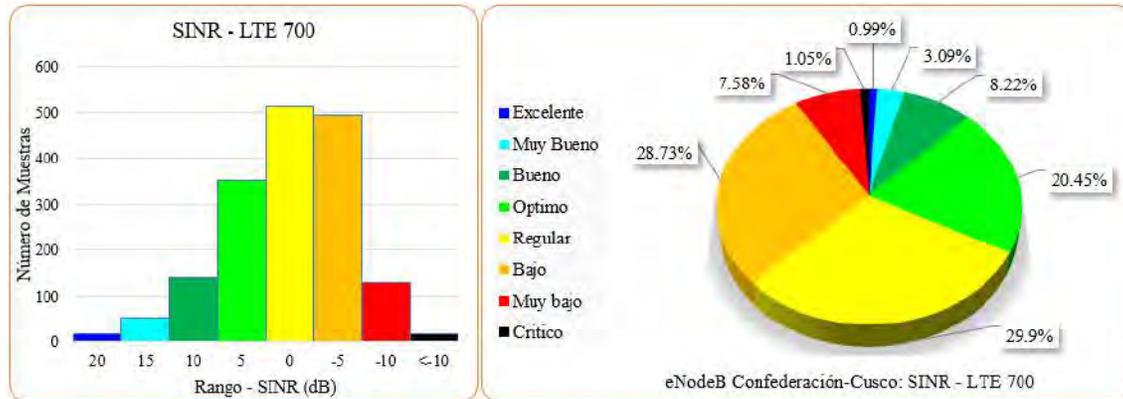


Fuente: Obtenido en base a la tabla 3.16 (elaboración propia)

Por último, para el caso del eNodeB Confederación-Cusco, las muestras obtenidas para el indicador SINR, son representados estadísticamente a partir de la tabla 3.16.

Figura 3.59

Resultado estadístico SINR - LTE 700, eNodeB Confederación – Cusco



Fuente: Obtenido en base a la tabla 3.16 (elaboración propia)

De los resultados para SINR de la red LTE-700, se tiene que los niveles predominantes son: El regular ($0 \leq \text{SINR} < 5$), donde el nivel de interferencia y ruido se considera regularmente aceptable a la potencia transmitida. El nivel bajo ($-5 \leq \text{SINR} < 0$), donde la potencia transmitida presenta mayor ruido e interferencia. Nivel muy bajo ($-10 \leq \text{SINR} < -5$) aquí los valores de señal no son aceptables a causa de la interferencia y ruido. Todo ello origina problemas en la red LTE.

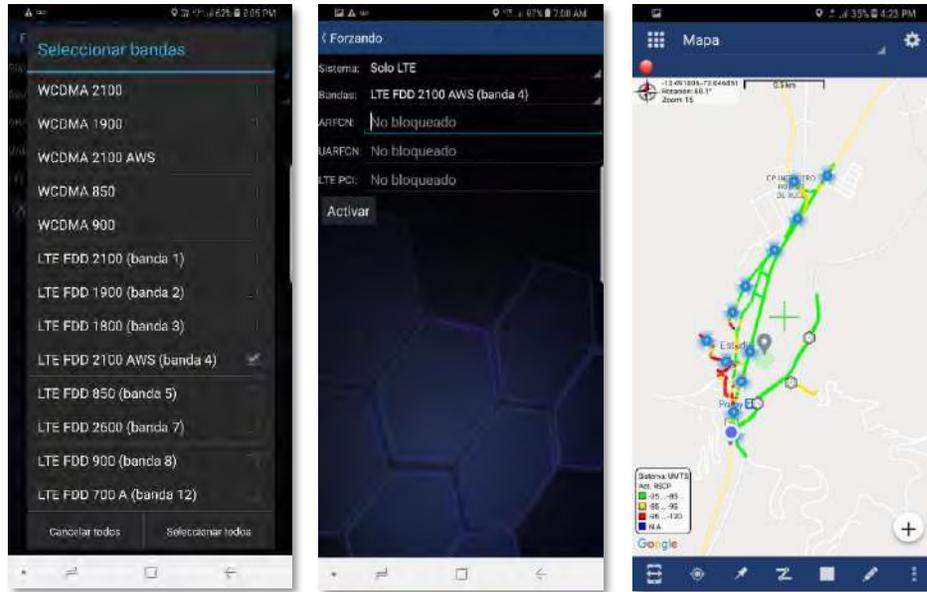
También niveles comunes son el bueno ($10 \leq \text{SINR} < 15$) y optimo ($5 \leq \text{SINR} < 10$), donde en general se puede mencionar que la señal posee niveles aceptables de ruido, interferencia y una buena cobertura para el desarrollo de voz y datos. Cómo se observan en los mapas de medición.

3.2.2 Reporte de medición de los indicadores para la red LTE-AWS

Para este caso, seleccionamos en el UE la opción LTE FDD 2100 AWS (banda 4) como muestra la figura 3.60, con la finalidad de obtener los resultados únicamente en esta tecnología.

Figura 3.60

Selección de LTE FDD 2100 AWS (banda 4) en Nemo Handy



Fuente: Obtenido de Nemo Handy

3.2.2.1 Resultados generales de medición de la red LTE-AWS

Los datos obtenidos de desempeño para los indicadores en la red LTE-AWS banda 4, fueron procesados y se obtuvieron un total de 7035 muestras. Para el análisis estadístico se tomará el total de dichas muestras. La tabla 3.17 expone el resultado obtenidas por cada eNodeB.

Tabla 3.17

Muestras detectadas por Nemo Handy por eNodeB, para LTE-AWS

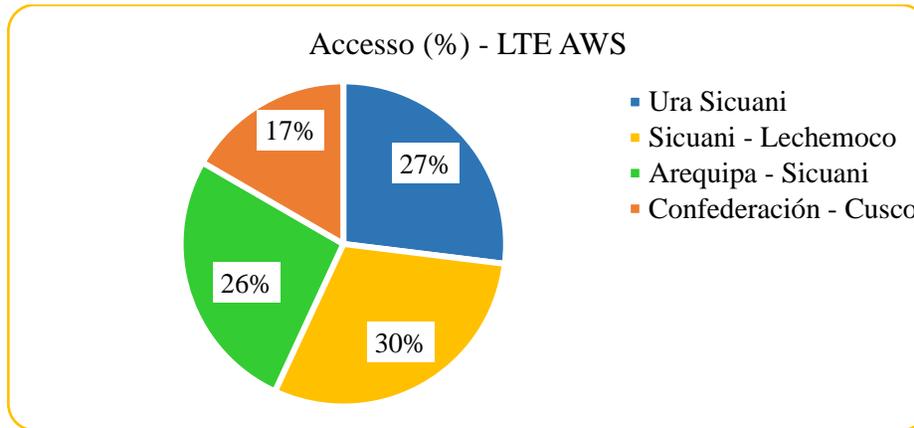
Site Name	Código Único Estación	Numero de Muestras	Acceso (%) LTE-AWS
Ura Sicuani	CU230	1896	27%
Sicuani - Lechemoco	CU014	2108	30%
Arequipa - Sicuani	CU568	1860	26%
Confederación - Cusco	CU556	1171	17%
	Total	7035	100%

Fuente: Propia - Datos Obtenidos de Nemo Handy

La cuantía de muestras en cada eNodeB para LTE-AWS, es detallada por la figura 3.61.

Figura 3.61

Porcentaje de acceso por eNodeB para LTE-AWS



Fuente: Propia – Obtenida en base a la tabla 3.17

Las muestras que detecto *Nemo Handy* por sector en cada eNodeB son detalladas en la:

Tabla 3.18

Número de muestras por sector de cada eNodeB, para LTE-AWS

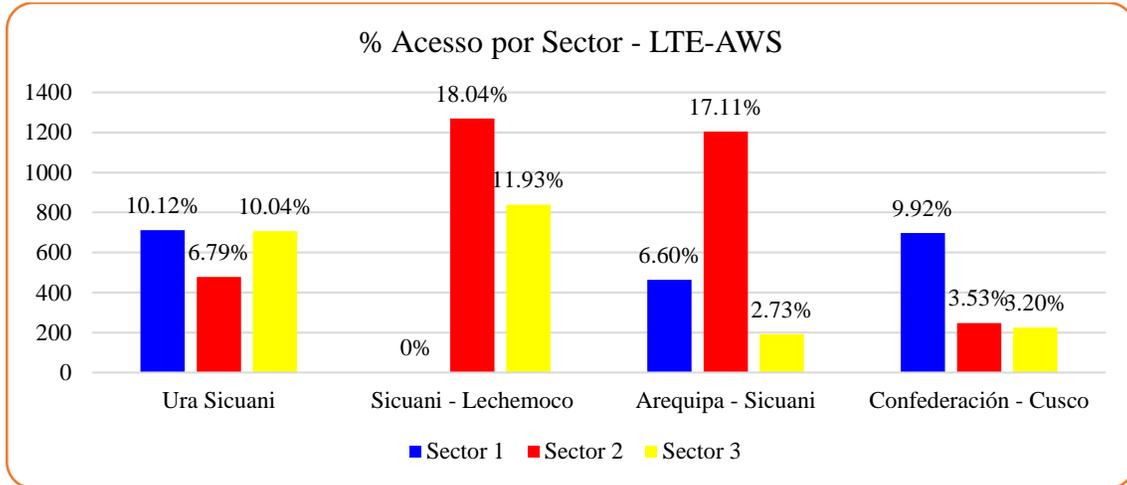
eNodeB	Sector	E-UTRAN Cell ID	#Muestras	Porcentaje %
Ura Sicuani	1	47162881	712	10.12%
	2	47162882	478	6.79%
	3	47162883	706	10.04%
Sicuani - Lechemoco	1	123907585	0	0%
	2	123907586	1269	18.04%
	3	123907587	839	11.93%
Arequipa - Sicuani	1	47249409	464	6.60%
	2	47249410	1204	17.11%
	3	47249411	192	2.73%
Confederación - Cusco	1	47246337	698	9.92%
	2	47246338	248	3.53%
	3	47246339	225	3.20%
Total			7035	100%

Fuente: Propia – Datos obtenidos de Nemo Handy

Los porcentajes de conectividad en cada sector por eNodeB, los ilustra la figura 3.62.

Figura 3.62

Acceso de conectividad por sector en cada eNodeB para LTE-AWS



Fuente: Obtenido en base a la tabla 27 (Elaboración propia)

3.2.2.2 Resultados de indicadores de desempeño para LTE-AWS

En el apartado presente, se puntualizan resultados obtenidos de tres indicadores de desempeño RSRP, RSRQ y SINR. Tomando en consideración el total de 7035 muestras del recorrido *Drive Test* llevado a cabo para la red móvil LTE-AWS banda 4, ciudad Sicuani.

a. RSRP – LTE AWS

Para analizar el desempeño de este indicador se hará uso de la tabla 3.11 (niveles de potencia y lista de colores para RSRP).

En las figuras 3.63, 3.64, 3.65 y 3.66, denotan la ruta recorrida del *Drive Test* para la red móvil LTE-AWS donde se pone en manifiesto el desempeño del indicador RSRP, cada caso muestra el nivel de cobertura de cada eNodeB asociado a su leyenda de colores según la tabla 3.11.

Figura 3.63

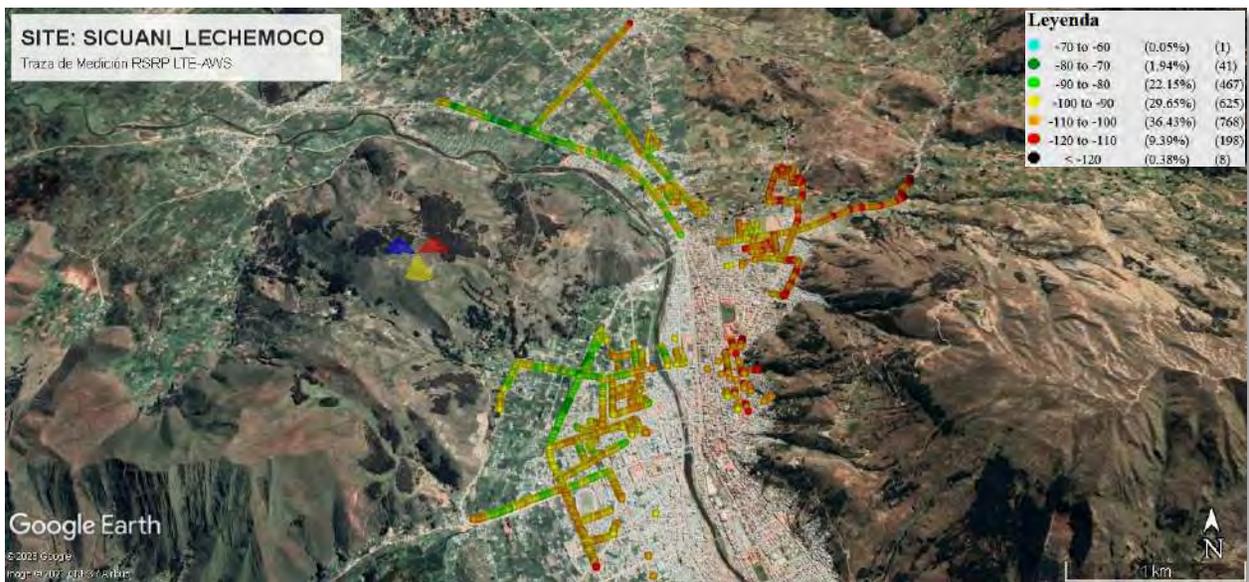
Medición RSRP para LTE-AWS, eNodeB Ura Sicuani



Fuente: Nemo Handy – Google Earth

Figura 3.64

Medición RSRP para LTE-AWS, eNodeB Sicuani – Lechemoco



Fuente: Nemo Handy – Google Earth

Figura 3.65

Medición RSRP para LTE-AWS, eNodeB Arequipa – Sicuani



Fuente: Nemo Handy – Google Earth

Figura 3.66

Medición RSRP para LTE-AWS, eNodeB Confederación – Cusco



Fuente: Nemo Handy – Google Earth

La tabla 3.19 puntualiza las muestras detectadas por *Nemo Handy* en cada eNodeB del indicador de cobertura RSRP para la red LTE-AWS, asociado a su nivel de rango correspondiente.

Tabla 3.19

Muestras por eNodeB del indicador RSRP para la red LTE-AWS

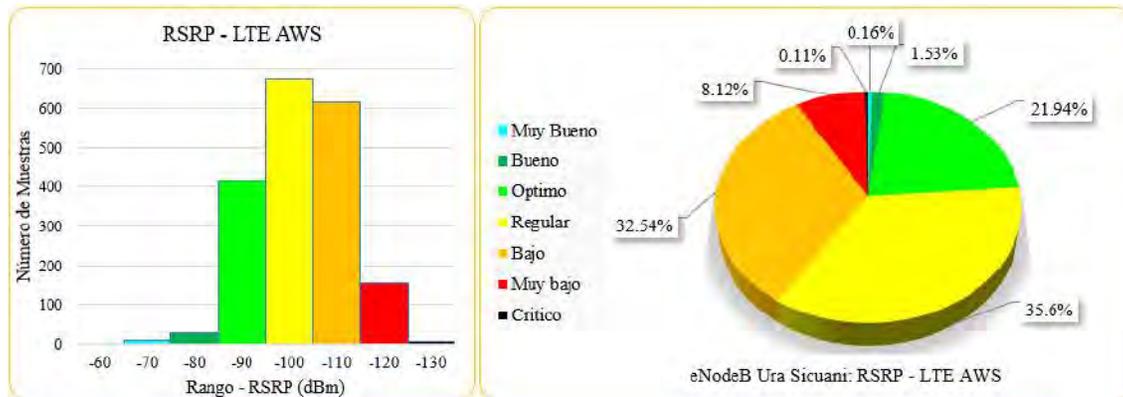
Estatus del Parámetro	Rango RSRP (dBm)	Numero de Muestras LTE-AWS por eNodeB			
		Ura Sicuani	Sicuani - Lechemoco	Arequipa - Sicuani	Confederación - Cusco
Excelente	≥ -60	0	0	0	0
Muy Bueno	-70 to -60	3	1	1	0
Bueno	-80 to -70	29	41	36	53
Optimo	-90 to -80	416	467	390	253
Regular	-100 to -90	675	625	558	354
Bajo	-110 to -100	617	768	689	382
Muy bajo	-120 to -110	154	198	184	126
Critico	< -120	2	8	2	3
Total		1896	2108	1860	1171

Fuente: Propia - Datos obtenidos de Nemo Handy

En concordancia a la información de la tabla 3.19, se especifica el resultado estadístico para el indicador de cobertura RSRP de la red LTE-AWS para el eNodeB Ura Sicuani.

Figura 3.67

Resultado estadístico RSRP - LTE AWS, eNodeB Ura Sicuani

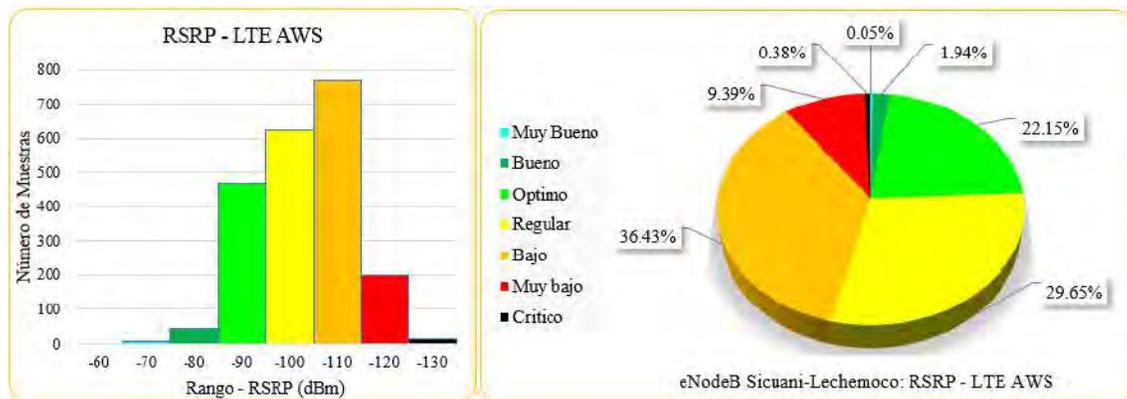


Fuente: Obtenido en base a la tabla 3.19 (elaboración propia)

En conformidad al reporte de la tabla 3.19, se representa los porcentajes actuales de las muestras obtenidas del indicador RSRP para LTE-AWS del eNodeB Sicuani-Lechemoco.

Figura 3.68

Resultado estadístico RSRP - LTE AWS, eNodeB Sicuani – Lechemoco

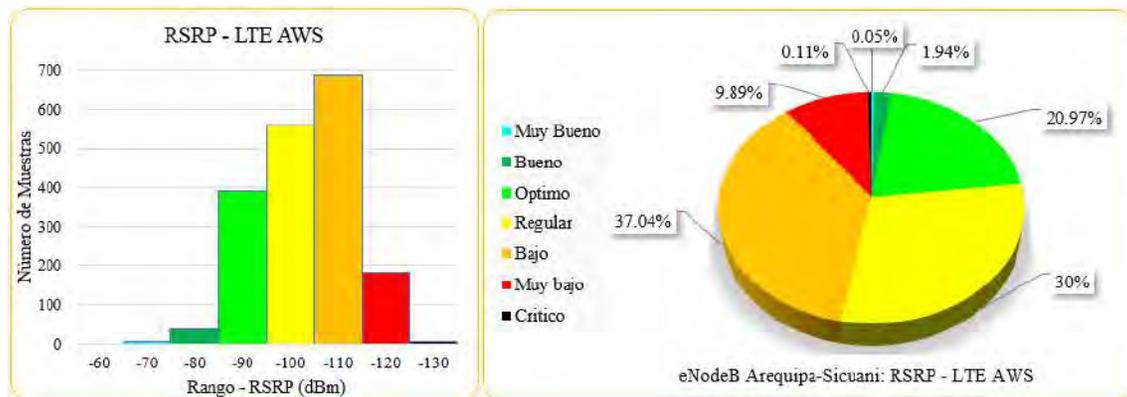


Fuente: Obtenido en base a la tabla 3.19 (elaboración propia)

Para el eNodeB Arequipa-Sicuani, la gráfica de los resultados estadísticos del desempeño del indicador RSRP de cobertura para la red móvil LTE-AWS, es presentado según la tabla 3.19.

Figura 3.69

Resultado estadístico RSRP - LTE AWS, eNodeB Arequipa – Sicuani

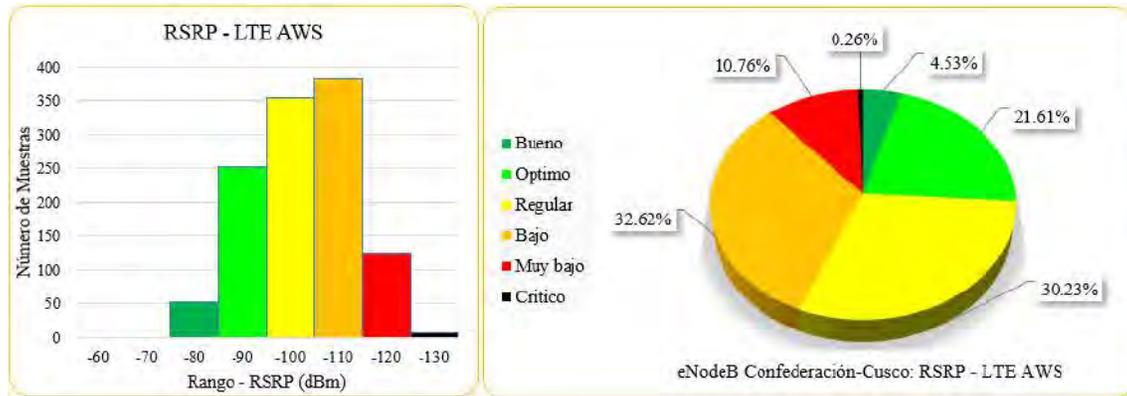


Fuente: Obtenido en base a la tabla 3.19 (elaboración propia)

Por último, para el eNodeB Confederación-Cusco la ilustración estadística de las muestras es elaborada en conformidad de la tabla 3.19, ello para indicador de cobertura RSRP en LTE-AWS

Figura 3.70

Resultado estadístico RSRP - LTE AWS, eNodeB Confederación – Cusco



Fuente: Obtenido en base a la tabla 3.19 (elaboración propia)

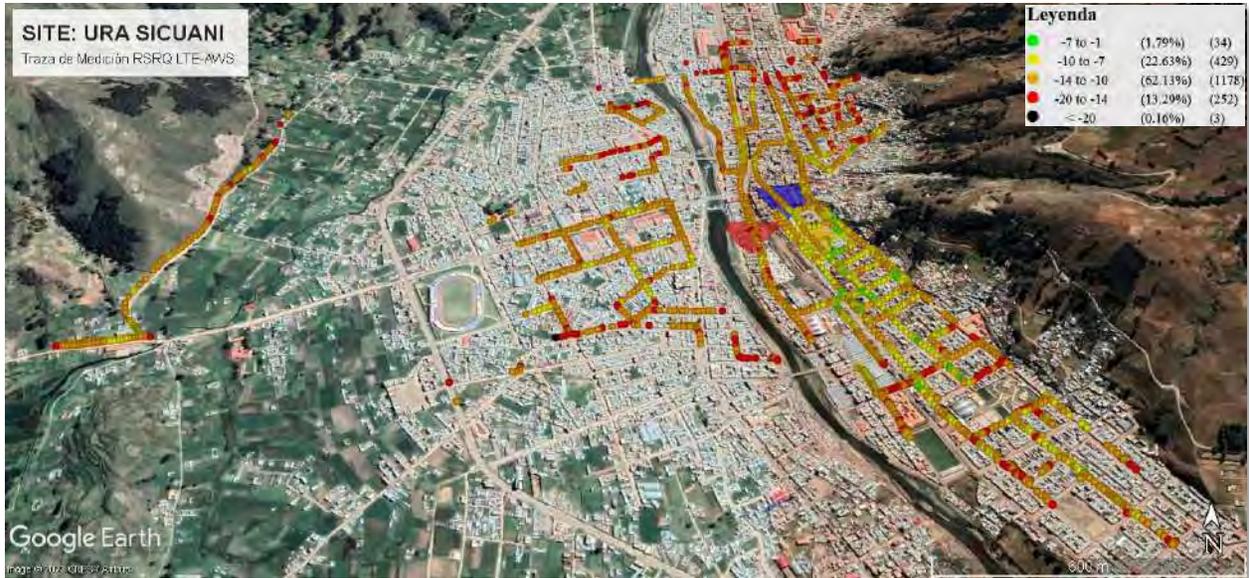
El desempeño del indicador de cobertura RSRP en LTE-AWS da como resultado que predominan los niveles bajo ($-110 \leq \text{RSRP} < -100$) y regular ($-100 \leq \text{RSRP} < -90$), donde se tiene inestabilidad para la intensidad de la señal y se agrava aún más a medida que el valor se acerque a -110 dBm, donde se presentarían problemas de conexión y no se garantizaría el servicio priorizado como VoLTE, generando mayor cantidad de pérdida de datos y *drop-outs*. Otro rango común es el nivel óptimo ($-90 \leq \text{RSRP} < -80$) aquí los niveles de cobertura mejoran y con ello el servicio de voz y datos; los resultados dan cuenta que se tienen problemas en la calidad de cobertura de la red.

b. RSRQ – LTE AWS

Se hará uso de la tabla 3.13 (niveles de calidad y lista de colores para RSRQ). Los niveles de RSRQ de la red LTE-AWS, son presentados en las figuras 3.71, 3.72, 3.73 y 3.74, por cada eNodeB se muestra el nivel de calidad de señal que se recibe asociado a su leyenda de colores.

Figura 3.71

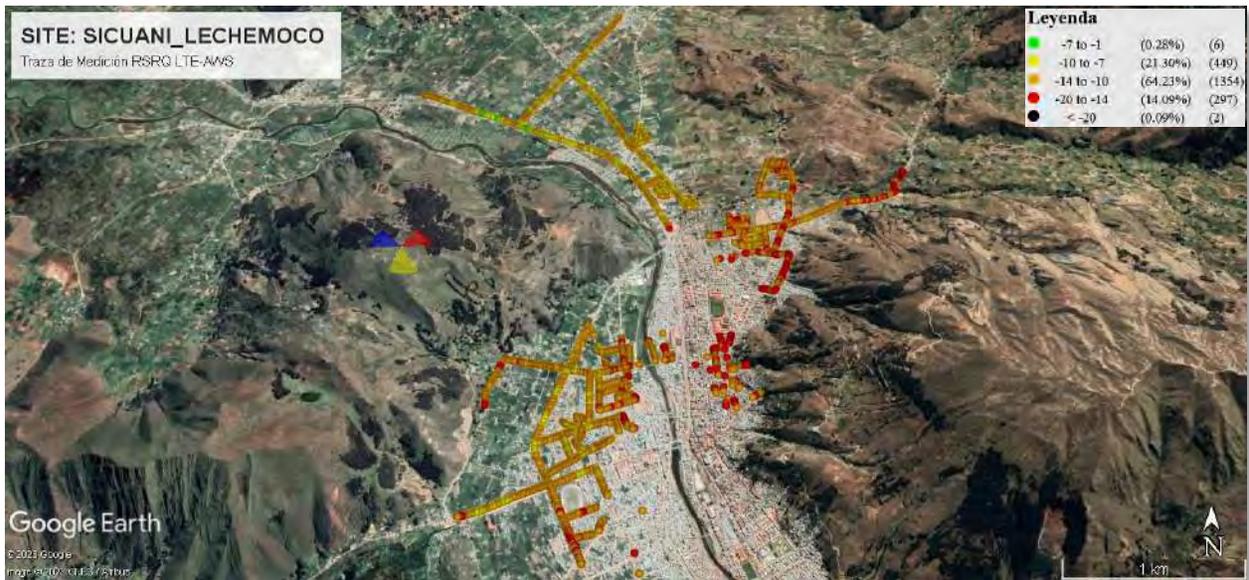
Medición RSRQ para LTE-AWS, eNodeB Ura Sicuani



Fuente: Nemo Handy – Google Earth

Figura 3.72

Medición RSRQ para LTE-AWS, eNodeB Sicuani – Lechemoco



Fuente: Nemo Handy – Google Earth

Figura 3.73

Medición RSRQ para LTE-AWS, eNodeB Arequipa – Sicuani



Fuente: Nemo Handy – Google Earth

Figura 3.74

Medición RSRQ para LTE-AWS, eNodeB Confederación – Cusco



Fuente: Nemo Handy – Google Earth

Las muestras detectadas del indicador de calidad RSRQ por *Nemo Handy* en cada eNodeB de la red LTE-AWS, son presentados en la tabla 3.20, asociado a su nivel de rango correspondiente.

Tabla 3.20

Muestras por eNodeB del indicador RSRQ para la red LTE-AWS

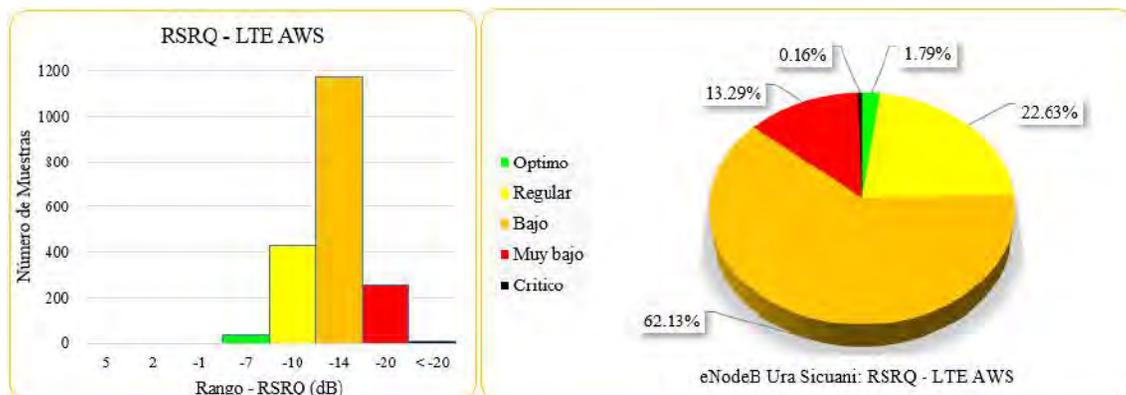
Estatus del Parámetro	Rango RSRQ (dB)	Numero de Muestras LTE-AWS por eNodeB			
		Ura Sicuani	Sicuani - Lechemoco	Arequipa - Sicuani	Confederación - Cusco
Excelente	≥ 5	0	0	0	0
Muy Bueno	2 to 5	0	0	0	0
Bueno	-1 to 2	0	0	0	0
Optimo	-7 to -1	34	6	22	39
Regular	-10 to -7	429	449	453	312
Bajo	-14 to -10	1178	1354	1217	632
Muy bajo	-20 to -14	252	297	168	186
Critico	< -20	3	2	0	2
Total		1896	2108	1860	1171

Fuente: Datos obtenidos de Nemo Handy (elaboración propia)

Para el eNodeB Ura Sicuani, se hace la siguiente representación gráfica de los resultados estadísticos actuales del indicador RSRQ, concebida a partir de las cifras que detalla la tabla 3.20.

Figura 3.75

Resultado estadístico RSRQ - LTE AWS, eNodeB Ura Sicuani

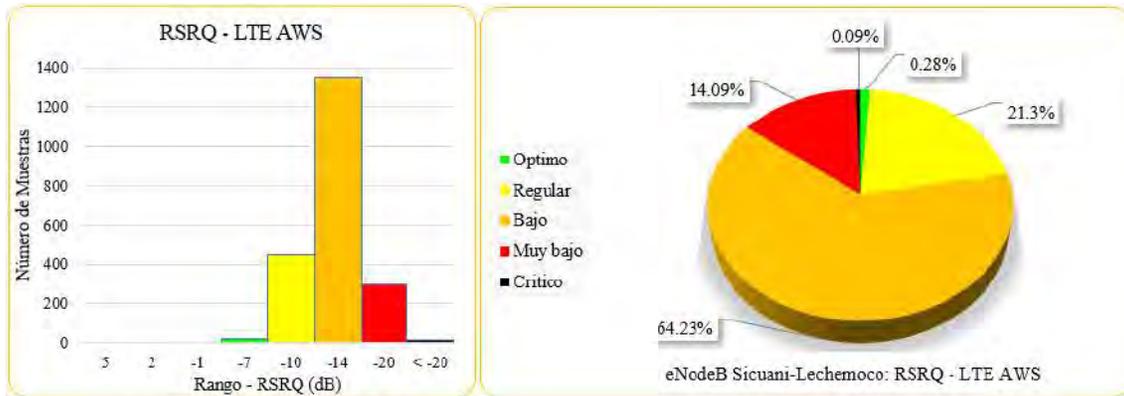


Fuente: Obtenido en base a la tabla 3.20 (elaboración propia)

En el caso del eNodeB Sicuani-Lechemoco, sus resultados estadísticos para las muestras obtenidas del indicador RSRQ, es ilustrada en función de las cifras mostradas en la tabla 3.20.

Figura 3.76

Resultado estadístico RSRQ - LTE AWS, eNodeB Sicuani – Lechemoco

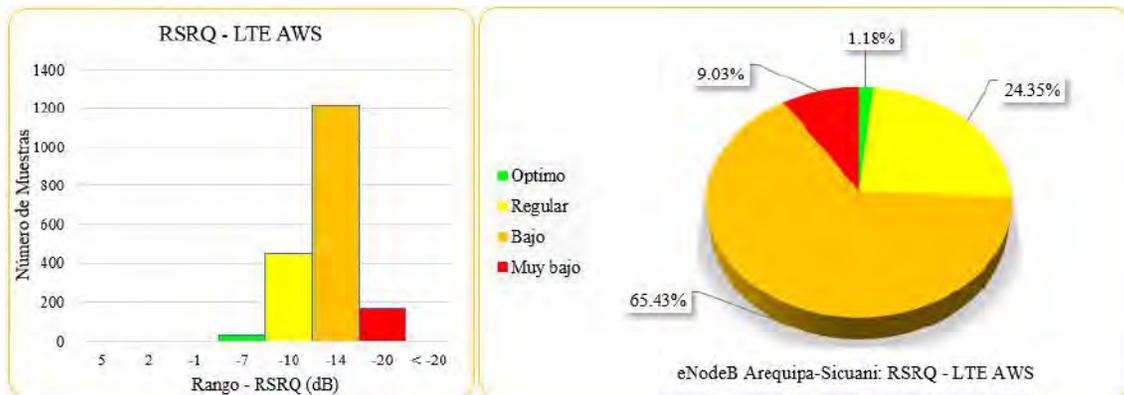


Fuente: Obtenido en base a la tabla 3.20 (elaboración propia)

Los porcentajes actuales para las muestras del indicador RSRQ del eNodeB Arequipa-Sicuani, son representados gráficamente a través de la información detallada por la tabla 3.20.

Figura 3.77

Resultado estadístico RSRQ - LTE AWS, eNodeB Arequipa – Sicuani

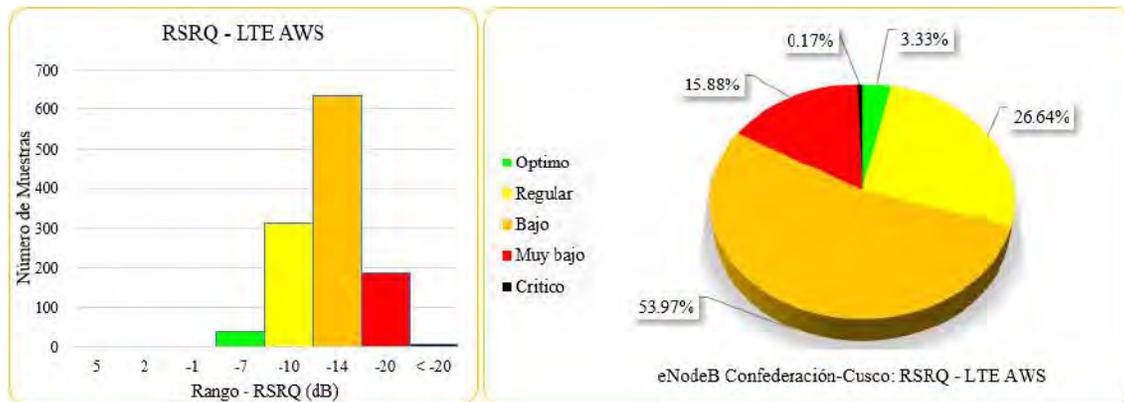


Fuente: Obtenido en base a la tabla 3.20 (elaboración propia)

De manera similar a los casos anteriores la información de la tabla 3.20, es usada para la representación estadística de las muestras del indicador RSRQ del eNodeB Confederación-Cusco.

Figura 3.78

Resultado estadístico RSRQ - LTE AWS, eNodeB Confederación – Cusco



Fuente: Obtenido en base a la tabla 3.20 (elaboración propia)

Los rangos que priman conforme al rendimiento del indicador RSRQ para LTE-AWS, son: Nivel bajo ($-14 \leq \text{RSRQ} < -10$) donde se tienen una disminución de la calidad y rendimiento de la señal; nivel muy bajo ($-20 \leq \text{RSRQ} < -14$) aquí la calidad de señal que recibe el UE es inestable y puede llegar a causar pérdidas de datos, señal y caída de llamadas; nivel regular ($-10 \leq \text{RSRQ} < -7$) donde es posible tener una aceptable calidad de señal. De lo expuesto se evidencia que la red LTE-AWS presenta deficiencias en cuanto a la calidad de señal a efecto de zonas con poca cobertura.

c. SINR – LTE AWS

Se hará uso de la tabla 3.15 (Rangos aceptables y lista de colores para SINR). Las figuras 3.79, 3.80, 3.81 y 3.82 muestran el desempeño del indicador SINR en la ruta recorrida del *Drive Test* de la red LTE-AWS, donde cada muestra obtenida es asociada a la leyenda de colores.

Figura 3.79

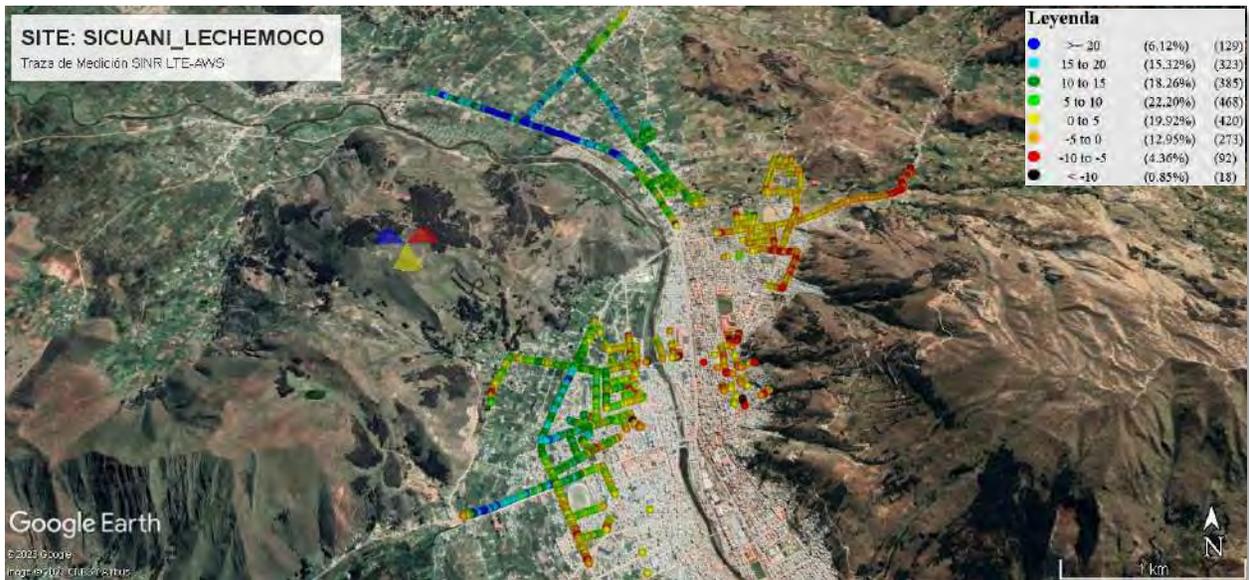
Medición SINR para LTE-AWS, eNodeB Ura Sicuani



Fuente: Nemo Handy – Google Earth

Figura 3.80

Medición SINR para LTE-AWS, eNodeB Sicuani – Lechemoco



Fuente: Nemo Handy – Google Earth

Figura 3.81

Medición SINR para LTE-AWS, eNodeB Arequipa – Sicuani



Fuente: Nemo Handy – Google Earth

Figura 3.82

Medición SINR para LTE-AWS, eNodeB Confederación – Cusco



Fuente: Nemo Handy – Google Earth

El comportamiento del indicador SINR valores detectados por *Nemo Handy* en los eNodeB de la red LTE-AWS, son presentados en la tabla 3.21, asociándolos a su nivel de rango respectivo.

Tabla 3.21

Muestras por eNodeB del indicador SINR para la red LTE-AWS

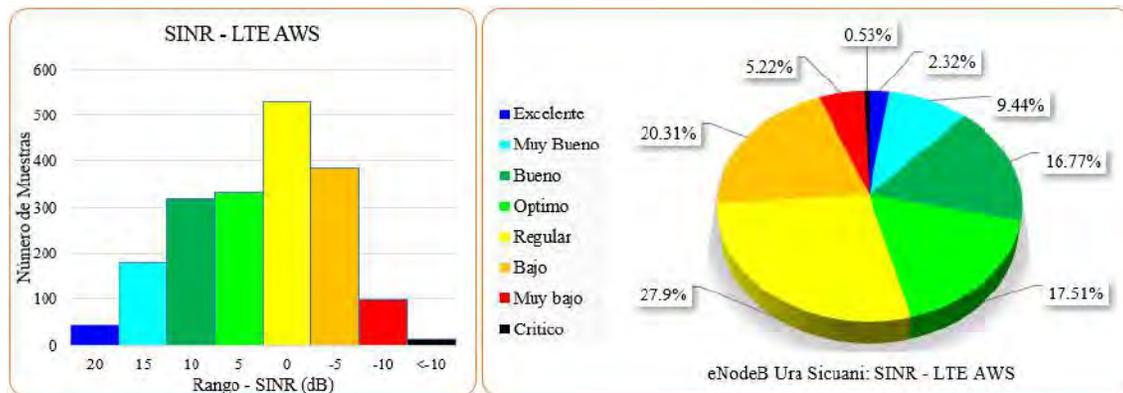
Estatus del Parámetro	Rango SINR (dB)	Numero de Muestras LTE-AWS por eNodeB			
		Ura Sicuani	Sicuani - Lechemoco	Arequipa - Sicuani	Confederación - Cusco
Excelente	≥ 20	44	129	58	23
Muy Bueno	15 to 20	179	323	196	96
Bueno	10 to 15	318	385	397	170
Optimo	5 to 10	332	468	441	251
Regular	0 to 5	529	420	431	387
Bajo	-5 to 0	385	273	278	190
Muy bajo	-10 to -5	99	92	55	49
Critico	< -10	10	18	4	5
Total		1896	2108	1860	1171

Fuente: Datos obtenidos de Nemo Handy (elaboración propia)

La ilustración estadística del desempeño para el indicador SINR en LTE-AWS, para el eNodeB Ura Sicuani, es elaborada con las cifras detalladas por la tabla 3.21.

Figura 3.83

Resultado estadístico SINR - LTE AWS, eNodeB Ura Sicuani

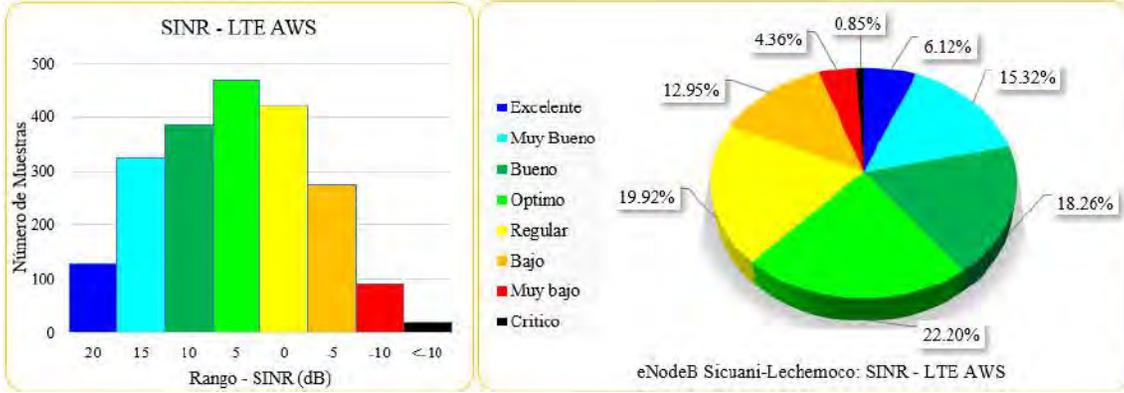


Fuente: Obtenido en base a la tabla 3.21 (elaboración propia)

Ilustración estadística para el indicador SINR, eNodeB Sicuani-Lechemoco, LTE-AWS.

Figura 3.84

Resultado estadístico SINR - LTE AWS, eNodeB Sicuani – Lechemoco

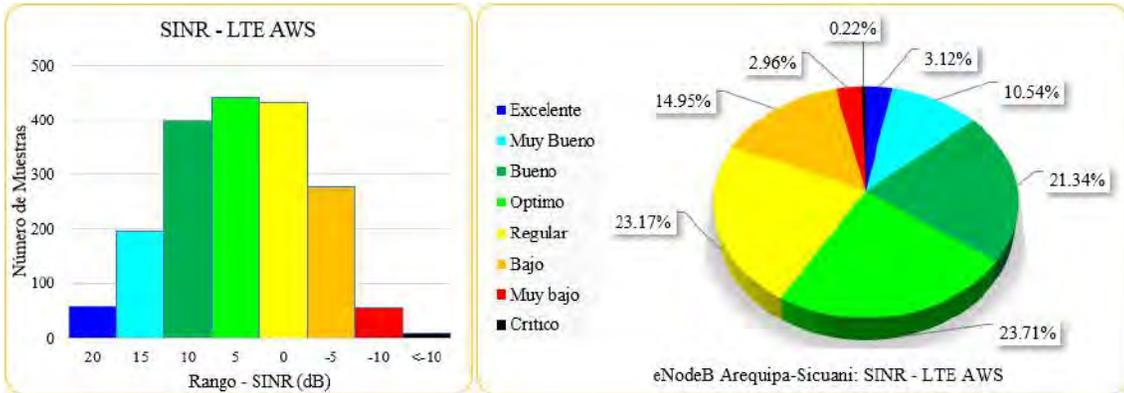


Fuente: Obtenido en base a la tabla 3.21 (elaboración propia)

Representación estadística para el indicador SINR, eNodeB Arequipa-Sicuani, LTE-AWS.

Figura 3.85

Resultado estadístico SINR - LTE AWS, eNodeB Arequipa – Sicuani

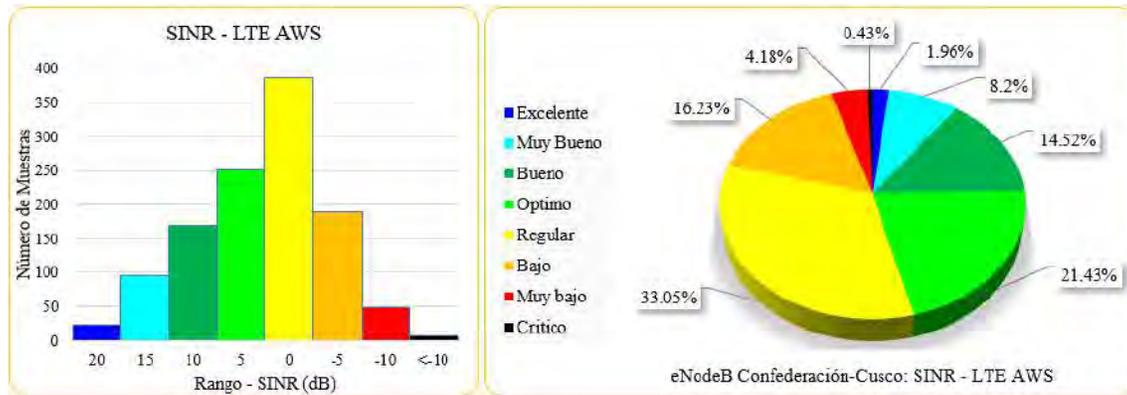


Fuente: Obtenido en base a la tabla 3.21 (elaboración propia)

Y por último también con los datos de la tabla 3.21, se representa gráficamente el resultado del comportamiento del indicador SINR para eNodeB Confederación-Cusco.

Figura 3.86

Resultado estadístico SINR - LTE AWS para eNodeB Confederación – Cusco



Fuente: Obtenido en base a la tabla 3.21 (elaboración propia)

Como muestran los mapas de medición y los resultados estadísticos, los rangos que priman para SINR de la red LTE-AWS son: Nivel regular ($0 \leq \text{SINR} < 5$), aquí se puede considerar que el nivel de interferencia y ruido es regularmente aceptable a la potencia transmitida. El nivel bajo ($-5 \leq \text{SINR} < 0$), donde la potencia transmitida presenta mayor ruido e interferencia y con una menor cantidad de muestras se tiene el nivel muy bajo ($-10 \leq \text{SINR} < -5$) donde los valores de señal no son aceptables a causa de la interferencia y ruido. Lo descrito origina problemas en la red LTE.

Otros niveles comunes son el muy bueno ($15 \leq \text{SINR} < 20$), bueno ($10 \leq \text{SINR} < 15$) y optimo ($5 \leq \text{SINR} < 10$), donde en general la señal posee niveles aceptables de ruido, interferencia y una buena cobertura para el desarrollo de las comunicaciones de voz y datos.

Es evidente que existen deficiencias que afectan la calidad de servicio luego del análisis del rendimiento de los indicadores (RSRP, RSRQ y SINR) para las redes LTE-700 y LTE-AWS que integran la red LTE-Advanced, las alternativas de solución que se plantean son: La optimización de la red y un aumento del número de eNodeBs para mejorar la cobertura y calidad de los servicios y cubrir las necesidades de comunicaciones de voz y datos, en la ciudad de Sicuani.

CAPÍTULO IV: DIMENSIONAMIENTO DE LA RED

En este apartado se calcula el mínimo número de eNodeBs necesarios para suplir las deficiencias mencionadas en el capítulo anterior, debido a que se requieren más celdas que ayuden a mejorar la calidad y la cobertura de la red LTE-Advanced.

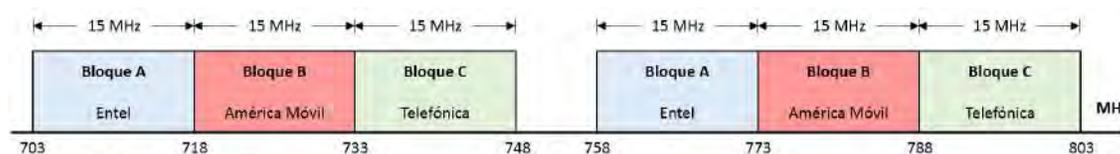
4.1 Descripción de las Bandas de Frecuencia

1. Banda de 700 MHz

Esta banda se origina a raíz del dividendo digital, que conllevó al traslado de algunos canales de televisión analógica a otras bandas del espectro designadas para la televisión digital. Esta banda fue licitada por un lapso de 20 años en mayo de 2016 y actualmente las empresas operadoras concesionadas la utilizan para prestar servicios de internet móvil a través de la tecnología LTE y sus evoluciones (More & Argandoña, 2019).

Figura 4.1

Banda 700 MHz



Fuente: Obtenido de (More & Argandoña, 2019)

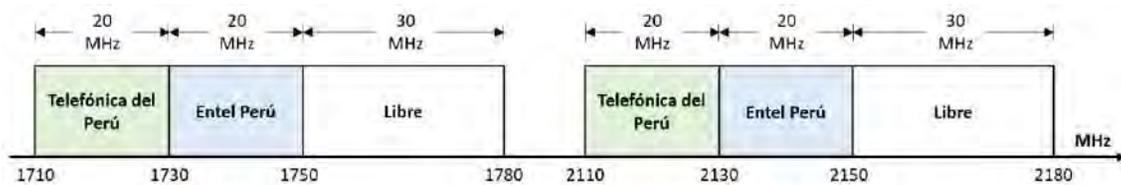
La banda de 698-806 MHz se asigna a título primario para la prestación de servicios públicos de telecomunicaciones mediante el sistema de acceso inalámbrico, de conformidad con la Nota P51 del PNAF. En la actualidad, tres operadores utilizan los tres canales de 15+15 MHz de la banda 700 MHz: Entel (Entel Perú S.A.), Claro (América Móvil) y Movistar (Telefónica del Perú) (More & Argandoña, 2019).

2. Banda de 1700/2100 MHz (AWS)

Según la Nota P65 del PNAF, los sistemas de acceso inalámbrico se utilizarán para prestar servicios públicos de telecomunicaciones en las bandas de 1710-1780 MHz y 2110-2180 MHz, lo cual constituye su fin primordial (More & Argandoña, 2019).

Figura 4.2

Banda 1700/2100 MHz (AWS)



Fuente: Obtenida de (More & Argandoña, 2019)

Movistar (Telefónica del Perú) y Entel (Entel Perú S.A.), ambas con 20+20 MHz, están presentes en esta banda de frecuencia. La adjudicación de esta banda se realizó el año 2013. Ambos operadores llegaron a implementar la tecnología LTE, pero en ciertos escenarios empleando el espectro de la banda 700 MHz, consiguieron implementar la tecnología LTE-Advanced por medio de la agregación de portadora (More & Argandoña, 2019).

4.2 Link Budget

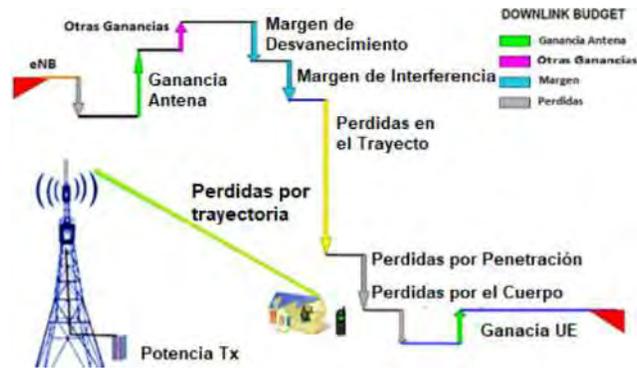
Para poder comprender como se desempeña la red, el *Link Budget* llega a analizar las ganancias y las pérdidas que particularizan la señal que se traslada por el medio de transmisión. Se debe considerar que el análisis es diferente para el enlace *uplink* y *downlink* (Solórzano, 2018).

En las figuras 4.3 y 4.4 se presentan los análisis que se realizan para ambos enlaces. Donde las ganancias son representadas mediante una flecha apuntada para arriba. Mientras que las pérdidas

son representadas con flechas para abajo. Se debe considerar que los valores que asumen las ganancias y pérdidas cambian en función a las bandas de frecuencia y el entorno (Solórzano, 2018).

Figura 4.3

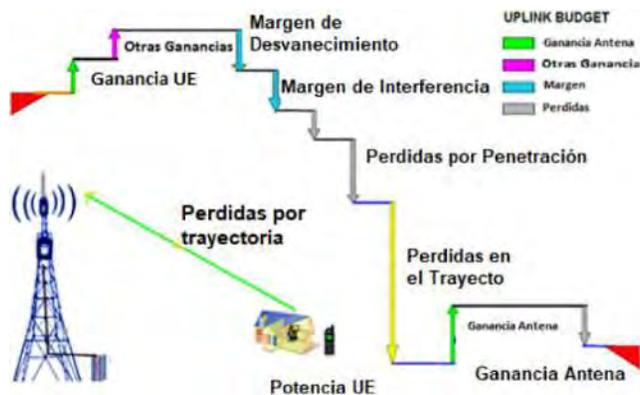
Link Budget para enlace downlink



Fuente: Tomada de (Solórzano, 2018)

Figura 4.4

Link Budget para el enlace uplink



Fuente: Tomada de (Solórzano, 2018)

4.3 Frecuencia de portadora

Para el enlace ascendente y descendente, la frecuencia central de la portadora es asignada por el número de canal de la portadora LTE o el EARFCN (*Evoled Absolute Radio Frequency Channel Number*) (Palacios Pérez, 2015).

Las expresiones matemáticas 4.1 y 4.2, representan la relación de la frecuencia central de la portadora dada en MHz entre el EARFCN (el número de canal de la portadora LTE) para el enlace *downlink* y *uplink* (Palacios Pérez, 2015).

$$F_{DL} = F_{DL_low} + 0.1(N_{DL} - N_{offs-DL}) \quad (\text{Ec. 4.1})$$

$$F_{UL} = F_{UL_low} + 0.1(N_{UL} - N_{offs-UL}) \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Donde:

- F_{DL} y F_{UL} : Frecuencia central de la portadora para el enlace *downlink* y el enlace *uplink*.
- N_{DL} y N_{UL} : Numero de canal de portadora (EARFCN) para los enlaces *downlink* y *uplink*.
- F_{DL_low} , F_{UL_low} , $N_{offs-DL}$ y $N_{offs-UL}$: Valores obtenidos a partir de los datos de tabla 4.1

Tabla 4.1

Número de canales para las bandas 4 y 28

E-UTRA Operating Band	Downlink			Uplink		
	F_{DL_low} (MHz)	$N_{offs-DL}$	Rango de N_{DL}	F_{UL_low} (MHz)	$N_{offs-UL}$	Rango de N_{UL}
4	2110	1950	1950 - 2399	1710	19950	19950 - 20399
28	758	9210	9210 - 9659	703	27210	27210 - 27659

Fuente: Propia - Elaborado en base a tabla de Número de Canales E-UTRA Anexo D

Haciendo uso de las ecuaciones 4.1 y 4.2, calculamos las frecuencias centrales de las portadoras del enlace *downlink* y enlace *uplink* para la frecuencia de 700 MHz en la banda 28.

Sabemos que el canal medio en el *downlink* es: $N_{DL} = 9585$, entonces:

$$F_{DL} = F_{DL_low} + 0.1(N_{DL} - N_{offs-DL}) = 758 + 0.1(9585 - 9210) = 795.5 \text{ MHz}$$

Sabemos que el canal medio en el *uplink* es: $N_{UL} = 27585$, entonces:

$$F_{UL} = F_{UL_low} + 0.1(N_{UL} - N_{offs-UL}) = 703 + 0.1(27585 - 27210) = 740.5 \text{ MHz}$$

1. Cálculo de Path Loss para 700 MHz

Con los resultados obtenidos de las frecuencias de portadora *downlink* y *uplink* (F_{DL} y F_{UL}) en la banda 28 de la frecuencia de operación 700 MHz, se usa del Modelo Okumura-Hata, para el cálculo del *Path Loss*, a razón de que el modelo admite llevar a cabo simulaciones y cálculos para el segmento de las frecuencias que oscilen entre 150 MHz - 1500 MHz, siendo ideal para este caso.

La pérdida básica obedece, a la ecuación 4.3 de *Path Loss*, obtenida de (Chávez, 2015)

$$PL_{dB} = 69.55 + 26.16 \log(f) - 13.82 \log(h_b) - a(h_m) + [44.9 - 6.55 \log(h_b)] \log(d) \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Donde:

- PL_{dB} : *Path Loss*
- $f(\text{MHz})$: 700 MHz (Es la frecuencia portadora)
- $h_b(m)$: 28 (altura en metros para la antena transmisora)
- $h_m(m)$: 1.5 (altura en metros para la antena receptora)
- $a(h_m)$: Es el factor de corrección en (dB) para la altura de antena de la unidad móvil.
- $d(\text{km})$: 1 (distancia en (km) del transmisor entre el receptor)

El $a(h_m)$ en ciudades pequeñas o medianas está definido según (Chávez, 2015) como:

$$a(h_m) = (1.11 \log(f) - 0.7)h_m - (1.56 \log(f) - 0.8) \quad (\text{Ec. 4.4})$$

Calculo para *downlink* 700 MHz:

Primero calculamos el factor de corrección a partir de (4.4) para 795.5 MHz:

$$a(h_m) = (1.11 \log(795.5) - 0.7)1.5 - (1.56 \log(795.5) - 0.8) = 0.0546$$

Reemplazamos todos los valores para en la ecuación (4.3):

$$PL_{dB} = 69.55 + 26.16 \log(795.5) - 13.82 \log(28) - 0.0546 + [44.9 - 6.55 \log(28)] \log(1)$$

$$PL_{dB} = 125.38 \text{ dB}$$

Calculo para *uplink* 700 MHz:

Primero calculamos el factor de corrección a partir de (4.4) para 740.5 MHz:

$$a(h_m) = (1.11 \log(740.5) - 0.7)1.5 - (1.56 \log(740.5) - 0.8) = 0.0513$$

Reemplazamos todos los valores para en la ecuación (4.3):

$$PL_{dB} = 69.55 + 26.16 \log(740.5) - 13.82 \log(28) - 0.0513 + [44.9 - 6.55 \log(28)] \log(1)$$

$$PL_{dB} = 124.57 \text{ dB}$$

A partir de las ecuaciones 4.1 y 4.2, calculamos las frecuencias centrales de las portadoras del enlace *downlink* y enlace *uplink* para la frecuencia de 1700/2100 MHz (AWS) en la banda 4.

Sabemos que el canal medio en el *downlink* es: $N_{DL} = 2050$, entonces:

$$F_{DL} = F_{DL_low} + 0.1(N_{DL} - N_{offs-DL}) = 2110 + 0.1(2050 - 1950) = 2120 \text{ MHz}$$

Sabemos que el canal medio en el *uplink* es: $N_{UL} = 20050$, entonces:

$$F_{UL} = F_{UL_low} + 0.1(N_{UL} - N_{offs-UL}) = 1710 + 0.1(20050 - 19950) = 1720 \text{ MHz}$$

2. Cálculo de Path Loss para 1700/ 2100 MHz (AWS)

Teniendo en consideración los resultados obtenidos de las frecuencias de portadora *downlink* y *uplink* (F_{DL} y F_{UL}) para la segunda frecuencia de operación de 1700/ 2100 MHz (AWS) en banda 4, se hará uso del Modelo de propagación COST 231. Se hace la elección de este modelo

debido a que la frecuencia de uso va de 1500 MHz hasta el rango de los 2 GHz. Se debe considerar que será imprescindible un factor de corrección para frecuencias mayores a 2.5 GHz.

La expresión matemática del *Path Loss*, obtenida de (Imoize & Dosunmu, 2018) es:

$$PL_{dB} = 46.3 + 33.9 \log(f) - 13.82 \log(h_b) - a(h_m) + [44.96 - 6.55 \log(h_b)] \log d + C_m \quad (\text{Ec. 4.5})$$

Donde:

- PL_{dB} : *Path Loss*
- $f(\text{MHz})$: 1700/ 2100 MHz (AWS - Es la frecuencia portadora)
- $h_b(m)$: 28 (altura en metros para la antena transmisora)
- $h_m(m)$: 1.5 (altura en metros para la antena receptora)
- $a(h_m)$: Es el factor de corrección en (dB) para la altura de antena de la unidad móvil.
- $d(\text{km})$: 1 (distancia en (km) del transmisor entre el receptor)
- C_m : Constante de desviación estándar. En ambientes suburbano o abierto es de 0 dB y de 3 dB para entornos urbanos.

Para $a(h_m)$ en zonas suburbanas y rurales, (Beciez, Flores, & Pérez, 2013), será:

$$a(h_m) = (1.11 \log(f) - 0.7)h_m - (1.56 \log(f) - 0.8) \quad (\text{Ec. 4.6})$$

Calculo para *downlink* frecuencia AWS:

Primero calculamos el factor de corrección a partir de (4.6) para 2120 MHz:

$$a(h_m) = (1.11 \log(2120) - 0.7)1.5 - (1.56 \log(2120) - 0.8) = 0.0993$$

Reemplazamos en la expresión matemática 4.5, todos los valores:

$$PL_{dB} = 46.3 + 33.9 \log(2120) - 13.82 \log(28) - 0.0993 + [44.96 - 6.55 \log(28)] \log(1) + 0$$

$$PL_{dB} = 138.96 \text{ dB}$$

Calculo para *uplink* frecuencia AWS:

Primero calculamos el factor de corrección a partir de (4.6) para 1720 MHz:

$$a(h_m) = (1.11 \log(1720) - 0.7)1.5 - (1.56 \log(1720) - 0.8) = 0.0897$$

Reemplazamos en la expresión matemática 4.5, todos los valores:

$$PL_{dB} = 46.3 + 33.9 \log(1720) - 13.82 \log(28) - 0.0897 + [44.96 - 6.55 \log(28)] \log(1) + 0$$

$$PL_{dB} = 135.89 \text{ dB}$$

Los resultados de los cálculos de *Path Loss*, son más crítico en la frecuencia de 1700/2100 MHz (AWS) con 138.96dB/ 135.89dB valores en *downlink* y *uplink*, en cambio para la frecuencia de 700 MHz es de 125.38dB/ 124.57dB en *downlink* y *uplink*. Por lo cual de aquí en adelante se realizará el procedimiento del dimensionamiento de la red, haciendo uso de la frecuencia de 1700/2100 MHz (AWS) para los cálculos y poder determinar la cantidad de eNodeBs requeridos.

4.4 Sensibilidad del receptor

La sensibilidad está definida como la potencia mínima que debe recibir el receptor para que cumpla los requisitos de la Eb/No o SNR (relación señal a ruido). Su expresión matemática 4.7 para su cálculo está dada se la siguiente manera (Puel, 2017):

$$S_{Rx} = -\frac{174 \text{ dBm}}{\text{Hz}} + 10 \log(BW_{\text{dBm.Hz}}) + NF_{dB} + SINR_{dB} + IM_{dB} - 3 \text{ dB} \quad (\text{EC. 4.7})$$

Donde:

- S_{Rx} : Sensibilidad del receptor (dBm).

- $\frac{-174dBm}{Hz}$: *Thermal noise level*.
- BW: Es el ancho de banda (en Hz) efectivo del canal.
- NF: Viene a ser la figura de ruido del receptor en (dB).
- IM: Es el margen de implementación en (dB).
- SINR: Es la relación que se da, de la señal entre la interferencia más el ruido.
- -3dB: Viene a ser el valor para el factor de corrección en (dB).

En el caso del SINR requerido, llega a estar determinado por la tecnología que se alcance a usar y asimismo es dependiente de la calidad de BER, como de la codificación de canales que se estén usando y además de la modulación (Puel, 2017).

La cantidad de ruido que el receptor añade en la señal se mide por la figura de ruido del receptor (NF), la cual se alega como un decrecimiento en la SNR a la salida en contraste con la entrada. En LTE se especifica como una restricción que no debe superar el valor de los 9 dB en el caso del UE y para el eNodeB los 5 dB (Reyes, 2016).

Se define el IM como un margen que tiene en consideración las disparidades prácticas y teóricas del SINR, asimismo llega a considerar como la señal se degrada a causa del procesamiento digital que se le llega a aplicar y el empleo de demoduladores que no son ideales (Puel, 2017).

Debemos tener en consideración que el ancho de banda efectivo debe ser conocido para así llegar a calcular la sensibilidad del receptor, de la figura 4.2, se sabe que un ancho de banda de 20 MHz es asignado para frecuencias AWS y por la Tabla 2.1, se conoce que para 100 RBs se tiene 20 MHz como ancho de banda y para un RB, 180 kHz constituyen su ancho de banda, tendríamos:

$$BW_{efectivo} = \#RBs \times BW_{RB} = 100 \times 180 \text{ kHz} = 18 \text{ MHz} \quad (\text{Ec. 4.8})$$

Los valores de SINR en las composiciones diversas de modulaciones y codificaciones necesarias para LTE se muestran en la Tabla 4.2. Cabe señalar que LTE utiliza modulación adaptativa, lo que hace viable el empleo de QPSK, 16QAM y 64QAM (usa las tres modulaciones).

Tabla 4.2

Tipos de Modulaciones para LTE

MODULACIÓN	CODE RATE	SINR (dB)	IM (dB)
QPSK	1/8	-5.1	2.5
	1/5	-2.9	
	1/4	-1.7	
	1/3	-1	
	1/2	2	
	2/3	4.3	
	3/4	5.5	
	4/5	6.2	
16QAM	1/2	7.9	3
	2/3	11.3	
	3/4	12.2	
	4/5	12.8	
64QAM	2/3	15.3	4
	3/4	17.5	
	4/5	18.6	

Fuente: Obtenida de (Analuisa, 2014)

Para los cálculos siguientes se selecciona para SINR según tipo de modulación un valor mínimo y uno máximo (para el caso 64QAM según tabla 4.2 no cuenta con SINR máximo).

Tabla 4.3

Valores Máximos y mínimos por modulación para LTE

Modulación	SINR Min. (dB)	SINR Max. (dB)
QPSK	-5.1	7.9
16QAM	7.9	15.3
64QAM	15.3	-

Fuente: Obtenido de (Hernández, 2014)

4.5 Análisis Link Budget para el enlace downlink

En este caso debemos de considerar que el eNodeB viene a ser el transmisor, mientras que el UE es el receptor. Para tal caso la tabla 4.4 presenta los siguientes datos:

Tabla 4.4

Parámetros del enlace downlink para el Link Budget

Generales	Valor	Unidad
Tecnología	LTE FDD	
Ancho de Banda	20	MHz
Altura de la Antena	28	m
Frecuencia	2120	MHz
Transmisor eNodeB		
Potencia para antena de transmisión	46	dBm
Ganancia para la antena	18	dBi
Ganancia por MIMO	0	dB
Perdida por cable (<i>Feeder Loss</i>) (Castillo, 2017)	3	dB
Perdida por cuerpo (<i>Boby Loss</i>) (Castillo, 2017)	0.5	dB
Receptor UE LTE		
Figura de Ruido del receptor para el UE	8	dB
Perdida por cuerpo (<i>Boby Loss</i>)	0	dB
Ganancia para antena de recepción	0	dB
Ganancia por diversidad de antenas (Reyes, 2016)	0	dB
Otros Parámetros		
<i>Penetration Loss</i> (Perdida por penetración) (Reyes, 2016)	2	dB
<i>Shadow fading</i> (Desviación estándar) (Anexo G)	8	dB

Fuente: Adaptado en base a Link Budget (Solórzano, 2018)

1. Cálculo de sensibilidad para el enlace downlink

Se calculará la sensibilidad dependiendo de la modulación con respecto a los datos de la tabla 4.3. Donde se tiene que el valor para: $NF = 8$ (tabla 4.4) y $BW = 18\text{MHz}$ (banda efectiva obtenido de ecuación 4.8), remplazamos en la ecuación 4.7, obtendremos:

QPSK

- $S_{Rx}(Min.) = -174 + 10 \log(18 \times 10^6) + 8 - 5.1 + 2.5 - 3 = -99.04727 \text{ dBm}$
- $S_{Rx}(Max.) = -174 + 10 \log(18 \times 10^6) + 8 + 7.9 + 2.5 - 3 = -86.04727 \text{ dBm}$

16QAM

- $S_{Rx}(Min.) = -174 + 10 \log(18 \times 10^6) + 8 + 7.9 + 3 - 3 = -85.54727 \text{ dBm}$
- $S_{Rx}(Min.) = -174 + 10 \log(18 \times 10^6) + 8 + 15.3 + 3 - 3 = -78.14727 \text{ dBm}$

64QAM

- $S_{Rx}(Min.) = -174 + 10 \log(18 \times 10^6) + 8 + 15.3 + 4 - 3 = -77.14727 \text{ dBm}$

Se presenta en la tabla 4.5, el resultado de los valores obtenidos según el tipo de modulación para LTE de la sensibilidad limite en el enlace *downlink*.

Tabla 4.5

Límites de sensibilidad en downlink, según el tipo modulación

Modulación	SINR Mín. (dB)	SINR Max. (dB)	S_{Rx} mínima	S_{Rx} máxima
QPSK	-5.1	7.9	-99.04727	-86.04727
16QAM	7.9	15.3	-85.54727	-78.14727
64QAM	15.3	-	-77.14727	-

Fuente: Obtenido en base a los resultados de sensibilidad mínimo y máximo.

2. Cálculo de EIRP

El *Effective Isotropic Radiated Power* (EIRP) es definida como la potencia añadida mediante la ganancia de la antena, menos cualquier pérdida que se produzca y es posible calcular su valor a través la expresión matemática 4.9, obtenida de (Castillo, 2017).

$$EIRP = P_{Tx} + G_{Tx} - L_{feeder} - L_{body} + G_{MIMO} \quad (\text{Ec. 4.9})$$

Donde:

- EIRP: *Effective Isotropic Radiated Power*
- P_{Tx} : Es la potencia del transmisor
- G_{Tx} : Es la ganancia de la antena del transmisor
- L_{feeder} : Pérdida en el cable (*Feeder Loss*)
- L_{body} : Pérdidas por cuerpo (*Body Loss*)
- G_{MIMO} : Es la ganancia para el arreglo MIMO

EIRP para downlink: Tomando los datos de la tabla 4.4, obtendremos:

$$EIRP = P_{Tx} + G_{Tx} - L_{feeder} - L_{body} + G_{MIMO} = 46 + 18 - 3 - 0.5 + 0$$

$$EIRP = 60.5 \text{ dB}$$

3. Cálculo para la pérdida en el espacio libre debido a la propagación

La cantidad de potencia de transmisión que se pierde a medida que la señal se transmite desde la antena transmisora hasta la antena receptora se conoce como; *Máximo Allowable Path Loss (MAPL)*. Se determina mediante la expresión matemática 4.10 obtenida de (Castillo, 2017).

$$MAPL = EIRP - S_{RX} + G_{RX} - L_p - \sigma \quad (\text{Ec. 4.10})$$

Donde:

- MAPL: Pérdida de trayecto máxima admisible (*Maximum Allowable Path Loss*).
- EIRP: Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (*Effective Isotropic Radiated Power*).
- S_{RX} : Es la Sensibilidad del receptor

- G_{RX} : Es la ganancia del receptor
- L_P : Perdida por penetración (*Penetration Loss*)
- σ : Desviación estándar (*Shadow fading*)

Cálculo de MAPL en el enlace *downlink* con los datos de la tabla 4.4.

$$MAPL = EIRP - S_{RX} + G_{RX} - L_P - \sigma$$

$$MAPL = 60.5 - S_{RX} + 0 - 2 - 8$$

$$MAPL = 50.5 - S_{RX} \quad (\text{Ec. 4.11})$$

Ahora con la expresión matemática 4.11 y datos de la tabla 4.5 calculamos las perdidas:

QPSK

- $MAPL_{Max} = 50.5 - (-99.04727) = 149.54727 \text{ dB}$
- $MAPL_{Min} = 50.5 - (-86.04727) = 136.54727 \text{ dB}$

16QAM

- $MAPL_{Max} = 50.5 - (-85.54727) = 136.04727 \text{ dB}$
- $MAPL_{Min} = 50.5 - (-78.14727) = 128.64727 \text{ dB}$

64QAM

- $MAPL_{Max} = 50.5 - (-77.14727) = 127.64727 \text{ dB}$

La tabla 4.6 detalla valores máximos, así como valores mínimos del cálculo realizado de perdida en el espacio libre debido a la propagación de señal, en diferentes tipos de modulación.

Tabla 4.6

Valores para las pérdidas por propagación en el enlace downlink

Modulación	S_{RX} mínima	S_{RX} máxima	MAPL mínimo	MAPL máximo
QPSK	-99.04727	-86.04727	136.54727	149.54727
16QAM	-85.54727	-78.14727	128.64727	136.04727
64QAM	-77.14727	-	-	127.64727

Fuente: Obtenido en base a los valores de MAPL mínimos y máximos de downlink

4.6 Análisis Link Budget para el enlace uplink

En este caso debemos de considerar que el UE viene a ser el transmisor, mientras que el eNodeB es el receptor. Para tal caso la tabla 4.7 presenta los siguientes datos:

Tabla 4.7

Parámetros del enlace uplink para el Link Budget

Generales	Valor	Unidad
Tecnología	LTE FDD	
Ancho de Banda	20	MHz
Altura de la Antena	1.5	m
Frecuencia	1720	MHz
Transmisor UE LTE		
Potencia para antena de transmisión	23	dBm
Ganancia para la antena	0	dB
Ganancia por MIMO	0	dB
Perdida por cable (<i>Feeder Loss</i>)	0	dB
Perdida por cuerpo (<i>Boby Loss</i>)	0	dB
Receptor eNodeB		
Figura de Ruido del receptor para el eNodeB	3	dB
Perdida por cuerpo (<i>Boby Loss</i>) (Castillo, 2017)	0.5	dB
Ganancia para antena de recepción	18	dB
Ganancia por diversidad de antenas (Reyes, 2016)	0	dB
Otros Parámetros		
<i>Penetration Loss</i> (Perdida por penetración) (Reyes, 2016)	2	dB
<i>Shadow fading</i> (Desviación estándar) (Anexo G)	8	dB

Fuente: Adaptado en base a Link Budget (Solórzano, 2018)

1. Cálculo de sensibilidad para el enlace *uplink*

Al igual que en el caso del *downlink*, se hará uso de los datos de la tabla 4.3 y se debe considerar también que: $NF = 3$ (tabla 4.7) y $BW = 18\text{MHz}$ (banda efectiva obtenido de ecuación 4.8), remplazamos en la ecuación 4.7, obtendremos los siguientes valores:

QPSK

- $S_{Rx}(Min.) = -174 + 10 \log(18 \times 10^6) + 3 - 5.1 + 2.5 - 3 = -104.04727 \text{ dBm}$
- $S_{Rx}(Max.) = -174 + 10 \log(18 \times 10^6) + 3 + 7.9 + 2.5 - 3 = -91.04727 \text{ dBm}$

16QAM

- $S_{Rx}(Min.) = -174 + 10 \log(18 \times 10^6) + 3 + 7.9 + 3 - 3 = -90.54727 \text{ dBm}$
- $S_{Rx}(Min.) = -174 + 10 \log(18 \times 10^6) + 3 + 15.3 + 3 - 3 = -83.14727 \text{ dBm}$

64QAM

- $S_{Rx}(Min.) = -174 + 10 \log(18 \times 10^6) + 3 + 15.3 + 4 - 3 = -82.14727 \text{ dBm}$

Se presenta en la tabla 4.8 valores calculados de la sensibilidad limite en el enlace *uplink*.

Tabla 4.8

Límites de sensibilidad en uplink, según el tipo de modulación

Modulación	SINR Mín. (dB)	SINR Max. (dB)	S_{Rx} mínima	S_{Rx} máxima
QPSK	-5.1	7.9	-104.04727	-91.04727
16QAM	7.9	15.3	-90.54727	-83.14727
64QAM	15.3	-	-82.14727	-

Fuente: Obtenido en base a los resultados de sensibilidad mínimos y máximos.

2. **Cálculo de EIRP para enlace *uplink*:** Usamos de la ecuación 4.9 y datos de tabla 4.7.

$$EIRP = P_{Tx} + G_{Tx} - L_{feeder} - L_{body} + G_{MIMO} = 23 + 0 - 0 - 0 + 0$$

$$EIRP = 23 \text{ dB}$$

3. **Cálculo de MAPL para *uplink*:** Usamos información de la tabla 4.7 y ecuación 4.10

$$MAPL = EIRP - S_{RX} + G_{RX} - L_P - \sigma$$

$$MAPL = 23 - S_{RX} + 18 - 2 - 8$$

$$MAPL = 31 - S_{RX} \quad (\text{Ec. 4.12})$$

Ahora con la expresión matemática 4.12 y datos de la tabla 4.8 calculamos las pérdidas:

QPSK

- $MAPL_{Max} = 31 - (-104.04727) = 135.04727 \text{ dB}$
- $MAPL_{Min} = 31 - (-91.04727) = 122.04727 \text{ dB}$

16QAM

- $MAPL_{Max} = 31 - (-90.54727) = 121.54727 \text{ dB}$
- $MAPL_{Min} = 31 - (-83.14727) = 114.14727 \text{ dB}$

64QAM

- $MAPL_{Max} = 31 - (-82.14727) = 113.14727 \text{ dB}$

La tabla 4.9 detalla valores máximos, así como valores mínimos del cálculo realizado de pérdida en el espacio libre debido a la propagación de señal, en diferentes tipos de modulación.

Tabla 4.9*Valores para las pérdidas por propagación en el enlace uplink*

Modulación	S_{Rx} mínima	S_{Rx} máxima	MAPL mínimo	MAPL máximo
QPSK	-102.04727	-89.04727	122.04727	135.04727
16QAM	-88.54727	-81.14727	114.14727	121.54727
64QAM	-80.14727	-	-	113.14727

Fuente: Obtenida en base a los valores de MAPL mínimos y máximos en uplink

4.7 Radio de la celda

Según aconseja el 3GPP los cálculos de cobertura se deben de realizar solo en caso del enlace ascendente (*uplink*), dado que amplificar la señal emitida por el equipamiento móvil de las estaciones base es más sencillo de realizar, que realizarlo en el UE, significando gastos menores los cuales serían asumidos por la empresa operadora, a diferencia de implementar amplificadores en el UE, una técnica a emplear en las estaciones base sería implementar MIMO (Analuisa, 2014).

Se empleará la ecuación 4.5 del modelo de propagación Cost-231 donde se hace uso del valor de MAPL para poder despejar el radio (R) de la celda.

$$\text{MAPL} = 46.3 + 33.9 \log(f) - 13.82 \log(h_b) - a(h_m) + [44.96 - 6.55 \log(h_b)] \log R + C_m$$

$$R = 10^{\left(\frac{\text{MAPL} - 46.3 - 33.9 \log(f) + 13.82 \log(h_b) + a(h_m) - C_m}{44.96 - 6.55 \log(h_b)}\right)} \quad (\text{Ec. 4.13})$$

Donde:

- f (MHz)= 1720 MHz (Frecuencia en el enlace *uplink* para AWS)
- h_b (m)= 28 m (altura en metros (m) para la antena de la estación base)
- h_m (m)= 1.5 m (altura en metros (m) de la antena del equipo móvil)

A continuación, se realiza cambio de variable:

- $X = 33.9 \log(f) - 13.82 \log(h_b) = 33.9 \log(1720) - 13.82 \log(28) = 89.68469$
- $Y = 44.96 - 6.55 \log(h_b) = 44.96 - 6.55 \log(28) = 35.48111$

De la ecuación 4.6: $a(h_m) = (1.11 \log(f) - 0.7)h_m - (1.56 \log(f) - 0.8)$ calculamos:

- $a(h_m) = (1.11 \log(1720) - 0.7)1.5 - (1.56 \log(1720) - 0.8) = 0.08973$

Se considerará $C_m = 0$

Por lo tanto, el máximo radio de la celda quedara de la siguiente forma:

$$R = 10^{\left(\frac{MAPL-46.3-X+a(h_m)+C_m}{Y}\right)}$$

$$R = 10^{\left(\frac{MAPL-46.3-89.68469+0.08973+0}{35.48111}\right)}$$

$$R = 10^{\left(\frac{MAPL-135.89496}{35.48111}\right)} \quad (\text{Ec. 4.14})$$

De la ecuación 4.14 se aprecia que el radio de cobertura de la celda está ligado al MAPL (pérdidas de trayectoria en el espacio libre), por tal motivo y haciendo uso de los resultados de perdidas en el enlace *uplink* de la tabla 4.9 y la ecuación 4.14, se presentan los siguientes resultados

Tabla 4.10

Valores según tipo de modulación, de los radios de cobertura

Modulación	MAPL mínimo	MAPL máximo	Radio mínimo (km)	Radio máximo (km)
QPSK	122.04727	135.04727	0.40711	0.94647
16QAM	114.14727	121.54727	0.24382	0.39412
64QAM	-	113.14727	-	0.22850

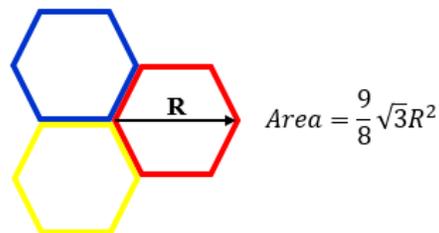
Fuente: Propia - Obtenido a partir de la ecuación 4.14 y los datos de la tabla 4.9

1. Área de cobertura de un eNodeB con tres sectores

Es el área geográfica dentro de la cual una o más estaciones base, o una red de comunicaciones móviles, es capaz de proporcionar una señal de comunicación de calidad y estable para los usuarios móviles. El modelo teórico que ayuda a realizar la planificación y estimaciones iniciales de las redes móviles LTE la cual pueda cubrir un área geográfica específica, es dividida a través de celdas hexagonales (en la vida real es totalmente irregular) (Analuisa, 2014). Tal cual se puede apreciar a partir de la siguiente figura 4.5, que muestra la ecuación para el cálculo del área de un nodo de tres sectores.

Figura 4.5

Área de un eNodeB con tres sectores



Fuente: Obtenida de Jinghai et al. (2011)

La expresión matemática para el área del eNodeB obtenida de Jinghai et al. (2011) será:

$$A_{eNodeB} = \frac{9\sqrt{3}}{8} R^2 \quad (\text{Ec. 4.15})$$

Ahora para calcular el A_{eNodeB} según el tipo de modulación, se hará uso de la siguiente expresión matemática 4.15 obtenida de (Hernández, 2014):

$$A_{eNodeB} = \frac{9\sqrt{3}}{8} [(R_{Max})^2 - (R_{Min})^2] \quad (\text{Ec. 4.16})$$

Los resultados en función del tipo de modulación LTE de las áreas hexagonal de cobertura, se proporcionan en la tabla 4.11, utilizando los datos de la tabla 4.10 y la ecuación 4.16.

Tabla 4.11

Valores de área de cobertura según modulación

Modulación	Radio máximo (km)	Radio mínimo (km)	$(R_{Max})^2 - (R_{Min})^2$	Área Hexagonal (km^2)	Área Total (km^2)
QPSK	0.94647	0.40711	0.73007	1.42262	1.71119
16QAM	0.39412	0.24382	0.09588	0.18683	
64QAM	0.22850	-	0.05221	0.10174	

Fuente: Propia - Obtenido a partir de la ecuación 4.16 y los datos de la tabla 4.10

4.8 Cálculo para el número requerido de estaciones base

Con el valor del $A_{eNodeB} = 1.71119 \text{ km}^2$, se determina la cantidad de celdas requeridas para cubrir los 11 km^2 del área de estudio, para ello, usaremos la ecuación obtenida de (Castillo, 2017).

$$\#eNodeB = \frac{A_D}{A_{eNodeB}} \quad (\text{Ec. 4.17})$$

Donde:

- $\#eNodeB$: Número de eNodeBs necesarios.
- A_D : Es el área de estudio a brindar cobertura (11 km^2).
- A_{eNodeB} : Área de cobertura de un eNodeB con tres sectores (1.71119 km^2).

Finalmente determinamos el número de estaciones base para la red LTE-Advanced, necesarias para brindar la cobertura anhelada en el área de estudio:

$$\#eNodeB = \frac{11 \text{ km}^2}{1.71119 \text{ km}^2} \approx 6$$

Se concluye que se necesitan 6 estaciones base como mínimo, por el área y las condiciones geográficas de la ciudad de Sicuani, para brindar calidad de servicio en la red LTE-Advanced.

CAPITULO V: DISEÑO DE LA RED

En este capítulo se realizarán dos etapas importantes en el diseño de la red móvil LTE-Advanced, primero la planificación de la red donde se establecerán los parámetros iniciales de configuraciones en el *software Atoll*, estableciendo la ubicación de los eNodeB existentes, frecuencias de operación, modelo de propagación, altura de torres, entre otros.

Luego de una evaluación de la red existente ya establecida con sus parámetros iniciales en el *software Atoll*, se procederá a su optimización con la finalidad de obtener mejores resultados en el desempeño de los indicadores de la red, para lo cual se evaluarán diferentes simulaciones que ayuden a corroborar dicha mejora. Posteriormente y según los cálculos del capítulo anterior se llegará a agregar al diseño dos nuevos eNodeBs, y también se realizará una nueva optimización.

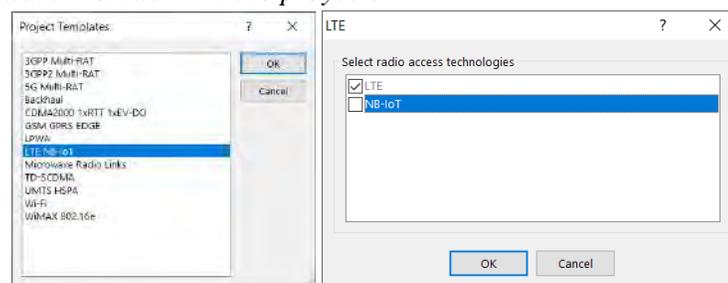
5.1 Planificación de la red LTE-Advanced existente

En esta etapa se establecen las ubicaciones de los 4 eNodeBs, así como se realiza la configuración de los parámetros iniciales, donde se tiene implementado y operativo la red LTE-Advanced. Para lo indicado se seguirán los pasos siguientes y se hará uso del *software Atoll*.

1. Se crea un nuevo proyecto partiendo de las plantillas precargadas del *software Atoll*, con una tecnología en específico, para este estudio se considera LTE.

Figura 5.1

Creación en el *software Atoll* de un nuevo proyecto

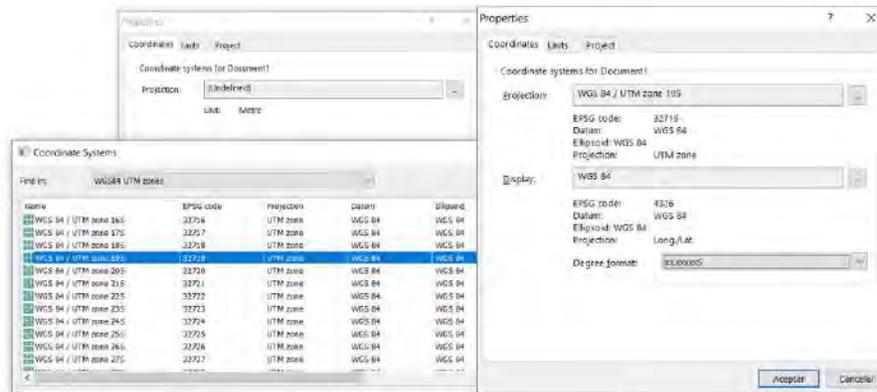


Fuente: *Software Atoll*

- Se ubican las coordenadas de la ciudad de Sicuani, las cuales pertenecen a WG84/UTM zona 19S, *display* WG84, y se elige el formato de grados.

Figura 5.2

Coordenadas ciudad de Sicuani en software Atoll

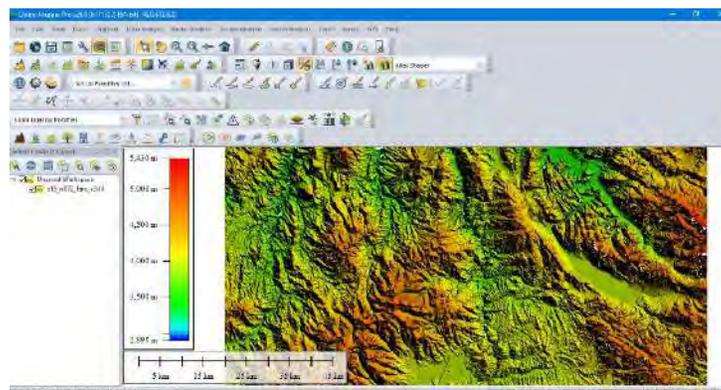


Fuente: Software Atoll

- Se hace uso del *software Global Mapper*, ya que nos permite importar el mapa que se descargó de *Earth Explorer*, donde se guarda y exporta el mapa con la extensión (.grd), ya configurada con en el área específica de investigación.

Figura 5.3

Generación de archivo .grd

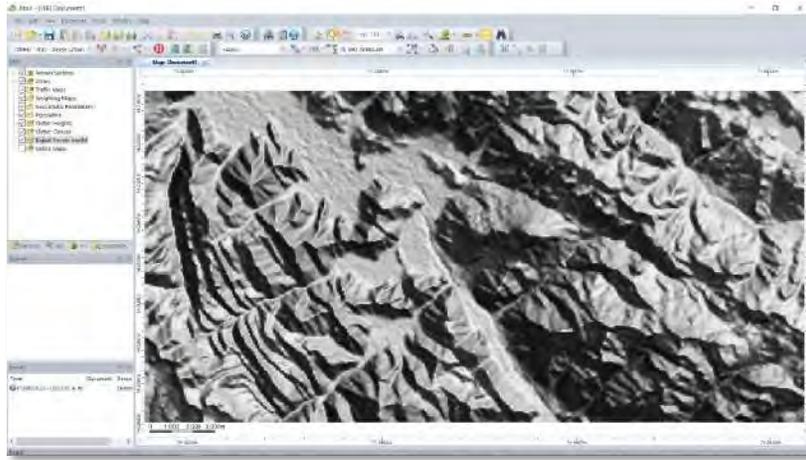


Fuente: Software Global Mapper

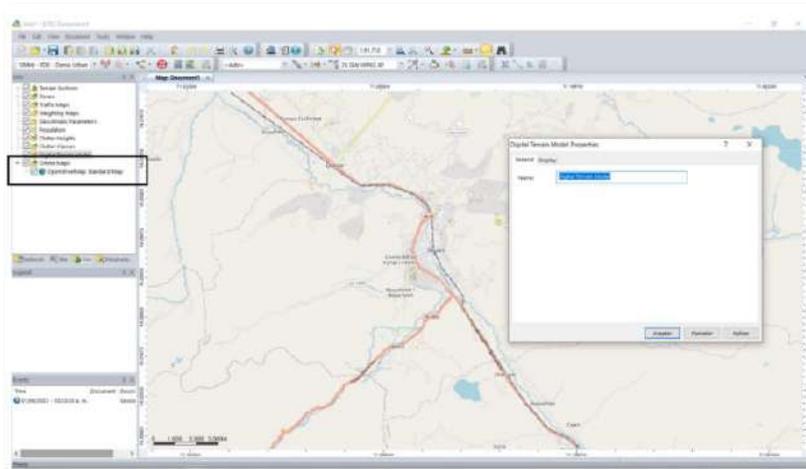
4. Para importar un mapa en *Atoll*, se debe de dirigir a la pestaña superior, hacer clic en importar archivos y seguidamente se elige el archivo con la extensión (.grd). Después de realizar el proceso anterior, se genera el mapa en relieve, según ilustra la figura 5.4 en la parte superior, en *Atoll* se descarga y sincroniza con el mapa online de ubicación del área a estudiar (ciudad de Sicuani), lo cual se aprecia en la parte inferior.

Figura 5.4

a) Mapa en relieve b) Mapa online de ubicación – software *Atoll*



Fuente: Software Atoll

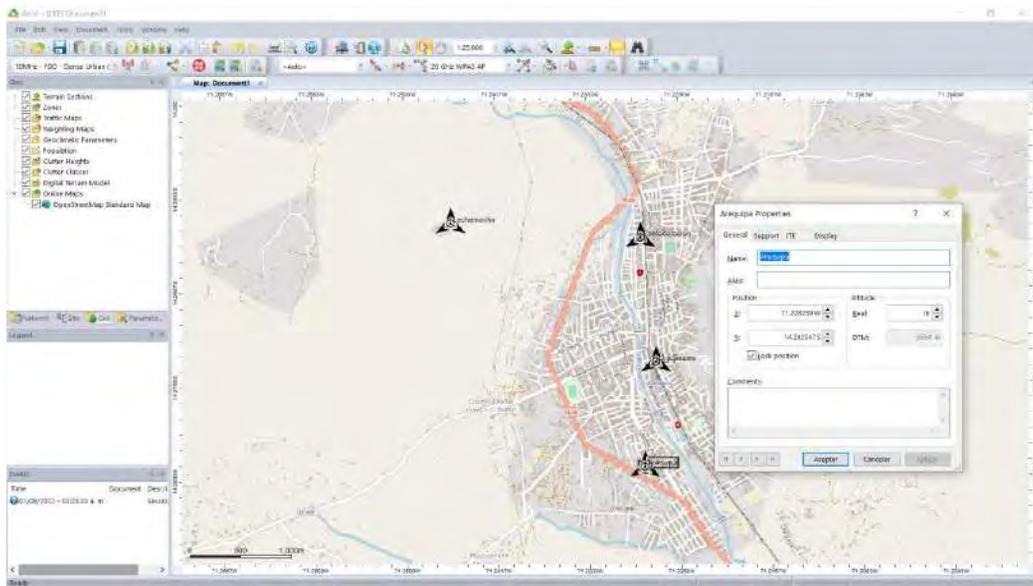


Fuente: Software Atoll

- En esta parte localizamos los 4 eNodeBs existentes en la ciudad de Sicuani, tomando como referencia sus ubicaciones exactas, creando y configurando las coordenadas en la herramienta de planificación *Atoll*, proceso que es detallado por la figura 5.5. Además, se configura la altura de las torres de cada site. El resto de los parámetros es configurado por defecto por el mismo *software*.

Figura 5.5

a) Coordenadas y b) ubicación de los eNodeB – Sicuani



Fuente: Software Atoll

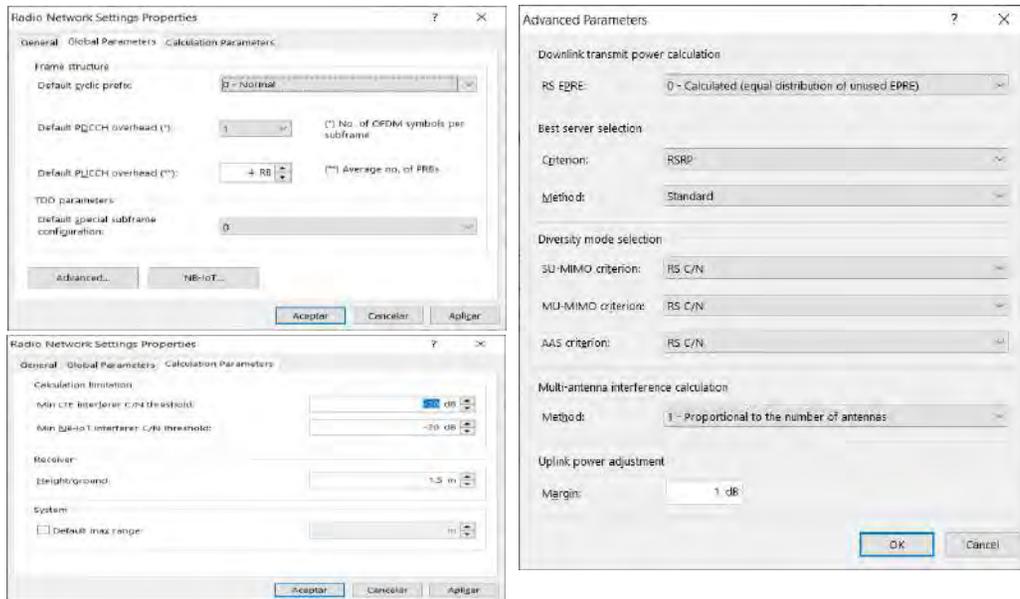
Name	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Comments	Support Height (m)	Support Type	Alias	Max S1 Interface throughput (DL) (kbps)	Max S1 Interface throughput (UL) (kbps)
Confederación	71.228462W	14.282025S	[3,589]		30			950,000	950,000
Leckemochi	71.245026W	14.280564S	[3,064]		30		Sicuani Leckemochi	950,000	950,000
Maquipa	71.228239W	14.282347S	[3,354]		30			950,000	950,000
Ura Sirani	71.223171W	14.279038S	[3,303]		30			950,000	950,000

Fuente: software Atoll – Ubicación de los eNodeBs

6. Los parámetros globales de LTE-Advanced, son asignados de forma automática por *Atoll*, basándose en la configuración del marco y los RB, para este caso se considera 100 RB.

Figura 5.6

Configuración de parámetros globales



Fuente: Software Atoll

7. La tabla 5.1 detalla los parámetros de canalización a tener en cuenta para la configuración en el *software Atoll*. Además de ello se elige la técnica de *duplexado FDD*.

Tabla 5.1

Parámetros de canalización

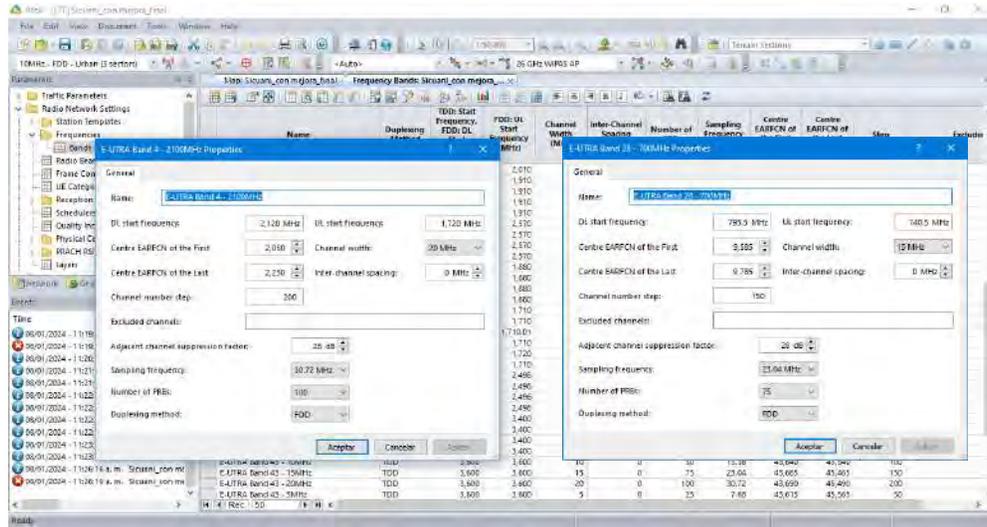
Channel bandwidth (MHz)	Number of occupied subcarriers	Number PRB	IDFT(Tx)/DFT(Rx) size	Samples per slot	Sample rate (MHz)
1.4	73	6	128	960	1.92
3	181	15	256	1920	3.84
5	301	25	512	3840	7.68
10	601	50	1024	7680	15.36
15	901	75	1536	11520	23.04
20	1201	100	2048	15360	30.72

Fuente: Obtenido de (Cox, 2014)

Para el diseño lógico de la red, se usa la banda 4, frecuencia AWS (2100MHz) y la banda 28, frecuencia de 700 MHz. En estas frecuencias la empresa proveedora de servicio móvil, opera en el distrito de Sicuani y a nivel nacional se muestran en figura 5.7 las respectivas configuraciones

Figura 5.7

Configuración de banda de frecuencia



Fuente: Software Atoll

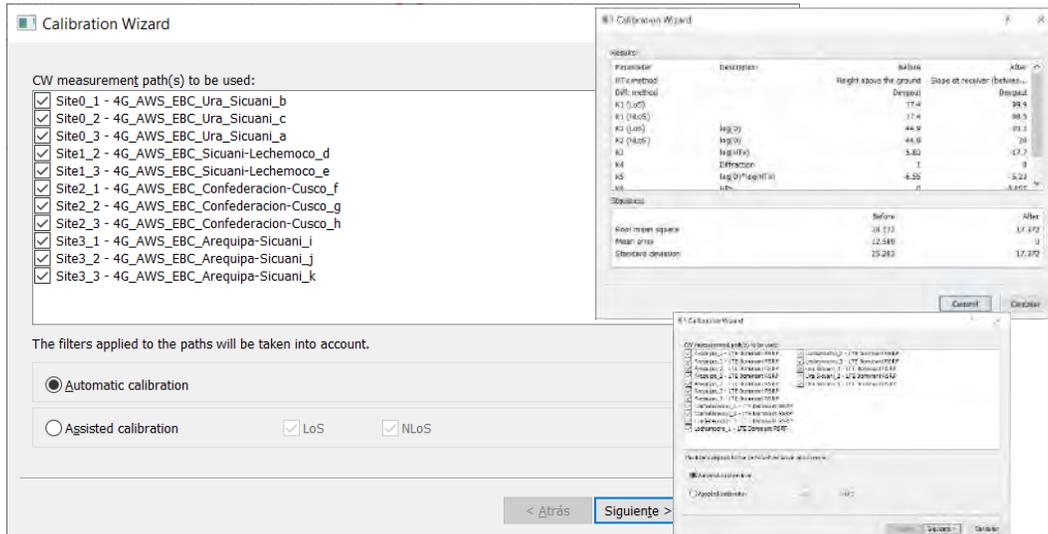
8. Para la elección del modelo de propagación y en base a las características de los modelos ofrecidos por *Atoll*, para el diseño se empleará el modelo de propagación estándar (SPM), debido a que se ajusta a los criterios técnicos de pérdidas por ruta de terreno del área geográfica de estudio para la red LTE-Advanced.

El *software Atoll* se ajusta a las zonas urbanas y suburbana que se encuentran en el área de estudio seleccionada y utiliza el modelo SPM por defecto para las plantillas de proyectos que emplean LTE, además los valores para los parámetros K de este modelo pueden obtenerse de manera empírica a través de pruebas *drive test* en la región de investigación (Rodríguez, 2013), la figura 5.8 detalla para el parámetro K los valores dados.

Para realizar la calibración del modelo SPM, según detalla la figura 5.10 se hace uso de las muestras del indicador RSRP, así como de sus latitudes y longitudes respectivas, los cuales fueron obtenidos por los dos recorridos Drive Test, los mismos que son presentados en el Anexo E.

Figura 5.10

Calibración del Modelo SPM con datos del Drive Test



Fuente: Software Atoll

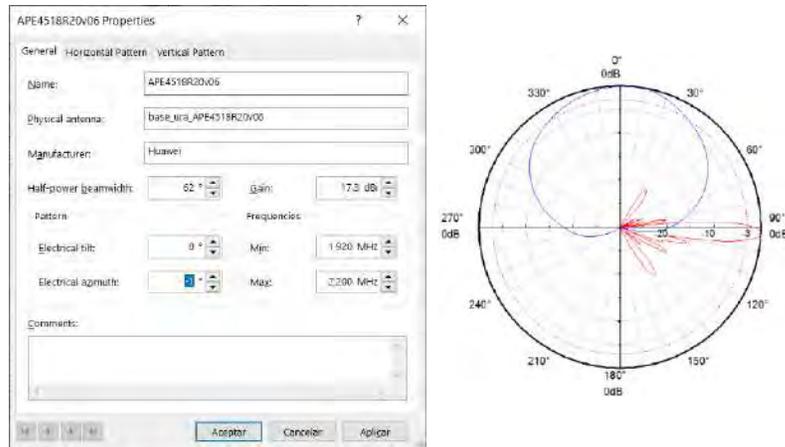
10. Las antenas usadas en el presente trabajo y las cuales fueron configuradas en el *software*, corresponden a las existentes en cada eNodeB de la ciudad de Sicuani. Tal como se muestra a continuación.

a) eNodeB Ura Sicuani:

La estación base, cuenta con tres antenas sectoriales cuyo modelo es: APE4518R4v06 (Huawei), donde la ganancia es de 17.3 dBi para el rango de frecuencia de 1920 MHz – 2200 MHz y 14.9 dBi para el caso de 690 MHz - 803 MHz, para el primer rango se tiene un ancho de haz horizontal de 3dB de 62° según detalles de la figura 5.11, estos detalles son extraídos de la hoja de datos de la antena, mayores detalles anexo A.

Figura 5.11

Configuración de Antena para eNodeB Ura Sicuani



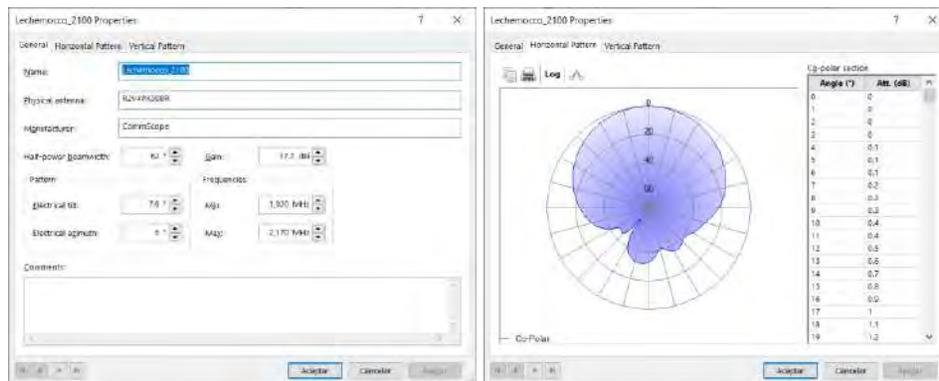
Fuente: Software Atoll – hoja de datos de Antena Anexo D

b) eNodeB Sicuani – Lechemoco

El modelo de las antenas de la estación base es: R2V4PX308R (CommScope), cuya ganancia es de 15.1 dBi para los 700 MHz y 17.2 dBi para frecuencias que oscilan de 1920 MHz - 2170 MHz se tiene 3dB de 62° como ancho de haz horizontal, detalles expuestos por figura 5.12, anexo A, hoja de datos de antena detalla estos parámetros.

Figura 5.12

Configuración de Antena para eNodeB Sicuani – Lechemoco



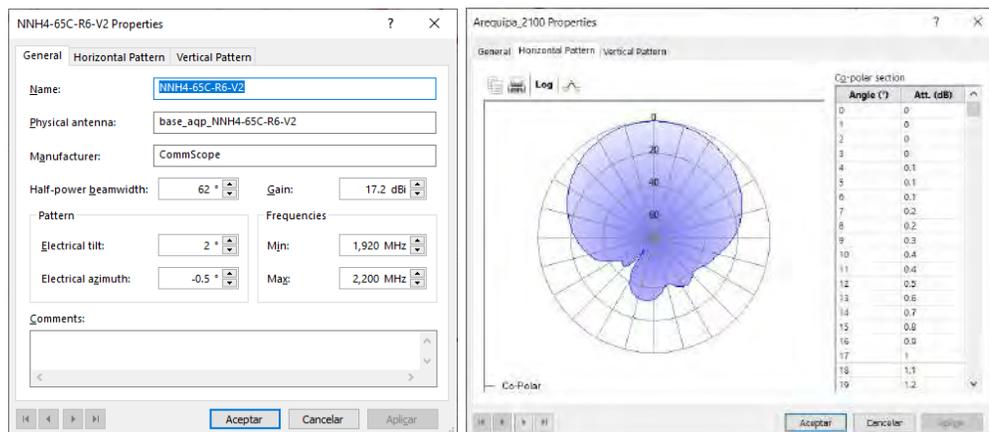
Fuente: Software Atoll

c) eNodeB Arequipa – Sicuani

Este eNodeB cuenta con antenas sectoriales cuyo modelo es: NNH4-65C-R6-V2 (CommScope), la antena es multibanda y opera en las frecuencias del rango: 1695 MHz-2200 MHz con 17.8 dBi como ganancia, con la capacidad de admitir MIMO. Se tiene 16 dBi de ganancia para las frecuencias que oscilan en 703 MHz - 894 MHz. Mayores detalles de parámetros de la antena, son mostrados en el anexo A de su hoja de datos.

Figura 5.13

Configuración de Antena para eNodeB Arequipa – Sicuani



Fuente: Software Atoll

d) eNodeB Confederación – Cusco

El modelo de antena sectorial es: ASI4518R10v06 (Huawei), se tienen ganancias de 17 dBi para las frecuencias dentro del rango: 1920 - 2200 MHz y 15.8 dBi para el caso: 690 - 803 MHz, lo cual se aprecia en la ilustración de la figura 5.14, mayores detalles de parámetros de la antena, son mostrados en el anexo A de su hoja de datos.

estación base de Confederación-Cusco, la antena se encuentra a 26 metros del plano de la tierra, el modelo de antena ASI4518R10v06, el ángulo de azimut es de 0°, detalles Anexo B.

12. Para el caso de estudio se llega a emplear en la herramienta *Atoll*, la técnica MU-MIMO donde se tiene dos antenas de carga por transmisor y dos antenas de descarga, lo que facilita el rendimiento y el equilibrio de la red. También la configuración en el *software Atoll* permite que se puedan manipular las características de transmisión en el eNodeB y el UE.

Figura 5.16

Configuración MU-MIMO en el eNodeB para Tx/ Rx

General		Transmitter		LTE Cells		NB-IoT Cells		Propagation		Display	
1											
Layer	Macro Layer										
Cell Type	LTE-A PCell										
Frequency Band	E-UTRA Band 4 - 2100MHz										
Channel Number	2,250										
Channel Allocation Status	Allocated										
Interference Coordination Support											
Frame Configuration											
TDD Subframe Configuration											
Almost Blank Subframe (ABS) Pattern											
Reception Equipment	Default Cell Equipment										
Scheduler	Proportional Fair										
Diversity Support (DL)	MU-MIMO										
Diversity Support (UL)	MU-MIMO										
Number of MU-MIMO Users (DL)											4
Number of MU-MIMO Users (UL)											4
Traffic Load (DL) (%)											100

General		Transmitter		LTE Cells		NB-IoT Cells		Propagation		Display	
1											
Layer	Macro Layer										
Cell Type	LTE-A SCell DL; LTE-A SCell										
Frequency Band	E-UTRA Band 28 - 700MHz										
Channel Number	9,585										
Channel Allocation Status	Allocated										
Interference Coordination Support											
Frame Configuration											
TDD Subframe Configuration											
Almost Blank Subframe (ABS) Pattern											
Reception Equipment	Default Cell Equipment										
Scheduler	Proportional Fair										
Diversity Support (DL)	MU-MIMO										
Diversity Support (UL)	MU-MIMO										
Number of MU-MIMO Users (DL)											2
Number of MU-MIMO Users (UL)											2
Traffic Load (DL) (%)											100

Fuente: Software Atoll

13. Se implementa la agregación de portadoras (*Carrier aggregation*), para tal efecto en el *software Atoll*, primero a través de la configuración de plantilla de transmisor se definen dos celdas, para el caso de estudio se usan las frecuencias 2100 MHz (AWS) y 700 MHz donde se tiene 20 MHz y 15 MHz de ancho de banda respectivamente (35+35 MHz, como total). La primera celda se designa como celda principal y la segunda como celda LTE/LTE-A secundaria; el software admite hasta cuatro celdas secundarias.

Figura 5.17

Adición de portadora secundaria

Parameter	Site2_1 Properties	Site2_4 Properties
Name	Site2_1(0)	Site2_4(0)
ID		
Active	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Order	1	1
Layer	Macro Layer	Macro Layer
Cell Type	LTE-A PCell	LTE-A SCell DL/LTE-A SCell
Frequency Band	E-UTRA Band 4 - 2100MHz	E-UTRA Band 20 - 700MHz
Channel Number	2,350	9,735
Channel Allocation Status	Allocated	Allocated
Physical Cell ID Domain		
Physical Cell ID	7	7
PSS ID	1	1
SSS ID	2	2
PSS ID Status	Allocated	Allocated
SSS ID Status	Allocated	Allocated
Reuse Distance (m)		
Max Power (dBm)	43	43
RS EPRE per Port (dBm)	12.4	13.7
SS EPRE Offset / RS (dB)	0	0
PBCH EPRE Offset / RS (dB)	0	0
POBCH EPRE Offset / RS (dB)	0	0
PODCH EPRE Offset / RS (dB)	0	0
PRACH EPRE Offset / RS (dB)	0	0
Min RSRP (dBm)	-140	-140
Cell Selection Threshold (dB)	0	0
Cell Individual Offset (dB)	0	0
Handover Margin (dB)	0	0
Cell Edge Margin (dB)	0	0
Fractional Power Control Factor	1	1
Max Noise Rise (dBi) (dB)	6	6
Max PUSCH C _μ -H (dB)	20	20

Fuente: Software Atoll

14. Se establecen los siguientes parámetros de tráfico en el *software Atoll*:

- a) Se incluyen ciertos servicios de comunicaciones móviles para LTE-Advanced en la planificación de capacidad, según indica la figura 5.18, los cuales incluyen: VoIP, *Video Conferencing, Mobile Internet Access, High Speed Internet.*

Figura 5.18

Configuración de servicios – software Atoll

Name	Type	QoS Class Identifier (QCI)	Priority (Precedence)	Supported Layers	Downlink Activity Factor	Uplink Activity Factor	Lowest Server (dB)	Best Server (dB)	Lowest Server (dB)	Best Server (dB)	Min Delay (ms)	Max Delay (ms)	Max Throughput (Mbps)	Average Throughput (Mbps)	Average Delay (ms)	Throughput Scaling Factor (%)	Throughput Offset (dB)	Delay Loss (dB)	MFI Number of RTT (s)
High Speed Internet	Data	1 (QCI)	1		1	1	14	14	14	14	0	0	100	100	100	100	0	0	1
Mobile Internet Access	Data	2 (QCI)	2		1	1	18	18	18	18	0	0	50	50	50	50	0	0	1
MTC	Data	0 (QCI)	0		1	1	18	18	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Video Conferencing	Video	2 (QCI)	2		0.8	0.8	18	18	18	18	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	0	0	1
VoIP	Voice	1 (QCI)	1		0.8	0.8	18	18	18	18	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	0	0	1

Fuente: Software Atoll

De la figura 5.18, se aprecia que se asigna una identificación de clase (QCI) de QoS, a cada servicio, lo cual permitirá priorizar los datos de las aplicaciones dentro de la red. Por ejemplo, se asegura así, que la saturación y lento rendimiento de la red, no interrumpa el viaje con la menor demora posible de los paquetes de voz.

- b) Se elige la categoría 6 para los terminales móviles de la ciudad de Sicuani, según especificaciones técnicas con esta categoría se pueden alcanzar tasas de velocidad de 300/50Mbps, cabe mencionar que el 3GPP establece las categorías 6, 7 y 8 para LTE-Advanced.

Figura 5.19

Terminal móvil configurado

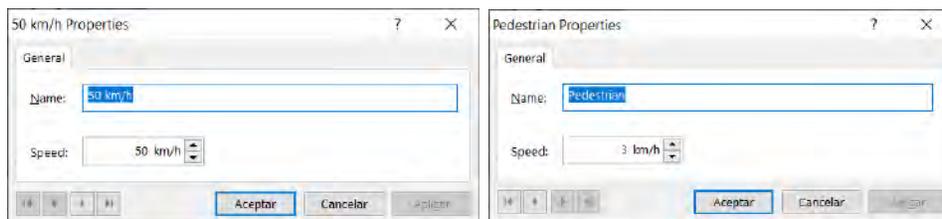


Fuente: Software Atoll

- c) Para el parámetro de movilidad se establecen valores predeterminados por el *software Atoll*. Se considera que el límite máximo de velocidad para los vehículos es de 50 km/h, mientras que el límite para los peatones es de 3 km/h.

Figura 5.20

Configuración de movilidad



Fuente: Software Atoll

15. Seguidamente se establecen los parámetros iniciales en el *software Atoll* para cada eNodeB de la red móvil LTE-Advanced existente y considerando los valores de: *tilt* mecánico, *tilt* eléctrico, azimut y alturas de las torres (anexo B) que fueron debidamente establecidos.

Figura 5.21

Parámetros iniciales en cada eNodeB

Active	Transmitter Type	Antenna	DX (m)	DY (m)	Use Absolute Coordinates	Longitude	Latitude	Height (m)	Azimuth (°)	Mechanical DownTilt (°)
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	URA_2100	0	0	<input type="checkbox"/>	71.227173W	14.273033S	25	355	1
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	URA_2100	0	0	<input type="checkbox"/>	71.227173W	14.273033S	25	150	0
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	URA_2100	0	0	<input type="checkbox"/>	71.227173W	14.273033S	25	255	0
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	URA_700	0	0	<input type="checkbox"/>	71.227173W	14.273033S	25	355	1
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	URA_700	0	0	<input type="checkbox"/>	71.227173W	14.273033S	25	150	0
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	URA_700	0	0	<input type="checkbox"/>	71.227173W	14.273033S	25	255	0
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Lehemocco_2100	0	0	<input type="checkbox"/>	71.245808W	14.260645S	40	310	5
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Lehemocco_2100	0	0	<input type="checkbox"/>	71.245808W	14.260645S	40	30	7
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Lehemocco_2100	0	0	<input type="checkbox"/>	71.245808W	14.260645S	40	155	9
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Lehemocco_700	0	0	<input type="checkbox"/>	71.245808W	14.260645S	40	310	5
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Lehemocco_700	0	0	<input type="checkbox"/>	71.245808W	14.260645S	40	30	7
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Lehemocco_700	0	0	<input type="checkbox"/>	71.245808W	14.260645S	40	155	9
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Confederacion_2100	0	0	<input type="checkbox"/>	71.228492W	14.262025S	26	0	0
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Confederacion_2100	0	0	<input type="checkbox"/>	71.228492W	14.262025S	26	90	3
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Confederacion_2100	0	0	<input type="checkbox"/>	71.228492W	14.262025S	26	210	1
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Confederacion_700	0	0	<input type="checkbox"/>	71.228492W	14.262025S	26	0	0
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Confederacion_700	0	0	<input type="checkbox"/>	71.228492W	14.262025S	26	90	3
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Confederacion_700	0	0	<input type="checkbox"/>	71.228492W	14.262025S	26	210	1
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Arequipa_2100	0	0	<input type="checkbox"/>	71.228239W	14.232347S	22	0	1
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Arequipa_2100	0	0	<input type="checkbox"/>	71.228239W	14.232347S	22	180	1
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Arequipa_2100	0	0	<input type="checkbox"/>	71.228239W	14.232347S	22	245	1
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Arequipa_700	0	0	<input type="checkbox"/>	71.228239W	14.232347S	22	0	1
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Arequipa_700	0	0	<input type="checkbox"/>	71.228239W	14.232347S	22	180	1
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Arequipa_700	0	0	<input type="checkbox"/>	71.228239W	14.232347S	22	245	1

Fuente: Software Atoll

Al establecer las simulaciones de los indicadores en el *software Atoll* ya con los parámetros iniciales de la red, se obtienen los siguientes resultados en sus valores de nivel medio.

Tabla 5.2

Valores de nivel medio para los Indicadores de la red existente

Indicador	Nivel medio
Nivel de señal	-90.07 dBm
RSRP	-115.31 dBm
SINR	7.9 dB
<i>Mean throughput</i>	28.64 Mbps

Fuente: Datos obtenidos a partir de simulaciones en el Software Atoll

Estos niveles medios obtenidos, no garantizan del todo una adecuada calidad de servicio de la red móvil LTE-Advanced, motivo por el cual en una primera etapa se inicia su optimización.

5.2 Optimización de la red LTE-Advanced existente

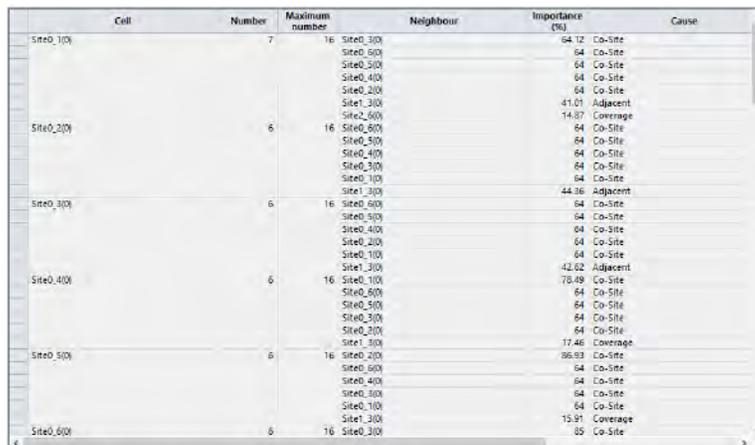
En esta parte, se procede a realizar la optimización de la red LTE-Advanced existente, para lo cual se realizará la variación de una serie de parámetros con el fin de lograr mejoras en la calidad de servicio de la red, luego de ello se procederá a elaborar diferentes simulaciones que ayudarán a validar la optimización. El proceso de optimización de la red en el *software Atoll* consta de varios pasos entre ellos: Primero se realiza la asignación de vecinos, posteriormente la planificación de frecuencias, luego la asignación de *Physical Cell IDs* y por último creación de un mapa de tráfico.

5.2.1 Asignación de vecinos

Los transmisores y estaciones base cuyas áreas de cobertura se solapan con el área de cobertura de la estación base de referencia se consideran vecinos de ese transmisor o estación base. El *software Atoll* puede asignar estos vecinos de forma manual o automática. El uso de estos vecinos es necesario para los cálculos de asignación de recursos de usuario, que determinan a qué celdas se puede conectar durante la simulación, así como para los cálculos de asignación de frecuencias (Iglesias, 2016). En el estudio se realizó la asignación de vecinos de forma automática.

Figura 5.22

Configuración automática de vecinos



Cell	Number	Maximum number	Neighbour	Importance (%)	Cause
Site0_1(0)	7	16	Site0_3(0)	64.72	Co-Site
			Site0_6(0)	64	Co-Site
			Site0_5(0)	64	Co-Site
			Site0_4(0)	64	Co-Site
			Site0_2(0)	64	Co-Site
			Site1_3(0)	41.01	Adjacent
			Site2_6(0)	14.87	Coverage
Site0_2(0)	6	16	Site0_8(0)	64	Co-Site
			Site0_5(0)	64	Co-Site
			Site0_4(0)	64	Co-Site
			Site0_3(0)	64	Co-Site
			Site0_1(0)	64	Co-Site
			Site1_3(0)	44.36	Adjacent
			Site1_6(0)	64	Co-Site
Site0_3(0)	6	16	Site0_9(0)	64	Co-Site
			Site0_4(0)	64	Co-Site
			Site0_2(0)	64	Co-Site
			Site0_1(0)	64	Co-Site
			Site1_3(0)	42.82	Adjacent
			Site1_6(0)	78.09	Co-Site
			Site1_9(0)	64	Co-Site
Site0_4(0)	6	16	Site0_8(0)	64	Co-Site
			Site0_5(0)	64	Co-Site
			Site0_3(0)	64	Co-Site
			Site0_2(0)	64	Co-Site
			Site1_3(0)	17.46	Coverage
			Site1_6(0)	96.93	Co-Site
			Site1_9(0)	64	Co-Site
Site0_5(0)	6	16	Site0_2(0)	64	Co-Site
			Site0_6(0)	64	Co-Site
			Site0_4(0)	64	Co-Site
			Site0_3(0)	64	Co-Site
			Site0_1(0)	64	Co-Site
			Site1_3(0)	75.91	Coverage
			Site1_6(0)	85	Co-Site

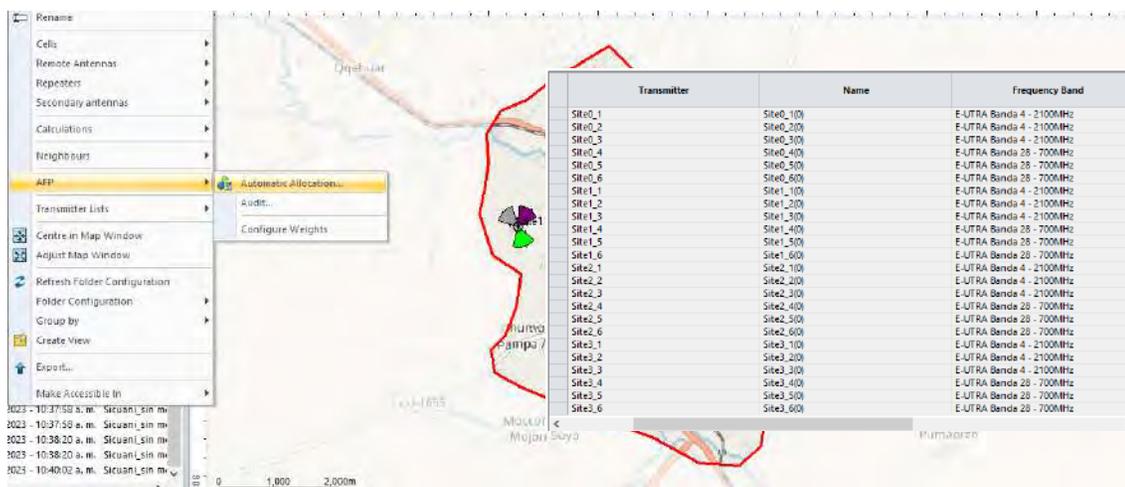
Fuente: *Software Atoll*

5.2.2 Planificación de frecuencias

El *software Atoll* proporciona una función muy útil para la planificación automática de frecuencias conocida como *AFP (Automatic Frequency Planning)*. La herramienta AFP determina la asignación de frecuencias teniendo en cuenta la distancia de reusó y las matrices de interferencias. En realidad, también toma en cuenta la lista de vecinos de cada celda. Como resultado, utilizando esta opción, la asignación de frecuencias puede realizarse de forma que se minimicen las interferencias entre celdas de la red. Es fundamental recordar que la asignación de frecuencias se desarrolla sobre portadoras o *carriers* de una banda (Iglesias, 2016). Para el caso de estudio se seleccionó en el *software Atoll*, la banda 2100 FDD – 20 MHz (E-UTRA Band 4), con un ancho de banda de 20MHz y la banda 700 FDD – 15 MHz (E-UTRA Band 28) que tiene un ancho de banda de 15 MHz.

Figura 5.23

Configuración automática de frecuencias



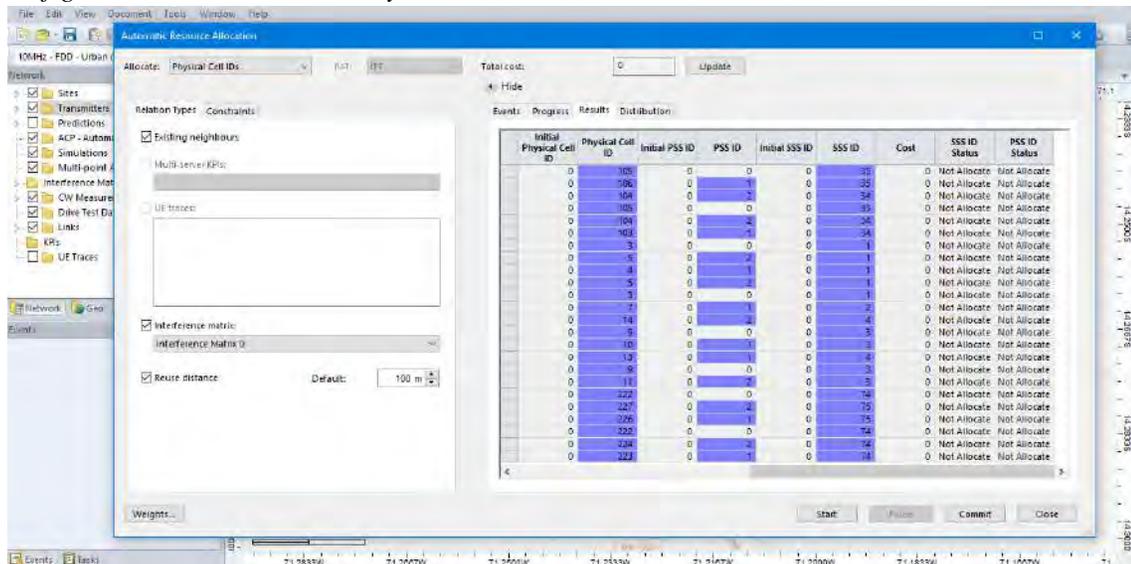
Fuente: Software Atoll

5.2.3 Planificación del Physical Cell ID

Las especificaciones 3GPP describen el *Physical Cell ID* como un número entero con un rango que va de 0 a 503. Es utilizado para que el terminal tenga la capacidad de identificar cada celda, de tal forma que sepa interpretar las señales de referencia pseudo-aleatorias que transmite la base y que utiliza el terminal para poder determinar la calidad del canal recibido. A su vez, el *software Atoll* utiliza el *Physical Cell ID* para saber cómo funcionan los mecanismos de coordinación de la interferencia intercelular (ICIC). En consecuencia, tanto la identificación de la celda, así como el funcionamiento de la medición de la señal de referencia corren peligro si no se planifica el *Physical Cell ID* (Fernández, 2014).

Figura 5.24

Configuración automática del Physical Cell ID



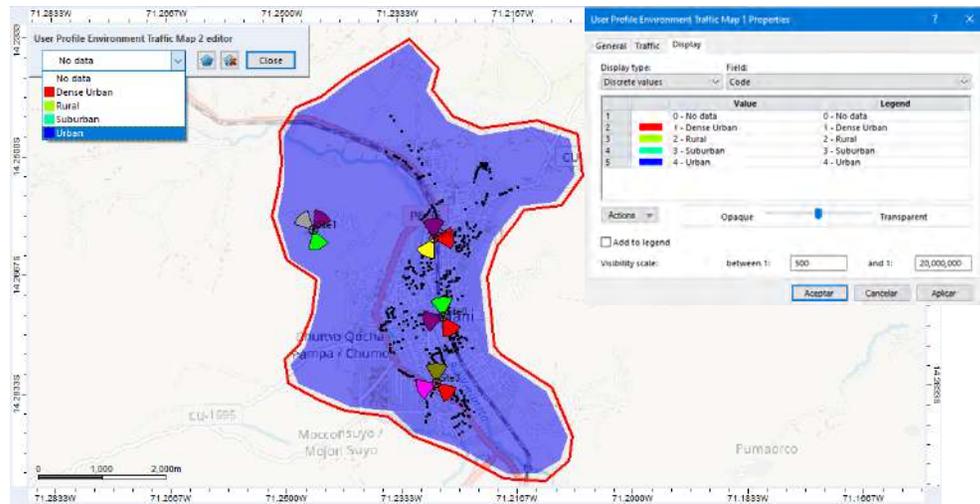
Fuente: Software Atoll

5.2.4 Creación de un mapa de tráfico

Los mapas de tráfico llegan a determinar la cantidad de usuarios que se generan en cada zona del mapa y de que perfil son (Iglesias, 2016).

Figura 5.25

Mapa de tráfico creada



Fuente: software Atoll

El *software Atoll* permite la creación y definición de cuatro tipos de mapas de tráfico, lo cual se puede apreciar en la figura 5.25. Para el caso de estudio ubicada en la zona geográfica de la ciudad de Sicuani se crea un mapa de tráfico acorde a los datos, eligiendo la opción Urbano con los *Environment* establecidos por defecto.

5.3 Optimización de la red LTE-Advanced existente con ACP

ACP (Automatic Cell Planning) es una herramienta de planificación del *software Atoll* que facilita en una red creada, el cálculo automático, para la óptima configuración en términos de calidad y cobertura de la red (Fernández, 2014).

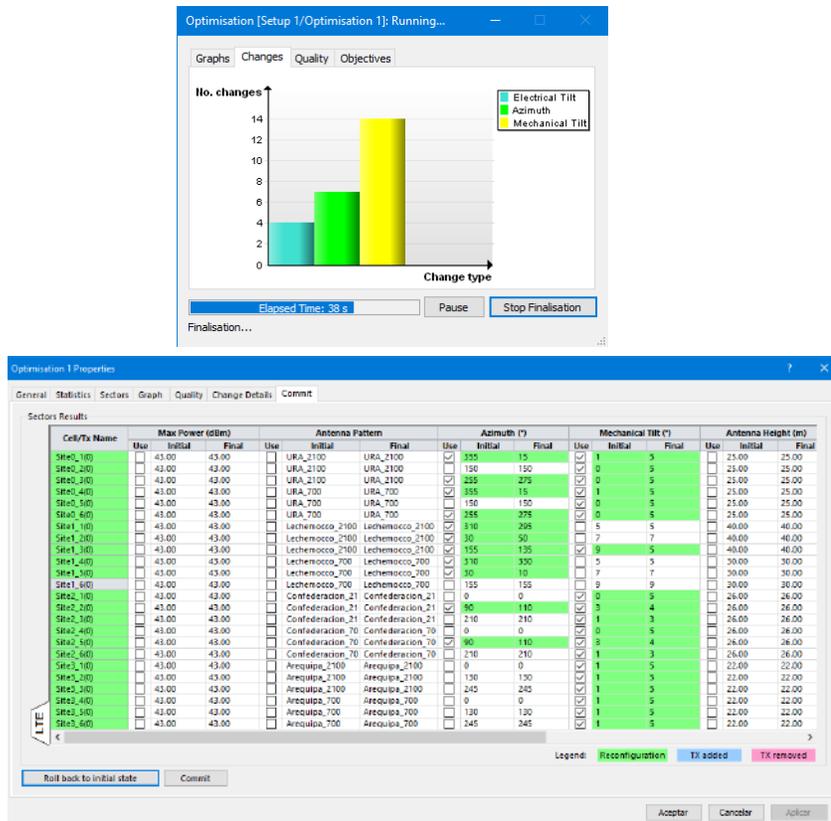
El objetivo fundamental de ACP es mejorar el despliegue de la red actual reconfigurando los principales parámetros controlables por el operador: *tilt* eléctrico, *tilt* mecánico y las potencias piloto para cada celda. También puede utilizarse en las primeras fases de planificación de la red, permitiendo la elección de la antena, incluidos el azimut, la altura y el *tilt* mecánica. La herramienta

ACP no sólo tiene en cuenta la optimización del transmisor, sino también la del repetidor y la antena remota. Por último, la exposición a los campos electromagnéticos (CEM) producidos por la red puede medirse y optimizarse con ACP. Esto permite elegir la mejor ubicación para los nuevos transmisores y optimizar la potencia y la disposición de las antenas para reducir la exposición excesiva a CEM en las redes ya existentes (Iglesias, 2016).

Para el caso de la red móvil LTE-Advanced existente y con sus parámetros establecidos se inicia su optimización empleando herramienta ACP de Atoll, con la finalidad de lograr mejores resultados de su desempeño, los parámetros variados son presentados por la figura 5.26.

Figura 5.26

Visualización de cambios de parámetros en las antenas



Fuente: Software Atoll

5.4 Análisis de la red LTE-Advanced existente optimizada

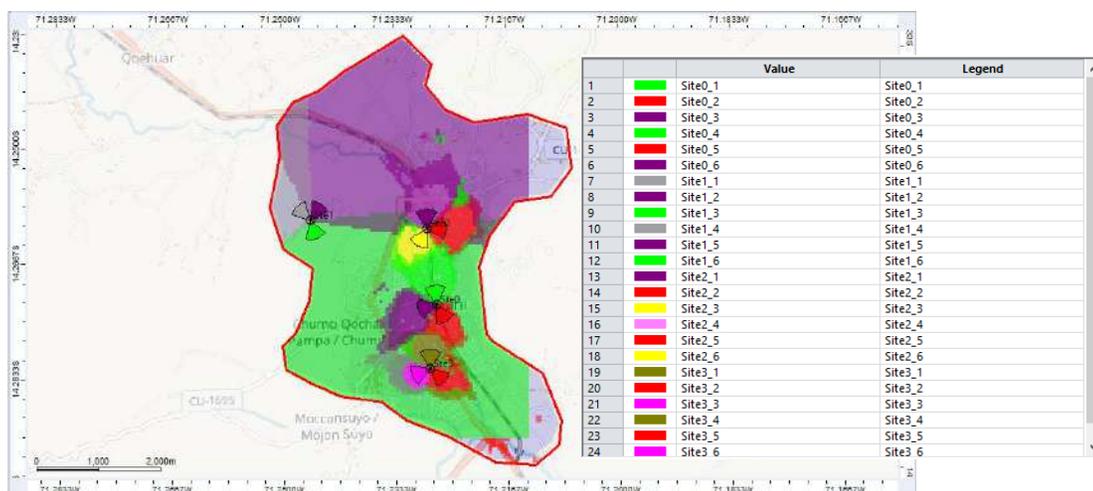
En este apartado y ya con la red móvil LTE-Advanced existente optimizada se realizan ciertas predicciones (simulaciones) de cobertura que corroboren la optimización realizada, tomando en consideración que estos pronósticos están enmarcados dentro del entorno urbano del distrito de Sicuani y fundamentadas en el modelo SPM, para la descripción se hace uso de las tablas 3.11, 3.12 y 3.13. A continuación, se presentan las siguientes simulaciones:

5.4.1 Análisis de predicciones de cobertura de la red sin mapa de tráfico

1. Cobertura por Transmisor: Se puede determinar con esta predicción que transmisor por cada píxel del mapa en la zona de estudio cuenta con la mejor cobertura (Maltez & Valle, 2019), como se muestra en la figura 5.27, donde se quiere garantizar la cobertura de la extensión urbana de investigación que corresponde a Sicuani, en el que se espera que no se tengan áreas sin cobertura. Dichos resultados son plasmados a continuación.

Figura 5.27

Cobertura por transmisor

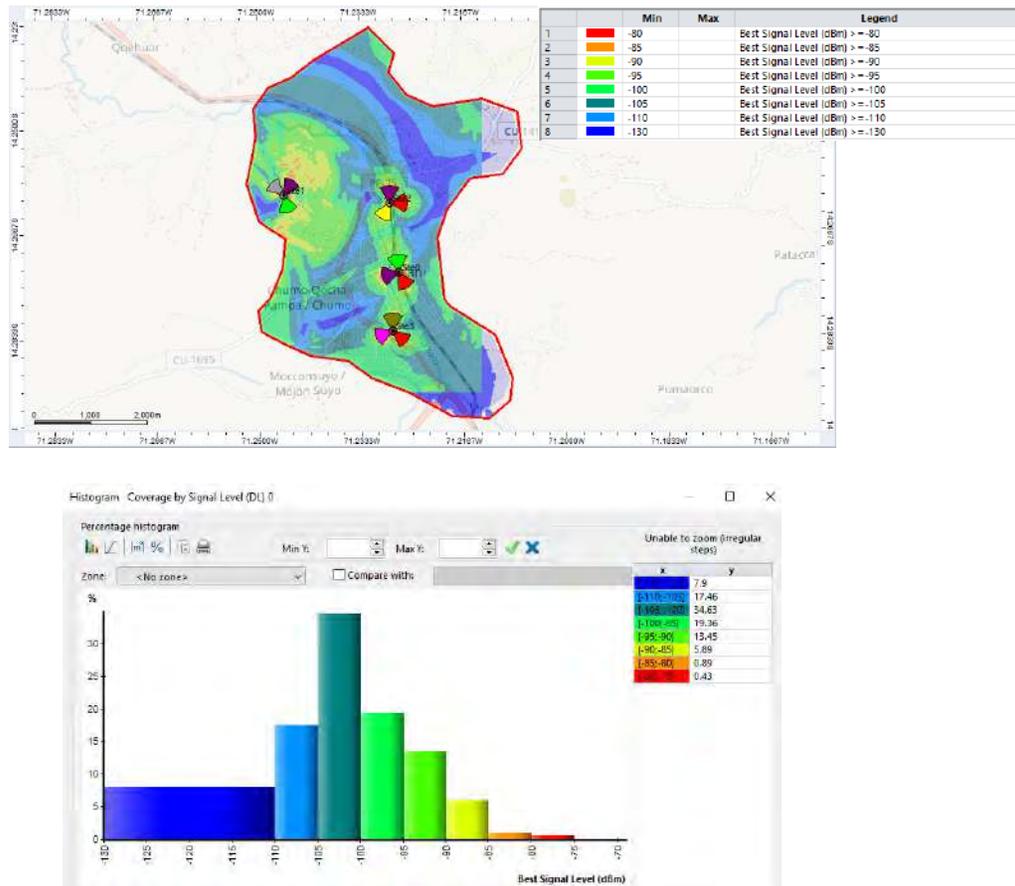


Fuente: Software Atoll

2. Cobertura por nivel de señal: Sin tomar en consideración el transmisor al que pertenece la potencia, la predicción actual describe la potencia en cada píxel del mapa de la región de investigación. (Maltez & Valle, 2019). Los resultados mostrados en la figura 5.28 de esta simulación, son apropiados para visualizar si se tienen áreas del mapa con ausencia y/o deficiencias de señal.

Figura 5.28

Cobertura por nivel de señal



Fuente: Software Atoll

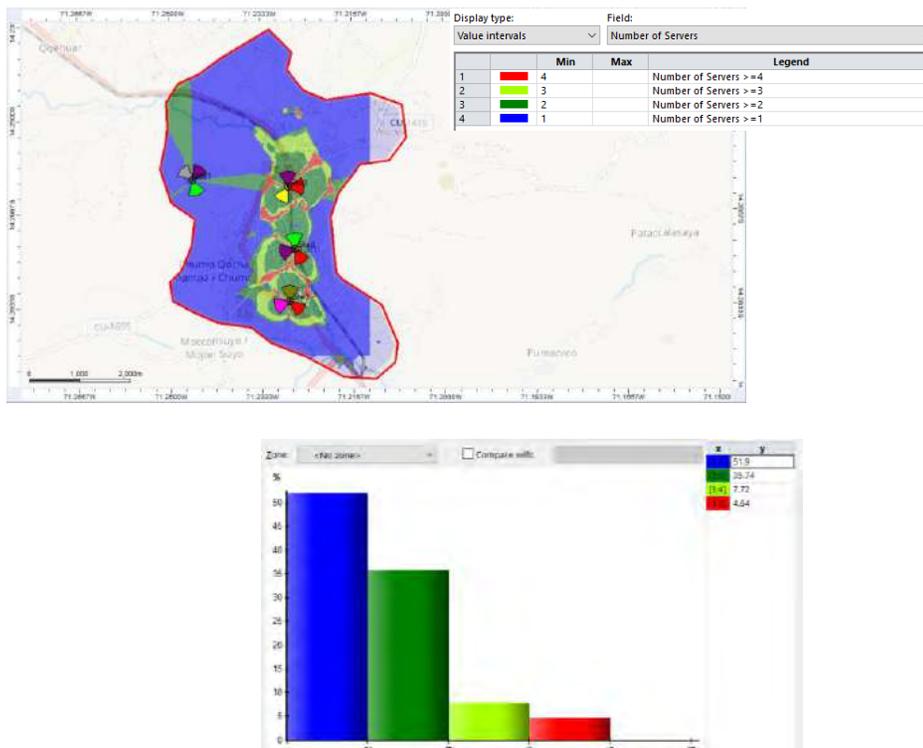
Los resultados ilustrados en la anterior figura 5.28, detalla la cobertura por nivel de señal, donde el 1.32%, son niveles entre -75 a -85 dBm, que serían condiciones de muy buenos a buenos,

también un 19.34% está entre -85 a -95dBm, estos serían niveles óptimos, un 53.99%, comprendido entre -95 a -105 dBm que son niveles de regular a bajo, un 25.36% entre -105 a -130 dBm que serían niveles de muy bajo a crítico.

3. Zonas solapadas: Esta predicción según Maltez & Valle (2019), posibilita calcular los niveles de señal proporcionados por dos o más transmisores en una determinada área. En tanto que sea menor el número de trasmisores dentro del área de cobertura, la interferencia entre estaciones cercanas será menor y para evitar estas interferencias, debe aplicarse una adecuada optimización de la red, incluida una planificación apropiada de frecuencias, asignación de celdas vecinas, entre otros.

Figura 5.29

Predicción de zonas solapadas



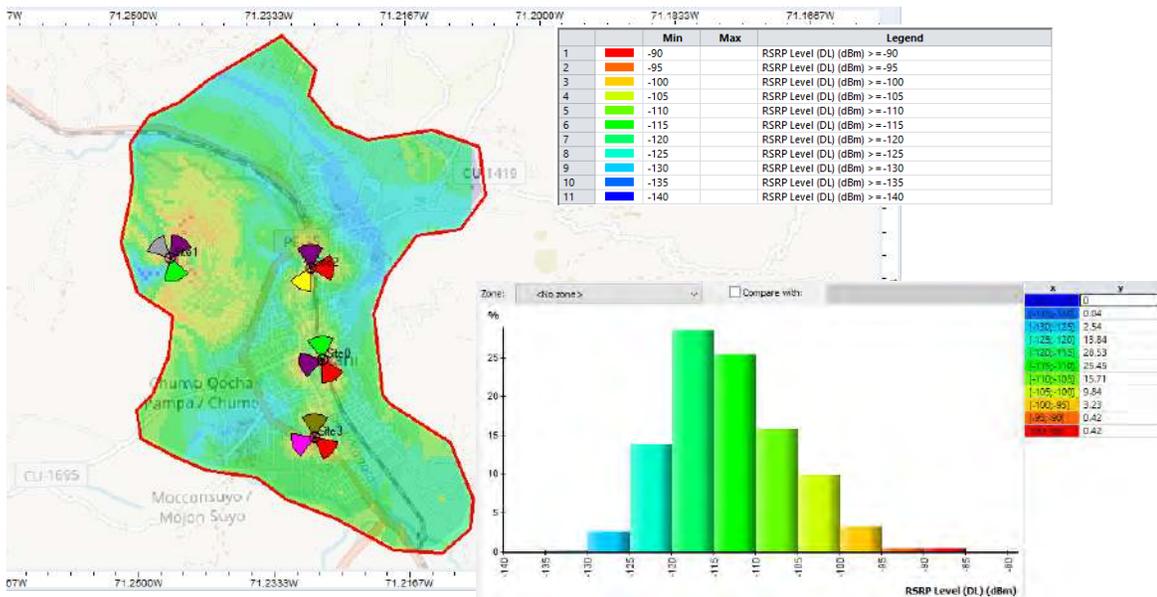
Fuente: Software Atoll

En base a la predicción mostrada en la figura anterior, podemos decir que se tienen un nivel de interferencia entre los transmisores del área de cobertura de estudio. Donde se presenta un 51.9% de *overlapping* de 1 a 2 transmisores, 35.74 % de 2 a 3 transmisores, de 3 a 4 transmisores es de 7.72 % y finalmente para el caso de transmisores de 4 a 5 se tiene 4.64% de *overlapping*.

4. Predicción RSRP: La potencia promedio recibida se observa en la figura 5.30 a través del histograma y el mapa cartográfico de potencias, donde, el 0.84% indica a los niveles entre -65 a -95dBm, que serían condiciones muy buenas a buenas, también tenemos un 13.07%, entre -95 a -105dBm, estas serían niveles de óptimo a regular, un 41.16%, oscila entre -105 a -115dBm, considerado como niveles de bajo a muy bajo, y finalmente en el rango -115 a -140dBm comprendido de muy bajo a crítico se tiene 44.93% total del mapa que se ilustra a continuación.

Figura 5.30

Predicción de RSRP



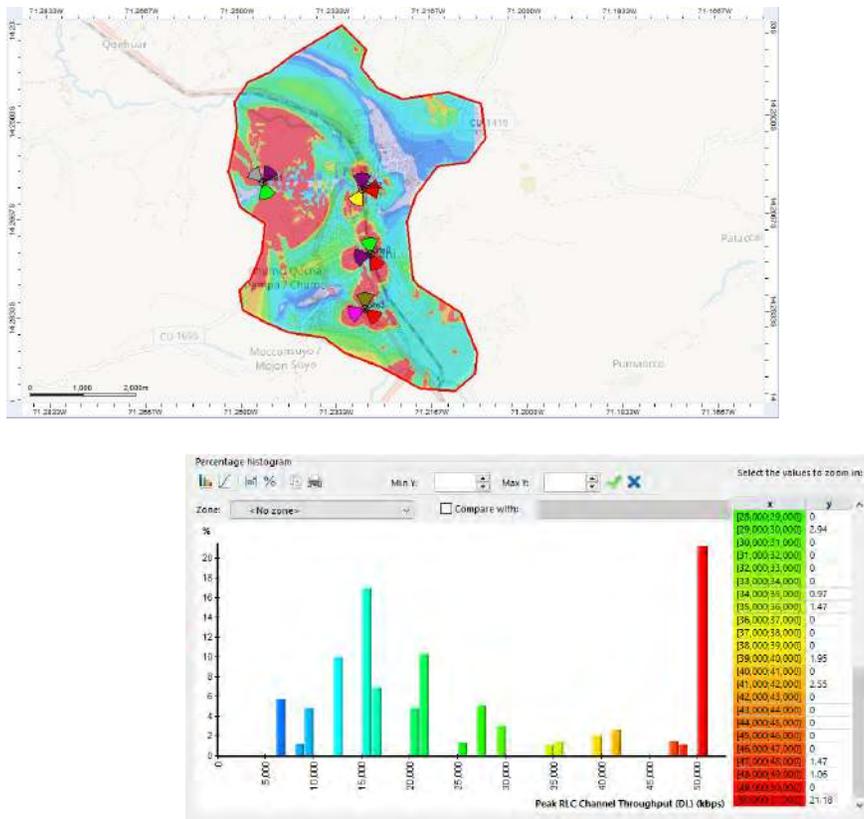
Fuente: Software Atoll

5.4.2 Análisis predicciones de la red que dependen del tráfico

5. Cobertura por nivel de *throughput en downlink*: Se muestra a partir de la ilustración en figura 5.31, el resultado de esta predicción, se aprecia que a una tasa de transferencia menores a 10Mbps de datos corresponde el 11.49% del mapa, y la tasa entre los 10Mbps a 20Mbps le corresponde un 33.7% del mapa, el 24.16% corresponde a la tasa entre los 20 Mbps y 30 Mbps, un 4.39% corresponde a la tasa entre los 30 Mbps y 40 Mbps, un 5.08% está comprendido entre 40 Mbps y 50 Mbps de *throughput* efectivo, y finalmente un 21.18% presenta tasas de transferencia de datos superiores a 50 Mbps.

Figura 5.31

Cobertura por nivel de throughput en dowlink

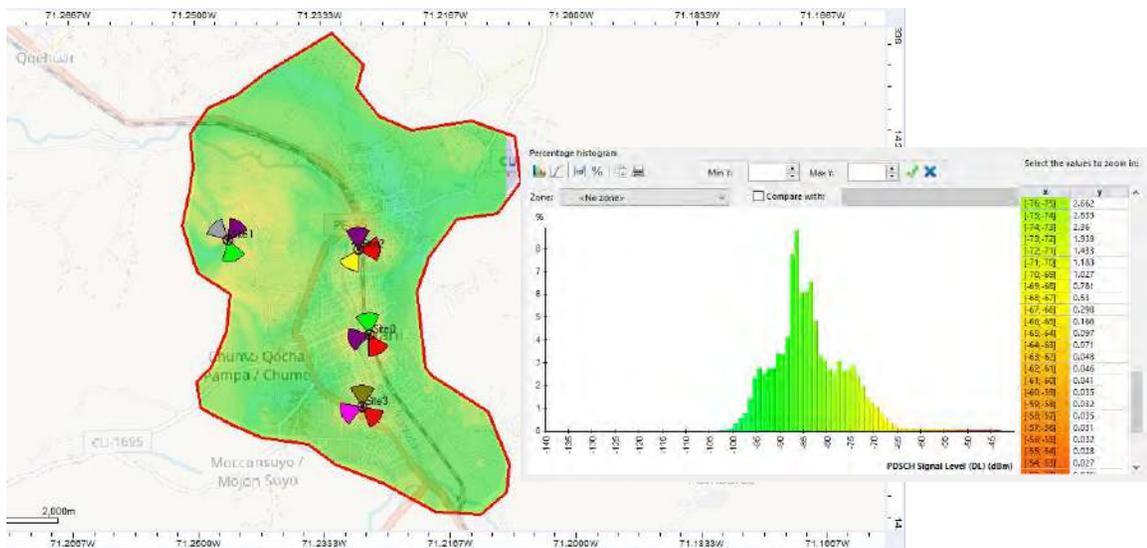


Fuente: Software Atoll

6. Potencia del canal PDSCH en *downlink*: Con esta predicción según detalles presentados en la ilustración de la figura 5.32, se alcanza a representar la potencia de señal que cada píxel del mapa en la zona de estudio llega a recibir, el rojo denota mayor intensidad de potencia y el azul menor. *PDSCH (Physical Downlink Shared Channel)* es una señal crucial debido a que tiene la capacidad de transmitir información de aviso de la red y datos del usuario (Iglesias, 2016).

Figura 5.32

Potencia del canal PDSCH - downlink



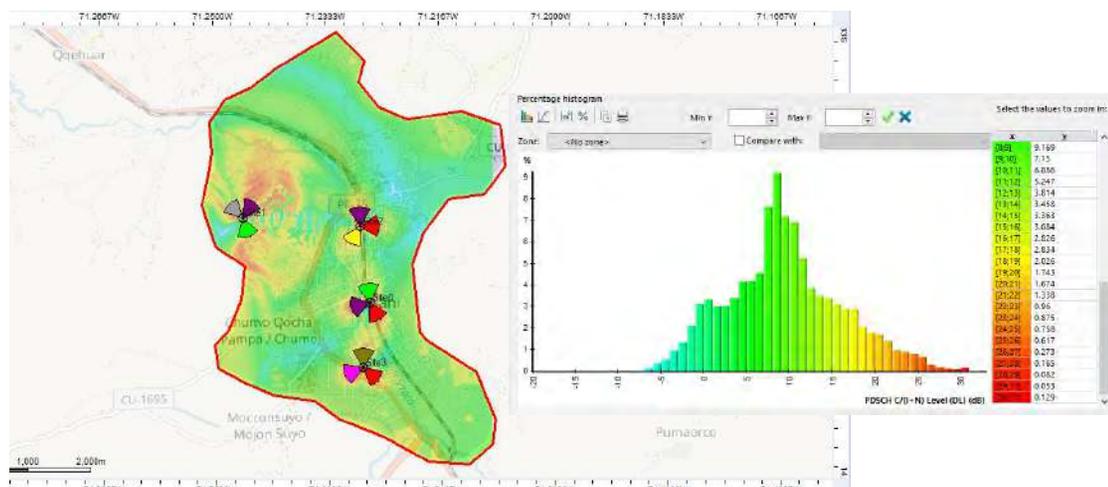
Fuente: Software Atoll

A partir de los resultados que son presentados por la figura 5.32, se aprecia que el 0.308% está en el nivel excelente (≥ -60 dBm), en tanto que el 3.105% pertenece al rango de muy bueno (-70 to -60 dBm), mientras que el 23.25% al nivel de bueno (-80 to -70 dBm), un 53.836% está en el nivel óptimo (-90 to -80 dBm), un 19.404% a la escala de regular (-100 to -90 dBm), y finalmente un 0.097% está comprendido en el nivel bajo (-110 to -100 dBm).

- Predicción $C/(I+N)$ para PDSCH en *downlink*: Para cada píxel del mapa, la predicción $C/(I+N)$ prevista en el canal PDSCH evidencia la relación entre la señal utilizable con las interferencias y el ruido. Lo cual ayuda a verificar si existe un nivel de señal de interferencia antes de desplegar el servicio, la $C/(I+N)$ será peor cuanto más azul sea, y mejor cuanto más rojo sea (Iglesias, 2016).

Figura 5.33

*Predicción $C/(I+N)$ - PDSCH *downlink**



Fuente: Software Atoll

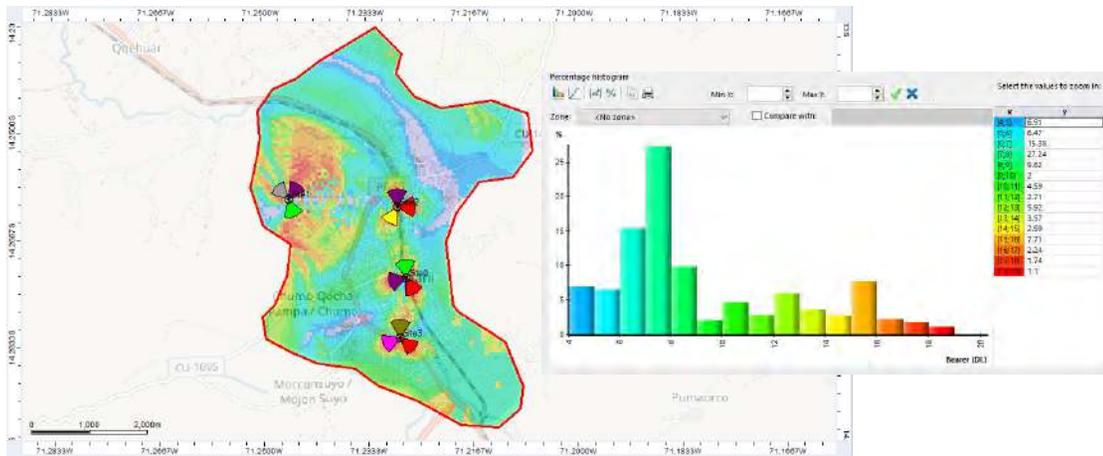
Los resultados que se aprecian de la figura 5.33 anterior muestran que un 6.924% está en el nivel excelente ($\geq 20\text{dB}$), un 12.513% como nivel muy bueno (15 to 20dB), 22.768% corresponde a la escala de bueno (10 to 15dB), el 32.596% al nivel óptimo (5 to 10dB), y un 16.789% comprende la escala de regular (0 to 5dB), en tanto que un 7.987% está en el rango de bajo (-5 to 0dB), finalmente un 0.423% pertenece al nivel al nivel muy bajo (-10 to -5dB).

- Área de servicio para *downlink*: En la predicción cada píxel del mapa representa con un color el tipo de servicio portador que se puede adquirir, donde muestra los mejores servicios portadores disponibles en función de $C/(I+N)$, el servicio portador será mejor,

cuanto más cerca se esté del transmisor y más efectiva espectralmente será la modulación, pero menos robusta (Iglesias, 2016).

Figura 5.34

Área de servicio en downlink con mejora



Fuente: Software Atoll

Para la presente simulación cuyos resultados son presentados en la figura 5.34, se tiene que para una modulación 64QAM se tiene una cobertura de 32.17% que corresponde a zonas cercanas a los eNodeBs, entre tanto para la modulación 16QAM presenta un 39.06% de la cobertura que serían áreas intermedias, finalmente para los bordes de las estaciones base con una modulación QPSK la cobertura que se presenta es del 28.77%.

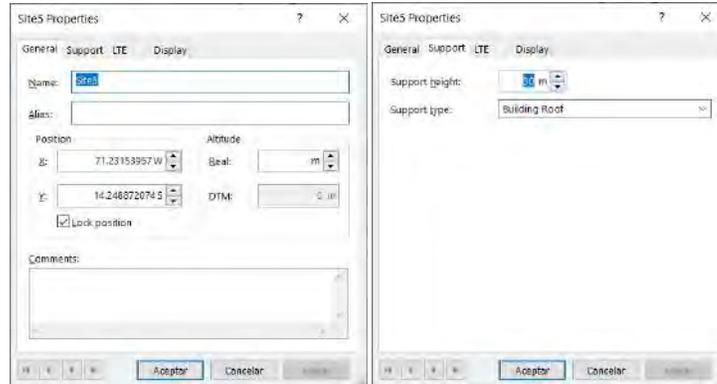
5.5 Propuesta de mejora del diseño actual

Como se pudo apreciar en base al resultado de las predicciones (simulaciones) detalladas anteriormente, la sola optimización de la red móvil LTE-Advanced existente no garantiza una mejora significativa en cuanto a la calidad de servicio de la red, motivo por el cual se plantea agregar nuevos eNodeBs al diseño actual con la finalidad de mejorar de esta manera el desempeño de los indicadores. Las siguientes acciones se llevan a cabo en la segunda fase de este proyecto.

1. Se adiciona 2 nuevos eNodeB de acuerdo a los resultados del capítulo anterior, estos nuevos sites tiene una distancia superior a 1.2 Km de las existentes.

Figura 5.35

Configuración de nuevos eNodeBs (Site5)

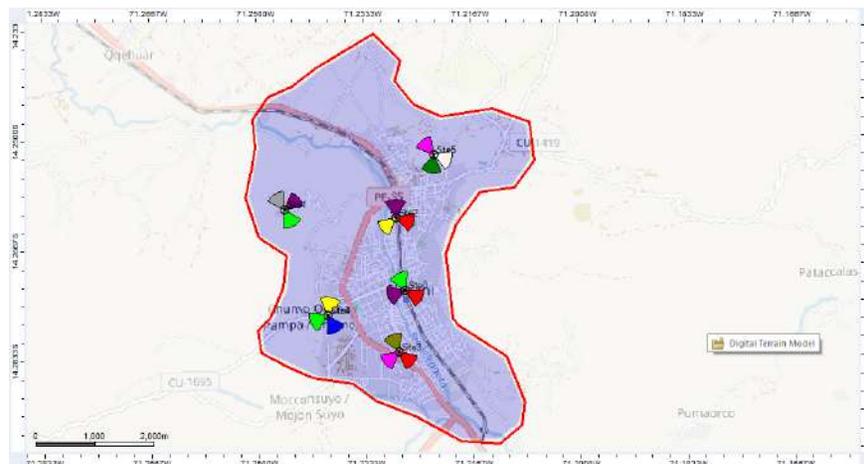


Fuente: Software Atoll

Se considerará que ambas estaciones nuevas tengan una altura de 28 metros, donde la estación base Site 4 tiene las coordenadas: -71.239210297 W, -14.276702599 S y la estación base Site 5 se ubica a: -71.222499021 W, -14.252426034 S. Luego se procede con la asignación de los 6 transmisores por cada estación base nueva, como muestra la figura 5.36:

Figura 5.36

Ubicación de nuevos eNodeBs

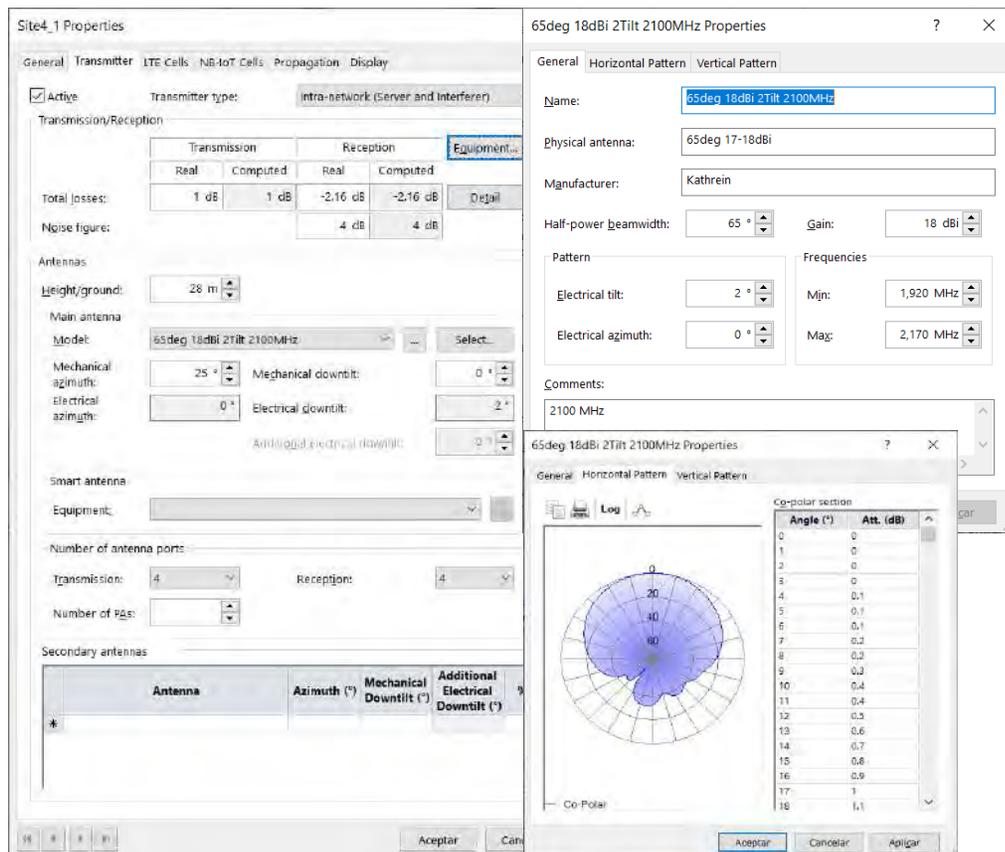


Fuente: Software Atoll

2. Se configuran los transmisores, la altura de la antena se asigna en 28 metros, el azimut de las antenas es de 20°, 145° y 240° para la estación base Site 4, mientras para la Site5 son de 90°,180° y 300° respectivamente, detalles presentados por la figura 5.37. Por otra parte, las antenas que operan en la frecuencia de 1920Mhz-2170MHz presentan una ganancia de 18dBi y las que operan en la frecuencia de 698Mhz- 894MHz tienen una ganancia de 16.8dBi, con un TM de 0° y TE de 2°, todos estos parámetros son estándares tomados del mismo software de Atoll.

Figura 5.37

Configuración de transmisores para nuevos eNodeB



Fuente: Software Atoll

3. Al igual que en pasos descritos anteriormente, en el *software Atoll* se procede a implementar la técnica MU-MIMO para cada uno de los casos de la celda principal y secundaria adicionadas al diseño, así como también se estable su respectiva agregación de portadoras (*Carrier aggregation*) en los dos sites nuevos, con lo cual quedaría establecido de forma correcta todos los parámetros iniciales correspondientes.

Figura 5.38

Implementación de MU-MIMO y Carrier aggregation

Parameter	Site5_1(0)	Site5_4(0)
Name	Site5_1(0)	Site5_4(0)
ID		
Active	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Order	1	1
Layer	Macro Layer	Macro Layer
Cell Type	LTE-A PCell	LTE-A SCell DL;LTE-A SCell
Frequency Band	E-UTRA Band 4 - 2100MHz	E-UTRA Band 28 - 700MHz
Channel Number	2,050	9,735
Channel Allocation Status	Allocated	Allocated
Physical Cell ID Domain		
Physical Cell ID	89	90
PSS ID	2	0
SSS ID	29	30
PSS ID Status	Allocated	Allocated
SSS ID Status	Allocated	Allocated
Reuse Distance (m)		
Max Power (dBm)	43	43
RS EPRE per Port (dBm)	12.4	13.7
SS EPRE Offset / RS (dB)	0	0
PBCH EPRE Offset / RS (dB)	0	0
PDCCH EPRE Offset / RS (dB)	0	0
PDSCH EPRE Offset / RS (dB)	0	0
PMCH EPRE Offset / RS (dB)	0	0
Min RSRP (dBm)	-140	-140
Cell Selection Threshold (dB)	0	0
Cell Individual Offset (dB)	0	0
Handover Margin (dB)	0	0
Cell Edge Margin (dB)	0	0
Fractional Power Control Factor	1	1
Max Noise Rise (UL) (dB)	6	6
Max PUSCH C/I+N (dB)	20	20
Interference Coordination Support		
Frame Configuration		
TDD Subframe Configuration		
Almost Blank Subframe (ABS) Pattern		
Reception Equipment	Default Cell Equipment	Default Cell Equipment
Scheduler	Proportional Fair	Proportional Fair
Diversity Support (DL)	MU-MIMO	MU-MIMO

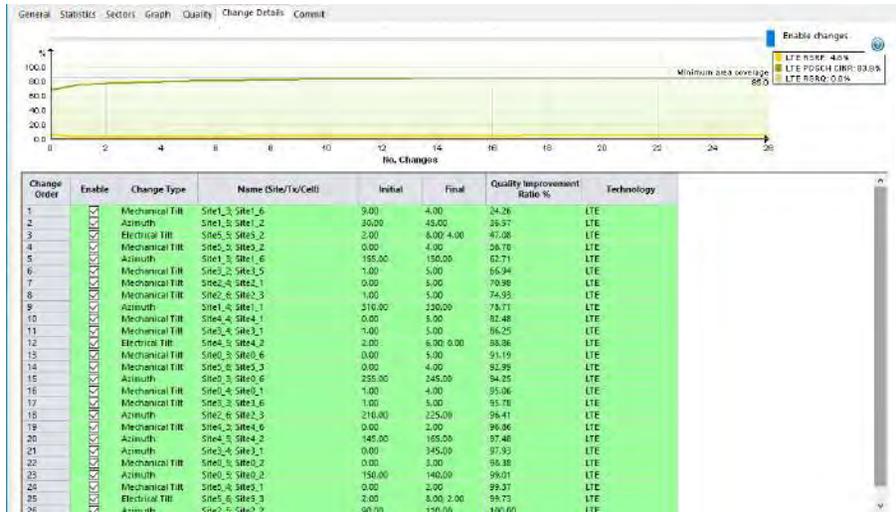
Fuente: Software Atoll

5.6 Optimización de la red LTE-Advanced mejorada con ACP

En esta etapa y ya con los nuevos eNodeBs incorporadas al diseño de la red, se procede a realizar la optimización haciendo uso de la herramienta *ACP (Automatic Cell Planning)*, con la finalidad de obtener mejores resultados en cuando a la calidad de servicio y también considerando que al agregar dos nuevos eNodeBs es de necesidad variar los parámetros de las antenas.

Figura 5.39

Cambio de parámetros de las antenas



Fuente: Software Atoll

Optimizado los parámetros de las antenas utilizando ACP, se procede a ejecutar algunas variaciones de forma manual, las cuales logran mejorar el desempeño de la red.

Figura 5.40

Parámetros finales de la red

The figure shows a screenshot of the Atoll software interface displaying a table of final antenna parameters. The table has the following columns: Active, Transmitter Type, Antenna, DX (m), DY (m), Use Absolute Coordinates, Longitude, Latitude, Height (m), Azimuth (°), and Mechanical DownTilt (°). The table contains 26 rows of data, each representing an antenna configuration.

Active	Transmitter Type	Antenna	DX (m)	DY (m)	Use Absolute Coordinates	Longitude	Latitude	Height (m)	Azimuth (°)	Mechanical DownTilt (°)
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	URA_700	0	0	<input type="checkbox"/>	71.227175W	14.273033S	25	250	5
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Lechemocco_2100	0	0	<input type="checkbox"/>	71.245808W	14.260664S	40	320	5
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Lechemocco_2100	0	0	<input type="checkbox"/>	71.245808W	14.260664S	40	45	7
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Lechemocco_2100	0	0	<input type="checkbox"/>	71.245808W	14.260664S	40	145	4
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Lechemocco_700	0	0	<input type="checkbox"/>	71.245808W	14.260664S	40	320	5
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Lechemocco_700	0	0	<input type="checkbox"/>	71.245808W	14.260664S	40	45	7
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Lechemocco_700	0	0	<input type="checkbox"/>	71.245808W	14.260664S	40	145	4
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Confederacion_2100	0	0	<input type="checkbox"/>	71.228492W	14.262025S	26	0	5
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Confederacion_2100	0	0	<input type="checkbox"/>	71.228492W	14.262025S	26	110	3
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Confederacion_2100	0	0	<input type="checkbox"/>	71.228492W	14.262025S	26	230	5
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Confederacion_700	0	0	<input type="checkbox"/>	71.228492W	14.262025S	26	0	5
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Confederacion_700	0	0	<input type="checkbox"/>	71.228492W	14.262025S	26	110	3
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Confederacion_700	0	0	<input type="checkbox"/>	71.228492W	14.262025S	26	230	5
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Arequipe_2100	0	0	<input type="checkbox"/>	71.228239W	14.262347S	22	335	5
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Arequipe_2100	0	0	<input type="checkbox"/>	71.228239W	14.262347S	22	130	5
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Arequipe_700	0	0	<input type="checkbox"/>	71.228239W	14.262347S	22	230	5
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Arequipe_700	0	0	<input type="checkbox"/>	71.228239W	14.262347S	22	335	5
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Arequipe_700	0	0	<input type="checkbox"/>	71.228239W	14.262347S	22	130	5
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	Arequipe_700	0	0	<input type="checkbox"/>	71.228239W	14.262347S	22	230	5
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	65deg 18dB 2Tilt 2100MHz	0	0	<input type="checkbox"/>	71.2392102W	14.27670259S	28	10	4
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	65deg 18dB 0Tilt 2100MHz	0	0	<input type="checkbox"/>	71.2392102W	14.27670259S	28	150	0
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	65deg 18dB 0Tilt 2100MHz	0	0	<input type="checkbox"/>	71.2392102W	14.27670259S	28	245	4
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	65deg 17dB 6Tilt 700/800MHz	0	0	<input type="checkbox"/>	71.2392102W	14.27670259S	28	10	4
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	65deg 17dB 6Tilt 700/800MHz	0	0	<input type="checkbox"/>	71.2392102W	14.27670259S	28	150	0
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	65deg 17dB 2Tilt 700/800MHz	0	0	<input type="checkbox"/>	71.2392102W	14.27670259S	28	245	4
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	65deg 18dB 2Tilt 2100MHz	0	0	<input type="checkbox"/>	71.22249902	14.25242603	28	110	2
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	65deg 18dB 4Tilt 2100MHz	0	0	<input type="checkbox"/>	71.22249902	14.25242603	28	190	4
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	65deg 18dB 2Tilt 2100MHz	0	0	<input type="checkbox"/>	71.22249902	14.25242603	28	320	4
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	65deg 17dB 6Tilt 700/800MHz	0	0	<input type="checkbox"/>	71.22249902	14.25242603	28	110	2
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	65deg 17dB 6Tilt 700/800MHz	0	0	<input type="checkbox"/>	71.22249902	14.25242603	28	190	4
<input checked="" type="checkbox"/>	Intra-net	65deg 17dB 4Tilt 700/800MHz	0	0	<input type="checkbox"/>	71.22249902	14.25242603	28	320	4

Fuente: Software Atoll

5.7 Análisis de la red LTE-Advanced con mejora optimizada

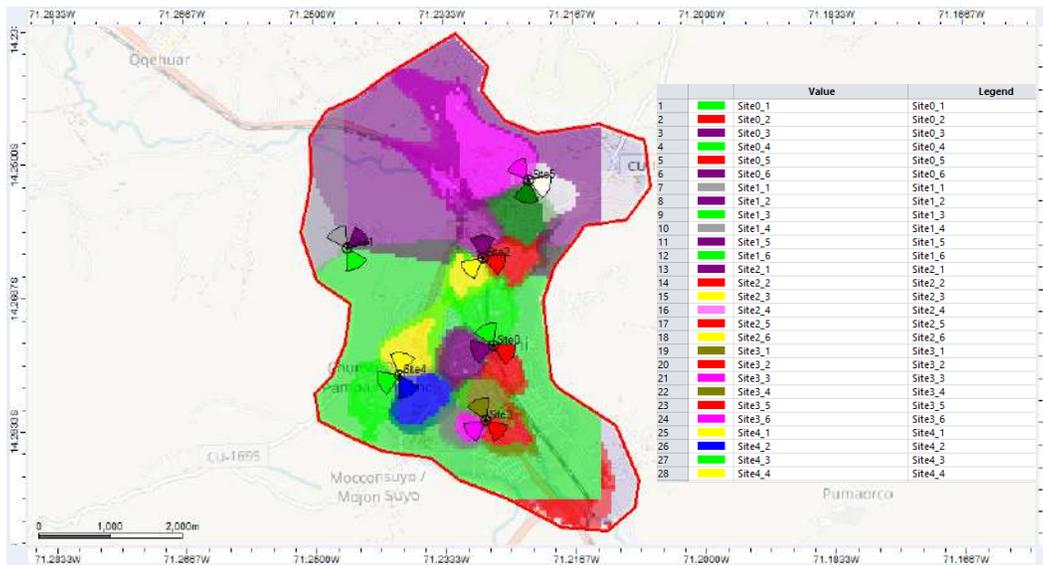
Para esta etapa se desarrollan las predicciones para la red móvil LTE-Advanced, con la agregación de los dos nuevos eNodeB (según cálculos detallados en el capítulo anterior), así como su optimización. A continuación, se presentan las siguientes predicciones:

5.7.1 Análisis predicciones de cobertura de la red sin mapa de tráfico

1. Cobertura por transmisor: Al igual que la predicción anterior por transmisor, en este caso según detalla el resultado de la figura 5.4, también se quiere garantizar la cobertura de la extensión urbana de investigación que corresponde a Sicuani, en el que se espera que no se tengan áreas sin cobertura, dichos resultados son plasmados a continuación.

Figura 5.41

Cobertura por transmisor con mejora



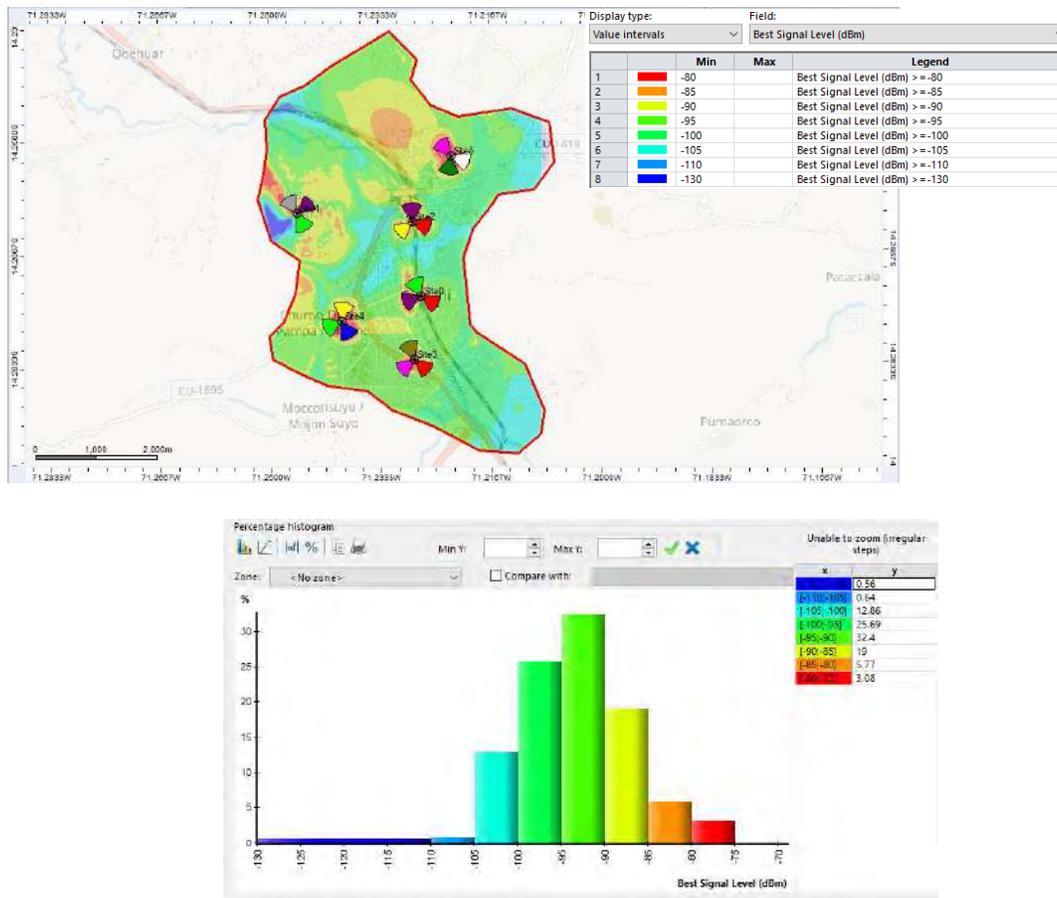
Fuente: Software Atoll

2. Cobertura por nivel de señal: Para el caso de esta predicción y según resultados detallados por la figura 5.42, se aprecia que 8.85% oscila en el rango -75 a -85dBm,

que indican niveles de muy buenos a buenos, también tenemos un 51.4%, que se encuentra entre -85 a -95dBm, que serían niveles óptimos, un 38.55% oscila de -95 a -105dBm, son niveles de regula a bajo, finalmente un 1.2% comprendido de -105 a -130dBm, que vendría a ser los niveles de muy bajo a crítico.

Figura 5.42

Cobertura por nivel de señal con mejora



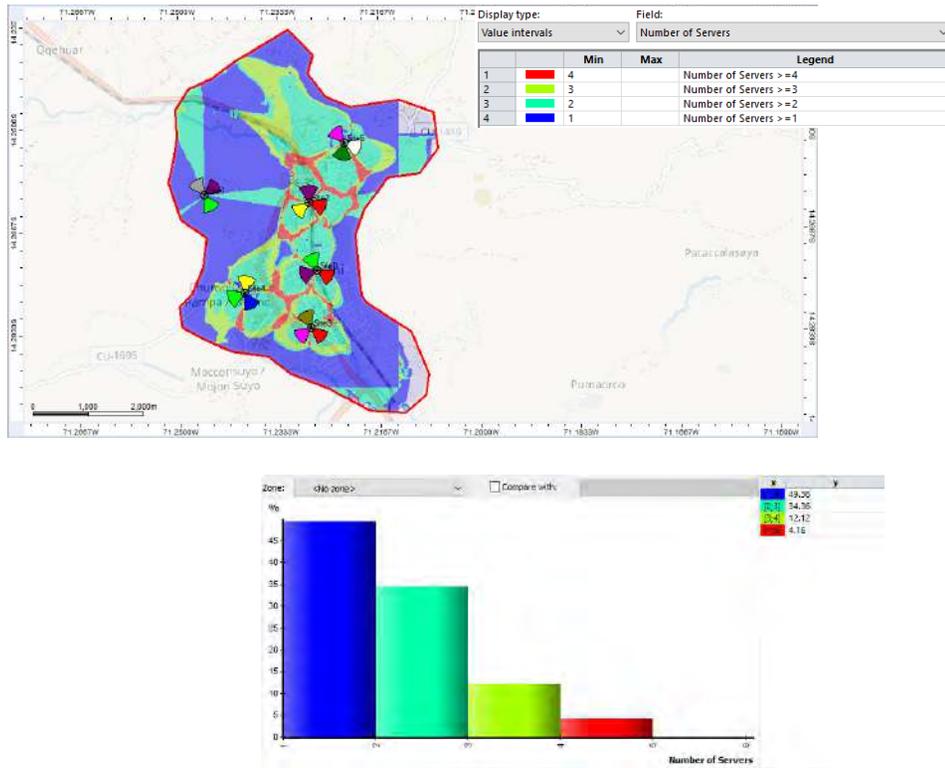
Fuente: Software Atoll

3. Zonas solapadas: Con los resultados plasmados por la figura 5.43, lo cual no da una idea de referencia sobre la interferencia que se llega a presentar en el área de estudio a raíz de la presencia de más de un transmisor, se aprecia los siguientes valores de

overlapping; un 49.36% para el caso de 1 a 2 transmisores, luego se tiene un 34.36% de 2 a 3 transmisores, seguidamente un 12.12% de solapamiento de 3 a 4 transmisores y finalmente para el caso de 4 a 5 transistores un valor de 4.16%.

Figura 5.43

Predicción de zonas solapadas con mejora

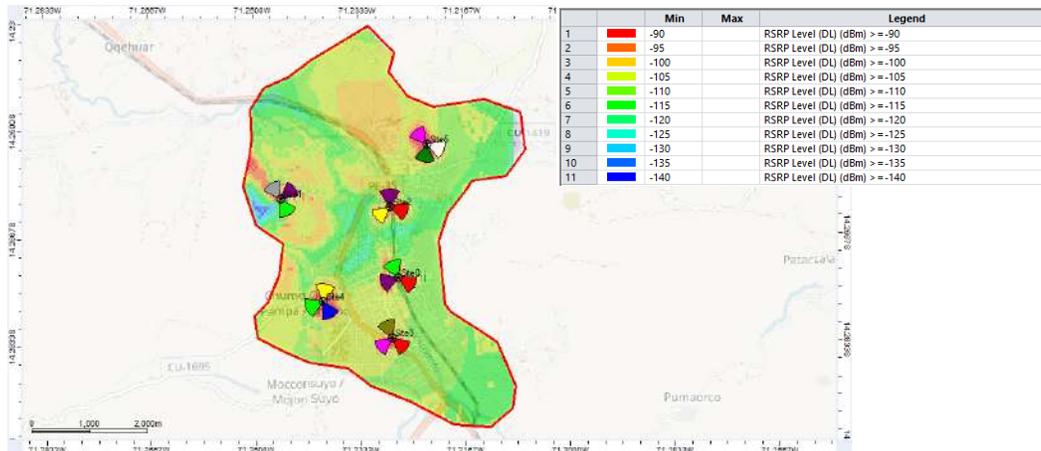


Fuente: Software Atoll

- Predicción RSRP: La potencia promedio recibida se observa en la figura 5.44 a través del histograma y el mapa cartográfico de potencias, donde, el 4.87% indica a los niveles entre -65 a -95dBm, que serían condiciones muy buenas a buenas, también tenemos un 43.8%, entre -95 a -105dBm, serían niveles óptimo a regular, y un 47.47%, oscila entre -105 a -115dBm, lo cual comprende al rango de niveles de bajo a muy bajo, finalmente en el rango -115 a -140dBm, que sería de muy bajo a crítico tenemos un 3.84%.

Figura 5.44

Predicción de RSRP con mejora



Fuente: Software Atoll

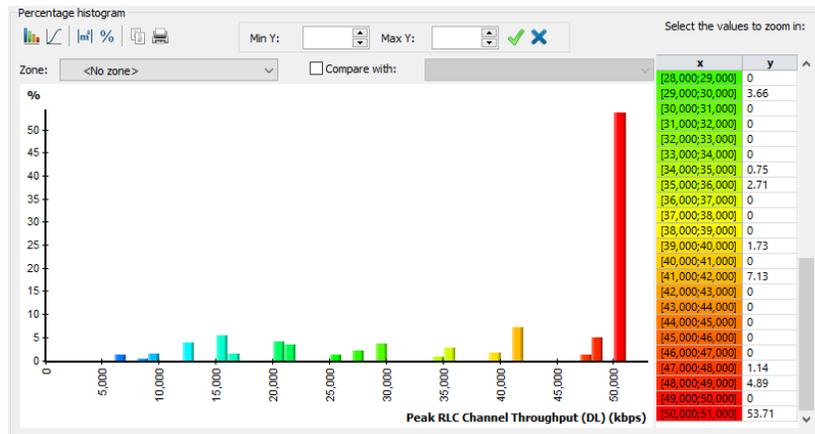
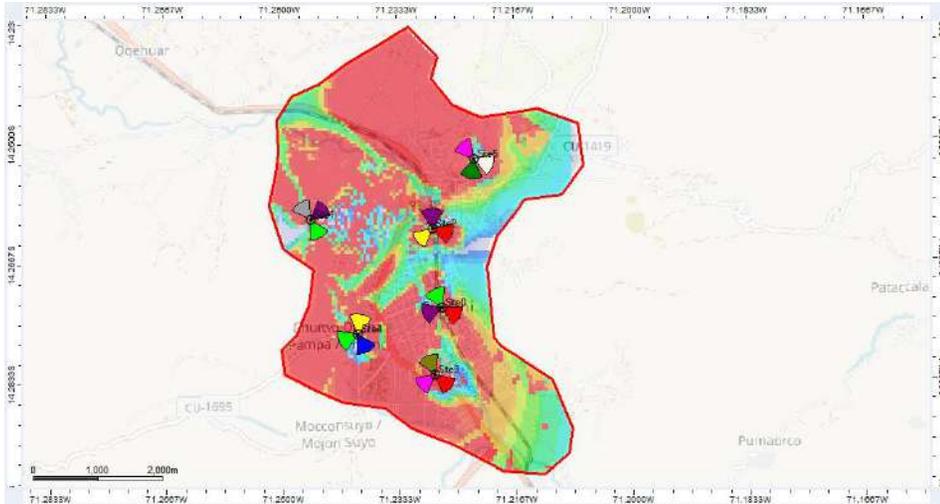
5.7.2 Análisis predicciones de la red que dependen del trafico

5. Cobertura por nivel de *throughput en downlink*: Se muestra a partir de la ilustración en figura 5.45, el resultado de esta predicción, se aprecia que a una tasa transferencia menores a 10Mbps de datos corresponde el 2.81% del mapa, y la tasa entre los 10Mbps a 20Mbps le corresponde un 10.69% del mapa, el 14.44% corresponde a la tasa de 20Mbps y 30Mbps, un 5.19% corresponde a la tasa entre los 30Mbps y 40Mbps, un

13.16% está comprendido entre 40 Mbps y 50 Mbps de *throughput* efectivo, y finalmente un 53.71% presenta tasas de transferencia de datos superiores a 50 Mbps.

Figura 5.45

Cobertura por nivel de throughput en downlink con mejora



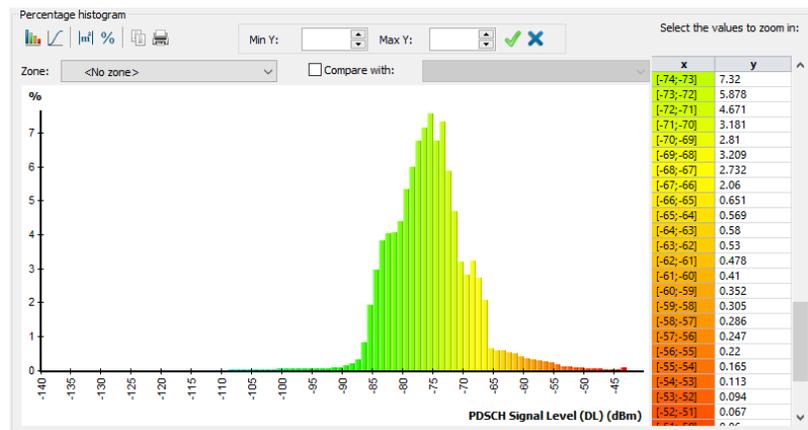
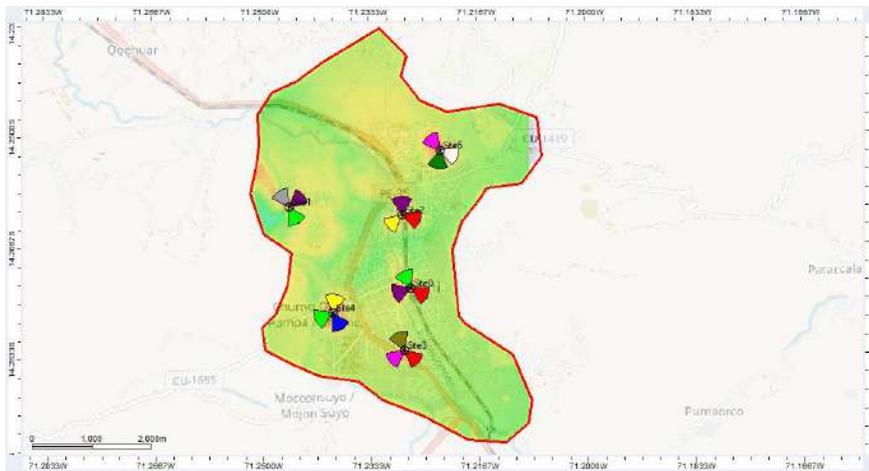
Fuente: Software Atoll

- Potencia del canal PDSCH en *downlink*: Para la predicción se presenta el resultado en la figura 5.46, donde se puede observar que el 2.181% lo comprende el nivel excelente (≥ -60 dBm), mientras que el 14.029% pertenece al rango muy bueno (-70 to -60dBm), en tanto que el 60.591% al nivel de bueno (-80 to -70dBm), un 22.559% está en el nivel

óptimo (-90 to -80dBm), un 0.516% a la escala de regular (-100 to -90dBm), y por último se tiene un 0.124% que comprende al nivel bajo (-110 to -100dBm).

Figura 5.46

Potencia de canal PDSCH – downlink con mejora



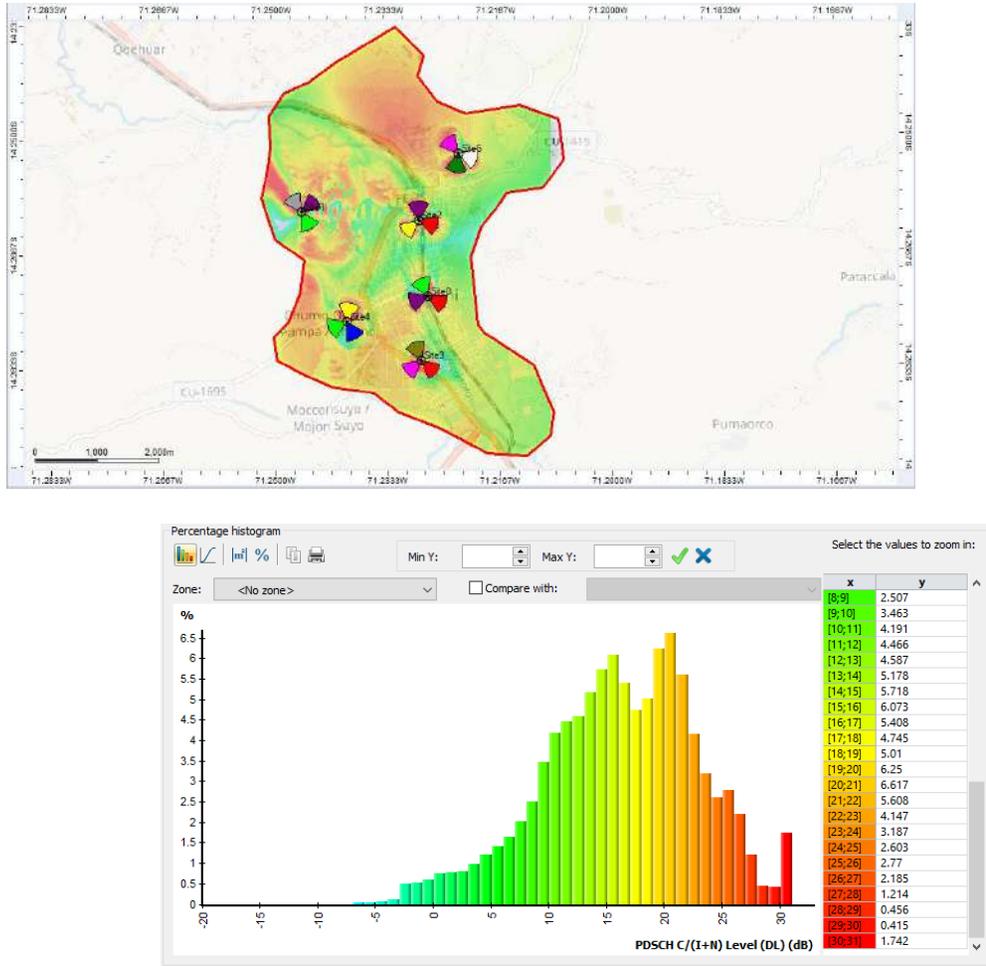
Fuente: Software Atoll

7. Predicción C/(I+N) para PDSCH en *downlink*: Con base en los resultados que son detallados en la figura 5.47, se tienen que un 30.945% se encuentra en el nivel excelente (≥ 20 dB), un 27.487% dentro del nivel muy bueno (15 to 20dB), 24.14% conforma la escala de bueno (10 to 15dB), mientras que el 11.064% pertenece al nivel óptimo (5 to

10dB), un 4.52% se encuentra en la escala de regular (0 to 5dB), y finalmente un 1.844% está en el rango de bajo (-5 to 0dB).

Figura 5.47

Predicción C/(I+N) – PDSCH downlink con mejora



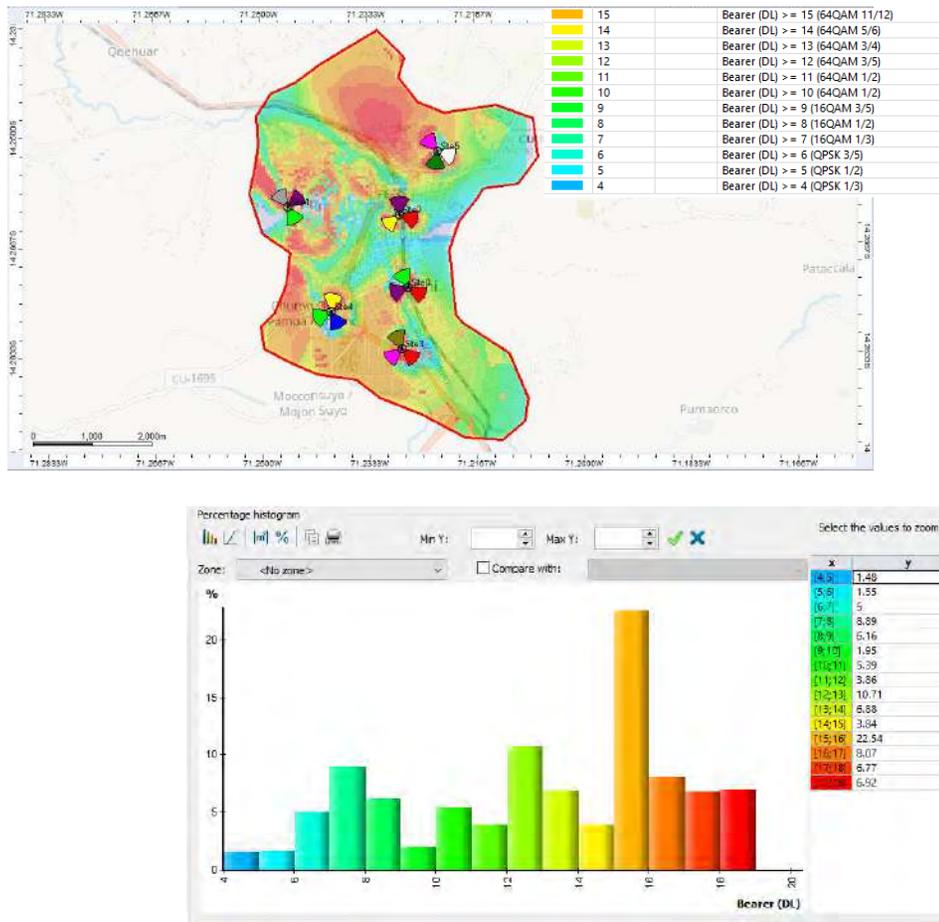
Fuente: Software Atoll

- Área de servicio para *downlink*: Para la presente simulación cuyos resultados son presentados en la figura 5.48, se tiene que para una modulación 64QAM se tiene una cobertura de 74.97% que corresponde a zonas cercanas a los eNodeBs, entre tanto para

la modulación 16QAM presenta un 17.01% de la cobertura que serían áreas intermedias, finalmente para los bordes de las estaciones base con una modulación QPSK la cobertura que se presenta es del 8.02%.

Figura 5.48

Área de servicio en downlink con mejora



Fuente: Software Atoll

Como se pudo apreciar en los resultados del análisis de las predicciones, se logra obtener mejoras significativas en el desempeño de los indicadores de la red móvil LTE-Advanced con la adición de dos eNodeBs y su optimización, con ello mejoraría la calidad de servicio de la red.

CAPÍTULO VI: RESULTADOS

En la presente sección, se realizará un análisis comparativo entre el desempeño de los indicadores más importantes descritos y evaluados en el capítulo anterior de la red móvil LTE-Advanced existente y optimizado, con los 4 eNodeBs, frente al escenario donde se llegó a incorporar 2 nuevos nodos al diseño, donde también se realizó su respectiva optimización. Para tal evaluación se hará uso de la tabla 6.1 la cual describe los rangos aceptables correspondientes a cada indicador.

Tabla 6.1

Niveles aceptables de los indicadores

N.º	Indicador	Rango Aceptable
1	<i>Signal Level</i>	> -95 dBm
2	RSRP	90% > -105 dBm
3	SINR	80% > 20 dB
4	<i>Mean throughput</i>	> 12 Mbps

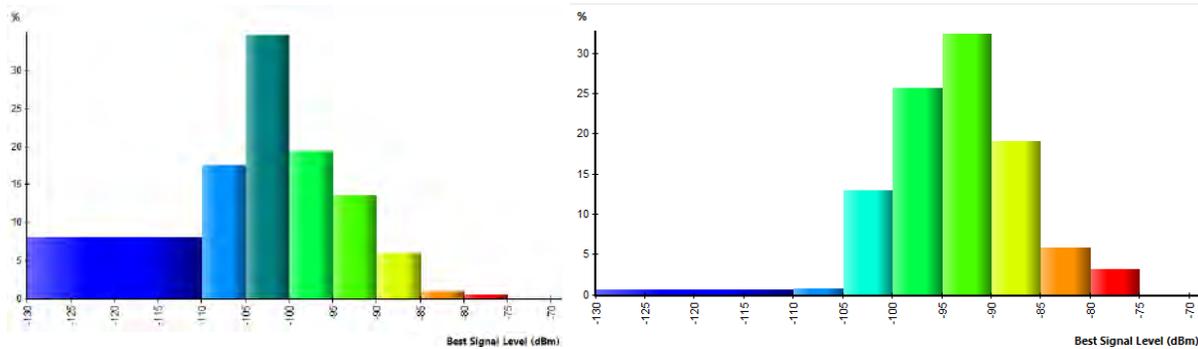
Fuente: Adaptada a la escala de indicadores elaborada por Pramono et al. (2020).

6.1 Nivel de Señal (*Signal level*)

Según detalles presentados por los histogramas de la figura 6.1, se muestra que el valor del nivel de la señal > -95 dBm en la red existente y optimizada es del 20.66% del mapa, donde se tiene un -90.07dBm con un nivel medio de señal, lo que nos indica que se tiene un desempeño regular del indicador en la zona de estudio (Sicuani). Luego de la mejora, se obtiene el nivel de señal > -95 dBm en un 60.25% del mapa, con un nivel medio de -83.22 dBm, esto indica que el aumento de los dos eNodeBs y su respectiva optimización mejoraría el nivel de señal. Además, se tiene que un 14.06% del mapa de estudio recibe un nivel de señal < -100 dBm lo cual ocurre debido al terreno accidentado, de presencia de quebradas y arboles de eucalipto en gran cantidad.

Figura 6.1

(a) Nivel de señal existente optimizado, (b) Nivel de señal mejorado



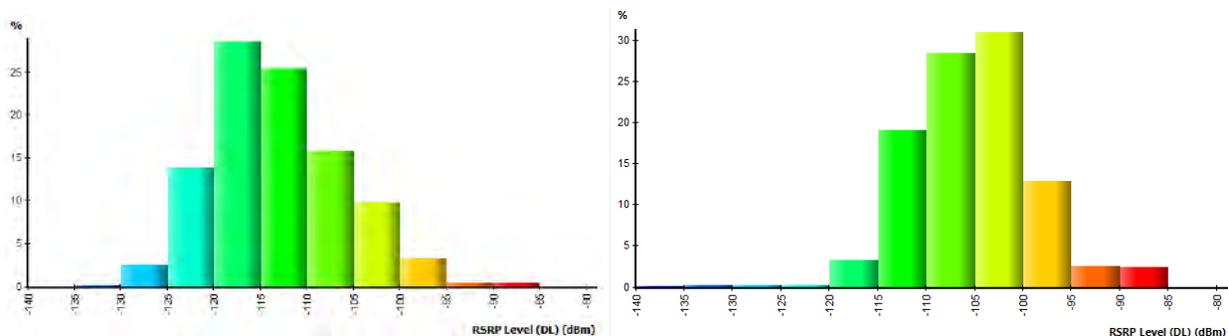
Fuente: Software Atoll

6.2 RSRP

El valor del indicador RSRP de la red móvil LTE-Advanced existente optimizada es de un 13.91% superior al umbral de -105 dBm, con un nivel medio de -113.68 dBm, lo que indica que el desempeño del indicador es aún inadecuado. Los resultados tras la mejora de la red muestran que el indicador RSRP tiene un valor porcentual del 48.67% por encima del umbral de -105 dBm, con un nivel medio de -105.13dBm, lo que deja entrever que el desempeño del indicador ha mejorado de forma significativa.

Figura 6.2

(a) RSRP existente optimizado, (b) RSRP mejorado



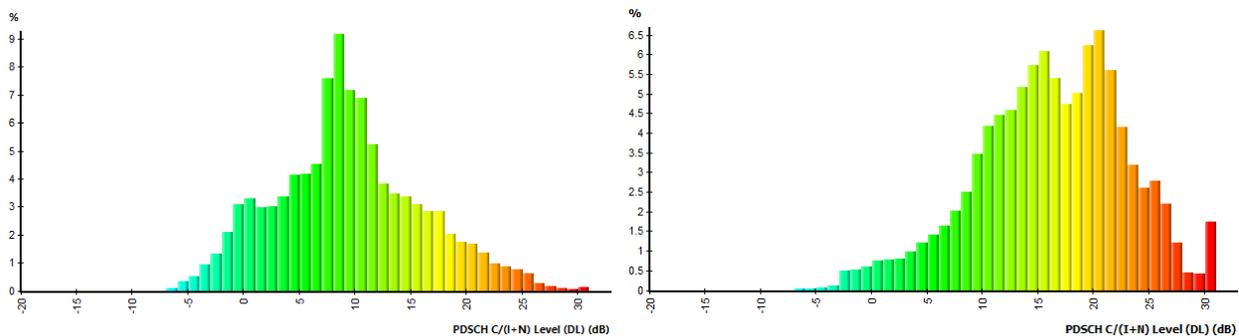
Fuente: Software Atoll

6.3 SINR

El indicador SINR de la red existente optimizada, tiene un nivel medio de 9.33 dB y el 6.924% del mapa está por encima del umbral de los 20 dB, lo que indica que el valor de distribución difiere significativamente del valor estándar del indicador, sin embargo, luego de realizar la evaluación de la mejora de la red, tras añadir dos eNodeBs a la red y realizar su respectiva optimización, la SINR de nivel medio sería de 16.17 dB, con un 30.945% por encima del umbral, pese a ello no se lograría superar el nivel estándar del indicador, sin embargo, se obtiene un incremento del 24.021% y como menciona Pramono et al. (2020). El aumento de la SINR y RSRP son directamente proporcionales se entiende que es mayor la señal de recepción, en comparación a las interferencias y el ruido.

Figura 6.3

(a) SINR existente optimizado, (b) SINR mejorado



Fuente: Software Atoll

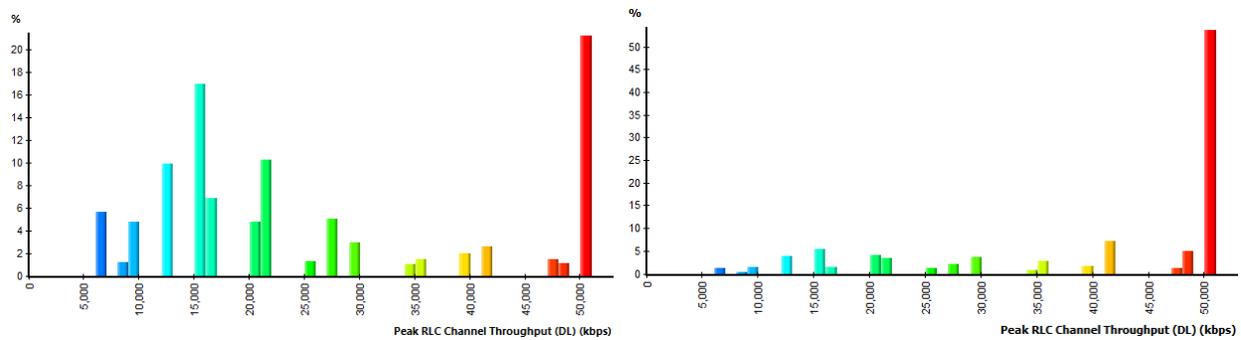
6.4 Throughput

El nivel medio para el *throughput* efectivo en *downlink*, según simulación de la red existente optimizada, es de 31.01 Mbps. Con una distribución del 54.81% del mapa por encima del umbral de 12 Mbps, es necesario ajustar estos valores para mejorar la calidad del servicio. Una vez añadidos los dos eNodeBs al diseño de la red actual y su respectiva optimización, el nivel

medio del *throughput* efectivo en *downlink* se incrementaría un 31.68%, alcanzando un nivel medio de 53.36Mbps con una distribución del 86.49% del mapa por encima del umbral de 12Mbps.

Figura 6.4

(a) *Throughput existente optimizado*, (b) *Throughput mejorado*



Fuente: Software Atoll

6.5 Resumen de resultados

La tabla 6.2 siguiente muestra una comparación del desempeño de los indicadores en base a los resultados descritos anteriormente:

Tabla 6.2

Resumen de resultados para indicadores de desempeño de la red

Indicadores	Existente optimizado	Mejorado
<i>Signal Level</i>	20.66% > -95 dB	60.25% > -95 dB
RSRP	13.91% > -105 dBm	48.67% > -105 dBm
SINR	6.92% > 20 dB	30.95% > 20 dB
<i>Mean Throughput</i>	31.01 Mbps	54.81 Mbps

Fuente: Datos obtenidos de Atoll y adaptada a la tabla elaborada por Pramono et all. (2020).

6.6 Comparación de resultados de los indicadores

En esta parte se presenta un análisis comparativo de los indicadores descritos, para una mejor evaluación de cómo mejoría progresivamente el desempeño de cada indicador de la red.

1. Nivel de señal. En los tres escenarios de acuerdo a los resultados obtenidos por el *software Atoll*, se aprecia a partir de la tabla 6.3 que se mejoraría de forma significativa los niveles más bajos de la escala; tal es el caso del nivel que va de -130 to -110 dBm que pasaría de un 12.19% de la red existente a un valor del 0.56% del mapa si se llega a mejorar la red, lo mismo ocurriría en la escala de -110 to -100 dBm pasando del 52.86% a un valor final del 13.5% del área de estudio, en el nivel de -100 to -95 dBm pasaría de un 14.80% a un 25.69% del área, y los niveles más representativos según la escala de aceptación, valores entre los niveles de -95 to -75 dBm pasarían de un 20.15% a un 60.25% del mapa.

Tabla 6.3

Tabla comparativa de los niveles de señal

Nivel de señal (<i>signal level</i>)			
dBm	Existente 4 eNodeBs	Optimizado 4 eNodeBs	Mejorado 6 eNodeBs
[-130; -110]	12.19%	7.90%	0.56%
[-110; -105]	19.09%	17.46%	0.64%
[-105; -100]	33.77%	34.63%	12.86%
[-100; -95]	14.80%	19.36%	25.69%
[-95; -90]	12.95%	13.45%	32.40%
[-90; -85]	5.87%	5.89%	19%
[-85; -80]	0.90%	0.89%	5.77%
[-80; -75]	0.43%	0.43%	3.08%
Total	100%	100%	100%

Fuente: Datos obtenidos del Software Atoll

2. RSRP. Para este indicador según datos obtenidos en las simulaciones del *software Atoll* en los tres escenarios, se aprecia una mejora significativa en la potencia promedio recibida en el nivel crítico comprendido entre -140 to -120 dBm, pasando de un 25.24% a un 0.63% del mapa. Para el caso de los niveles entre -120 to -110 dBm se observa que se lograría

pasar de un 50.92% de la red existente a un 22.27% del mapa. También en la escala entre -110 to -105 dBm se podría pasar del 14.25% inicial a un 28.41% del mapa de llegarse a realizar la mejora de la red, este mismo hecho se aprecia en la escala de aceptación que va a partir de los -105 to -85 dBm donde inicialmente se tenía solo un 9.58% pudiendo pasar a un valor del 48.67% del mapa, lo cual representa una mejora muy significativa.

Tabla 6.4

Tabla comparativa de los niveles de RSRP

RSRP			
dBm	Existente 4 eNodeBs	Optimizado 4 eNodeBs	Mejorado 6 eNodeBs
[-140; -135]	0.01%	0%	0.06%
[-135; -130]	0.32%	0.04%	0.12%
[-130; -125]	8.28%	2.54%	0.22%
[-125; -120]	16.63%	13.84%	0.23%
[-120; -115]	34.25%	28.53%	3.21%
[-115; -110]	16.67%	25.45%	19.06%
[-110; -105]	14.25%	15.71%	28.41%
[-105; -100]	7.06%	9.84%	30.97%
[-100; -95]	1.84%	3.23%	12.83%
[-95; -90]	0.28%	0.42%	2.54%
[-90; -85]	0.40%	0.42%	2.33%
Total	100%	100%	100%

Fuente: Datos obtenidos del Software Atoll

3. SINR. Con respecto a los datos obtenidos de las simulaciones en el *software Atoll* para este indicador, la tabla 6.5 presenta resultados que muestran que se lograrían mejoras de la relación entre la señal utilizable con las interferencias y el ruido, si se llegará a mejorar la red. Donde para los niveles de bajo a muy bajo que están entre -10 to 0 dB se tiene al inicio un 13.08% pasando a un valor del 1.84% del mapa, de igual manera en el nivel regular de 0 to 5 dB pasaría de un valor del 18.65% a un 4.52% del mapa, y luego en el nivel de

óptimo a bueno que va de 5 to 15 dB se tiene al inicio un 52.28% pudiendo quedar con un 35.2%, también en el nivel muy bueno de 15 to 20 dB pasaría de un 11.07% a un 27.49% del mapa, y finalmente en el nivel de aceptación de valores superiores a 20 dB se tiene en un inicio un 4.91% y puede quedar en un 30.95% si se llegara a mejorar la red, con lo cual se aprecia que se lograría una mejora importante en el desempeño del indicador.

Tabla 6.5

Tabla comparativa de los niveles de SINR

SINR			
dB	Existente 4 eNodeBs	Optimizado 4 eNodeBs	Mejorado 6 eNodeBs
[-10; -5]	0.90%	0.42%	0.07%
[-5; 0]	12.18%	7.99%	1.77%
[0; 5]	18.65%	16.79%	4.52%
[5; 10]	35.59%	32.60%	11.06%
[10; 15]	16.69%	22.77%	24.14%
[15; 20]	11.07%	12.51%	27.49%
> 20	4.91%	6.92%	30.95%
Total	100%	100%	100%

Fuente: Datos obtenidos del Software Atoll

4. *Throughput* en *downlink*. Según resultados que detalla la tabla 6.6 de las simulaciones realizada en el *software Atoll* para los tres escenarios. Se aprecia que un 11.81% corresponde a zonas con una modulación QPSK y llegan a tener un *throughput* efectivo menor a 10 Mbps, de llegar a mejorar la red este nivel pasaría a un valor del 2.81% del mapa. También se aprecia que para zonas con modulación 16QAM se cuenta inicialmente con un 60.49% con un *throughput* efectivo entre 10 to 30 Mbps, luego de la mejora pasaría al 25.13% del mapa. De igual manera para zonas cercanas a los eNodeBs las cuales están

representadas por modulación 64QAM en un inicio se tiene un 27.7% pasando luego de la mejora a un 72.06% del mapa con un *throughput* efectivo entre 30 to 50 Mbps y > 50Mbps.

Tabla 6.6

Tabla comparativa de los niveles de throughput

Mbps	<i>Throughput en downlink</i>		
	Porcentaje		
	Existente 4 eNodeBs	Optimizado 4 eNodeBs	Mejorado 6 eNodeBs
< 10	11.81%	11.49%	2.81%
[10; 20]	40.11%	33.70%	10.69%
[20; 30]	20.38%	24.16%	14.44%
[30; 40]	3.95%	4.39%	5.19%
[40; 50]	4.72%	5.08%	13.16%
> 50	19.03%	21.18%	53.71%
Total	100.00%	100.00%	100.00%

Fuente: Datos obtenidos del Software Atoll

6.7 Estado de la latencia en la red LTE-Advanced mejorada

El tiempo que tardan los datos en ir de un extremo a otro de la red se conoce como latencia, y es una métrica fundamentalmente cuantificable. Dado que la latencia permite evaluar la red e identificar los factores que influyen en su calidad de servicio, se ha convertido en un factor crítico a combatir por garantizar que las nuevas aplicaciones desarrolladas reciban una calidad de servicio (QoS) adecuada. Esto se debe a que las distintas aplicaciones son sensibles a la latencia en grados diferentes, y esto se refleja en la evaluación de la calidad de la experiencia (QoE) por parte del usuario cuando accede a las aplicaciones a través de Internet (Roblez & Egas, 2015). De acuerdo a los resultados de las simulaciones sobre todo del indicador de *throughput* en el que su valor medio llegaría a 54.81Mbps de llegarse a implementar la mejora propuesta en la red móvil LTE-Advanced en la zona de estudio, daría como resultado un tiempo de baja latencia, permitiendo la transferencia de datos a muy alta velocidad, cumpliendo así el propósito de esta tecnología.

CONCLUSIONES

- En la investigación se logró analizar los indicadores de desempeño de una red LTE-Advanced y se llegó a plantear una propuesta de diseño para la mejora de la calidad de servicio de un operador de telefonía móvil en la ciudad de Sicuani. Para ello, primero se recopiló muestras de su estado actual mediante la técnica *drive test* y posteriormente se utilizó el software de planificación *Atoll* para evaluar el estado actual de los indicadores de la red, así como el de la propuesta de diseño que mejoraría el desempeño de la red actual.
- A través del *TSS (Technical Site Survey)* o estudio de campo, se identificó las ubicaciones y áreas de cobertura de cada eNodeB, parámetros técnicos de las antenas, así como las velocidades de transferencia de datos de la red LTE-Advanced.
- Con la aplicación para *smartphone Nemo Handy*, se pudo recopilar información sobre el desempeño de los indicadores RSRP, RSRQ y SINR. Luego de un análisis se determinó que sus niveles son insuficientes para la adecuada cobertura y calidad de servicio de la red.
- Haciendo uso del modelo de propagación *Okumura-Hata* y *COST-231* en una primera etapa, determinándose los *Path Loss* y posteriormente eligiéndose la frecuencia de cálculo, se concluyó que se necesitan 6 eNodeBs como mínimo para garantizar una adecuada calidad de servicio de la red LTE-Advanced en el área geográfica de estudio de 11 Km².
- Comparando los resultados de la red existente (4 eNodeBs) con la red propuesta (6 eNodeBs), se concluye que debería implementarse 2 nuevos nodos en la ciudad de Sicuani. Los resultados de la simulación del *software Atoll* muestran que al incorporar los nuevos eNodeBs, el nivel de la señal aumentaría un 39.59%, el valor RSRP aumentaría un 34.76%, el valor SINR aumentaría un 24.03% y el nuevo *mean throughput* sería de 54.81Mbps.

RECOMENDACIONES

- Para una adecuada recolección de muestras de los indicadores de desempeño, a través de la técnica del *Drive Test*, se sugiere realizar los recorridos de toma de muestras en momentos del día donde se presente mayor tráfico; y además haciendo uso de software específicos para tal fin, como *Nemo Handy* que es una herramienta completa la cual ayuda a una adecuada planificación y evaluación de las redes inalámbricas móviles.
- Teniendo como referencia los resultados de desempeño de los indicadores RSRP, RSRQ y SINR obtenidos y con la finalidad de mejorarlos, se recomienda realizar una optimización con respecto a los principales parámetros técnicos de las antenas sectoriales: *tilt* mecánico, *tilt* eléctrico, azimut, para mejorar aún más las prestaciones de servicio que ofrece la red móvil LTE-Advanced.
- Se recomienda hacer uso de la herramienta *Atoll* en trabajos de investigación, planificación y optimización de redes inalámbricas por ser versátil, ya que este permite el desarrollo y configuración de plantillas de antenas, estaciones bases, frecuencias de operación, fórmulas de propagación de la señal y otros de la tecnología de red móvil LTE-Advanced, así como de tecnologías emergentes (5G y IoT).

BIBLIOGRAFÍA

- Agusti, R., Bernardo, F., Casadevall, F., Ferrús, R., Pérez-Romero, J., & Sallent, O. (2010). LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Mviles. Fundación Vodafone España.
- Akyildiz, I. F., Gutierrez-Estevez, D. M., & Chavarria Reyes, E. (2010). The evolution to 4G cellular systems: LTE-Advanced. *Physical communication*, 217-244. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1874490710000303>
- Álvarez, D. C. (2015). Diseño de una red 4G (Long Term Evolution) en el cluster 2 de la ciudad de Quito para el operador CNT. EP. Universidad Técnica del Norte. Obtenido de <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/3771>
- Analuisa, J. D. (2014). Diseño de una red 4G Long Term Evolution (LTE) en redes móviles. Universidad Técnica de Ambato. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/7796>
- Anritzu Campany. (2009). LTE Resource Guide. Obtenido de http://web.cecs.pdx.edu/~fli/class/LTE_Resource_Guide.pdf
- Arimas. (22 de 04 de 2016). LTE Radio Interface Overview. Obtenido de <https://arimas.com/2016/04/22/140-lte-radio-interface-overview/>
- Barrantes, B., & Saenz, J. (2019). Identificación de factores que afectan la calidad de servicio de la red móvil lte en la ciudad de Otuzco- 2018, mediante una medición drive-test. Universidad Privada Antenor Orrego. Obtenido de <http://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/4649>
- Beciez, S., Flores, N. J., & Pérez, C. I. (2013). Aplicación de modelos de propagación en sistemas inalámbricos de área extendida WWAN. Intituto Politécnico Nacional. Obtenido de <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/handle/123456789/12163>
- Blasco, L. (5 de Septiembre de 2016). Cuáles son las diferencias entre E, GPRS, 3G, 4G, 5G y esas otras redes a las que se conecta tu celular (y cómo te afectan tu conexión a internet). BCC. Obtenido de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-37247130>
- Bravo, N., & Ñauta, B. (2013). Análisis técnico, socio-económico y legal de la implementación del estándar Long Term Evolution Advanced en el Ecuador. Universidad Politécnica Salesiana. Obtenido de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/4431>
- Calle Cáceres, C. (2013). Estudio y Análisis Técnico Comparativo entre las Tecnologías 4G long term evolution (LTE) y LTE Advanced. Escuela Politécnica Nacional. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17148>
- Calle, C., & Jiménez, M. (2014). Estudio y Análisis Técnico Comparativo entre las Tecnologías LTE y LTE Advanced. Escuela Politécnica Nacional, 254-255. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/17148/1/2014AJIEE-29.pdf>

- Castillo Contreras, D. (2017). Estudio comparativo entre redes LTE Advanced y LTE a nivel de CORE. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Obtenido de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/8609>
- Castillo, C. J. (2017). Dimensionamiento de un clúster de Red LTE para brindar cobertura en la zona comercial de la ciudad de Loja. Pontificia Universidad Católica de Ecuador. Obtenido de <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/14430>
- Chancasana, M. E. (2015). Diseño de una red 4G-LTE Indoor para el centro comercial Real Plaza Santa Clara. Pontificia Universidad Católica del Perú. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/6410>
- Chávez, R. (2015). Ajuste estadístico a modelos de propagación para redes móviles. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11349/2768>
- Chicango, D., & Lupera, P. (2018). Análisis experimental de señales LTE y LTE-Advanced para la evaluación del efecto de la agregación de portadoras. Escuela Politécnica Nacional. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/24017>
- Coello, T. (2016). Diseño de un sistema de comunicaciones MIMO masivo multiusuario. Universidad Carlos III de Madrid. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10016/26613>
- Cox, C. (2014). An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications. John Wiley & Sons. Obtenido de [http://www.pce-fet.com/common/library/books/50/2784_%5BChristopher_Cox%5D_An_Introduction_to_LTE_LTE,_LTE\(b-ok.org\).pdf](http://www.pce-fet.com/common/library/books/50/2784_%5BChristopher_Cox%5D_An_Introduction_to_LTE_LTE,_LTE(b-ok.org).pdf)
- Cruz, E., & Flores, I. (2016). Estudio de acceso al medio para la tecnología 4G “LTE”. Instituto Politécnico Nacional. Obtenido de <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/21590>
- de Freitas, P. R., & Tertuliano Filho, H. (2017). Parameters Fitting to Standard Propagation Model (SPM) for Long Term Evolution (LTE) using Nonlinear Regression Method. IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications (CIVEMSA), 84-87. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7995306>
- Fernández, I. (2014). Planificación y dimensionado de una red LTE. Universitat Politècnica de catalunya. Obtenido de <http://hdl.handle.net/2099.1/21660>
- Garzón, J. M. (2015). Estudio de Cobertura de la Red de LTE en la Localidad de Chapinero Bogotá de los Operadores Claro, Movistar y Tigo. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11349/2254>
- Gómez, B. (2018). Medición a las Condiciones y Calidad de la Prestación del Servicio de la Red de Telecomunicaciones en Tecnologías de Segunda (2g), Tercera (3g) y (4g) Cuarta Generación. Universidad Santo Tomás. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11634/14331>

- Gómez, J. M., & Romero, X. R. (2018). Análisis del throughput en una red LTE-A con el modelo SPM calibrado y distintas estrategias del packet Scheduling. Universidad Nacional de Ingeniería, Nicaragua. Obtenido de <http://ribuni.uni.edu.ni/id/eprint/2218>
- Grau, S. (2019). Medición y Análisis de las Redes de Comunicaciones Móviles 4G LTE en Cullera. Universidad Politécnica de Valencia. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10251/124879>
- GSMA. (2016). Calidad de los servicios móviles en América Latina. Obtenido de <https://www.gsma.com/latinamerica/es/calidad-de-los-servicios-moviles/>
- Hernández, A. (2014). Efectos de las redes de cuarta generación (LTE) en México. Visión presente y futuro. Universidad Nacional Autónoma de México. Obtenido de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/3521>
- Iglesias, L. C. (2016). Planificación y optimización de una red LTE con la herramienta ATOLL. Universitat Politècnica de Catalunya. Obtenido de <http://hdl.handle.net/2117/83015>
- Imoize, A., & Dosunmu, A. (2018). Path Loss Characterization of Long Term Evolution Network for, Nigeria. Department of Electrical and Electronics Engineering, University of Lagos, 114-128. Obtenido de <http://jje.ttu.edu.jo/docs/vol4no2/JJEE%20vol.%204,%20no.%202,%20pp.%20114-128.pdf>
- Iñiguez, C. F. (2018). Análisis comparativo del servicio de streaming de video de youtube entre las operadoras de datos móviles 4G en el Ecuador, para proponer parámetros mínimos de calidad. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Obtenido de <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/9328>
- ITU-International Telecommunication Union. (2006). Teletraffic Engineering Handbook. Obtenido de <http://web.archive.org/web/20070111015452/http://oldwww.com.dtu.dk/teletraffic/handbook/telenook.pdf>
- Jinghai, L., Tangbai, C., & Bo, Y. (2011). Long Term Evolution (LTE) Radio Access Network Planning Guide. Huawei Technologies CO. Obtenido de https://www.academia.edu/10319245/Long_Term_Evolution_LTE_Radio_Access_Network_Planning_Guide
- Jurado, M., & Analuisa, J. (2014). Diseño de una red 4G Long Term Evolution (LTE) en redes móviles. Universidad Técnica de Ambato. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/7796>
- Keysight. (2023). Nemo Handy Handheld Measurement Solution. Obtenido de <https://www.keysight.com/us/en/product/NTH50047B/nemo-handy-handheld-measurement-solution.html>

- Luzuriaga, P. A. (2019). Análisis de la influencia del aumento del número de sites en los indicadores claves de acceso radio LTE en la ciudad de Otuzco. Universidad Privada Antenor Orrego. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12759/5384>
- Madrigal, J. A. (2015). Modelamiento y simulación de la capa física de una red LTE (Release 8). Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/11389>
- Maltez, E. A., & Valle, N. E. (2019). Diseño y simulación de una red LTE-A para la zona urbana de la ciudad de Granada. Universidad Nacional de Ingeniería. Obtenido de <http://ribuni.uni.edu.ni/id/eprint/2824>
- Molina, D. (2020). Estudio de factibilidad para la implementación de la Tecnología LTE en la Banda de 700 MHz como complemento a la Banda de 2100 MHz para mejorar el Servicio de Internet Inalámbrico en la Zona Norte de la Ciudad de Quito. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Obtenido de <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/18270>
- More, J., & Argandoña, D. (2019). Estado del espectro radioeléctrico en el Perú y recomendaciones para promover su uso en nuevas tecnologías. Documento de Trabajo N° 43. Osiptel. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12630/390>
- Nakamura, T. (2009). Proposal for Candidate Radio Interface Technologies for IMT-Advanced Based on LTE Release 10 and Beyond (LTE-Advanced). 3GPP TSG-RAN Chairman. Obtenido de https://www.3gpp.org/IMG/pdf/2009_10_3gpp_IMT.pdf
- Nlend, R., & Tonye, E. (2019). Planning and simulation of LTE radio network: case of the city of Yaoundé. IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE). Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Emmanuel-Tonye/publication/332154092_Planning_and_simulation_of_LTE_radio_network_case_of_the_city_of_Yaounde/links/5ca3886092851c8e64ae69/Planning-and-simulation-of-LTE-radio-network-case-of-the-city-of-Yaounde.pdf
- Palacios Pérez, M. V. (2015). Propuesta de un protocolo de mediciones para el proceso de homologación de terminales LTE de la SUPERTEL. Escuela Politécnico Nacional. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/10675>
- Pramono, S., Ariyanto, M., Alvionita, L., & Sulistyono, M. (2020). Analysis and optimization of 4G long term evolution (LTE) network in urban area with carrier aggregation technique on 1800 MHz and 2100 MHz frequencies. AIP Conference Proceedings. doi:<https://doi.org/10.1063/5.0000731>
- Puel, D. J. (2017). Diseño de una red 4G-LTE outdoor de la empresa América Móvil Perú SAC para la provincia de Sechura. Universidad Nacional de Piura. Obtenido de <http://repositorio.unp.edu.pe/handle/UNP/1312>

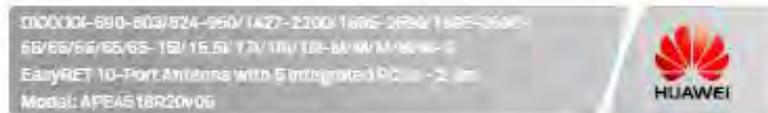
- Ramos Mis, C. (2017). Lte-advanced: la evolución de las comunicaciones móviles. Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12249/1841>
- Reyes, A. (2016). Diseño de una Red 4G Long Term Evolution (Lte) en Redes Moviles para el Distrito de Ayacucho – Provincia de Huamanga Region de Ayacucho. Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur. Obtenido de <http://repositorio.untels.edu.pe/jspui/handle/123456789/419>
- Roblez, A. D., & Egas, C. R. (2015). Latencia de las redes celulares en Ecuador, y su influencia en las aplicaciones. Revista Tecnológica - ESPOL, 28, 162-178. Obtenido de <http://rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/432>
- Rodríguez, C. E. (2013). Estudio experimental por simulación del diseño de una red LTE de telefonía y datos móviles en Nicaragua. Universidad Nacional de Ingeniería. Obtenido de <https://ribuni.uni.edu.ni/332/1/38786.pdf>
- Sesia, S., Toufik, I., & Baker, M. (2011). LTE-the UMTS long term evolution: from theory to practice . John Wiley & Sons Ltd.
- Solórzano, B. (2018). Análisis de cobertura de una red de banda ancha móvil (LTE) para cantón Chone mediante software Atoll. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Obtenido de <http://201.159.223.180/bitstream/3317/10220/1/T-UCSG-PRE-TEC-ITEL-270.pdf>
- Toapanta, K. P. (2019). Estudio comparativo del rendimiento entre LTE FDD y LTE TDD mediante el software ICS Designer. Escuela Politécnica Nacional. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19956>
- Valle, M. (2016). Planificación radio LTE de una red de telefonía móvil en el municipio de Rota. Universitat Oberta de Catalunya. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10609/45856>
- Yupanki, K. M. (2016). Estudio técnico comparativo de las tecnologías Long Term Evolution – LTE Y LTE Advanced. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Obtenido de <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/13118>
- Zapata, C. (2022). Diseño y planificación de una red móvil 4G LTE para la localidades de Samán Chico, San Rolando y La Noria, distrito de Marcavelica, Sullana, Piura. Universidad Nacional de Piura. Obtenido de <http://repositorio.unp.edu.pe/handle/20.500.12676/3402>

ANEXOS

Anexo A: Hoja de datos de las antenas sectoriales por eNodeB

En este apartado se muestran las hojas de datos de las antenas operativas actualmente de los eNodeB de la ciudad de Sicuani-Cusco.

a. Antena eNodeB Ura Sicuani



Preliminary Issue

Antenna Specifications

Electrical Properties						
Frequency range (MHz)		824- 960			1427 - 2200	
		824 - 894	880 - 960	1427 - 1518	1695 - 1990	1920 - 2200
Polarization		+45°, -45°			+45°, -45°	
Electrical downtilt (°)		2 - 12, continuously adjustable			2 - 12, continuously adjustable	
Gain (dBi)	at mid Tilt	14.0	15.2	15.5	16.0	17.0
	over all Tilt	14.8 ± 0.5	15.1 ± 0.5	15.4 ± 0.5	15.9 ± 0.5	16.9 ± 0.5
Side lobe suppression for first side lobe above main beam (dB)		> 16	> 15	> 15	> 17	> 16
Horizontal 3dB beam width (°)		67 ± 2.0	65 ± 2.2	63 ± 2.5	64 ± 5.0	67 ± 4.0
Vertical 3dB beam width (°)		11.0 ± 1.0	9.5 ± 0.5	8.9 ± 0.4	8.3 ± 0.4	8.5 ± 0.5
VSWR		< 1.5			< 1.5	
Cross polar isolation (dB)		≥ 28			≥ 28	
Inband isolation (dB)		≥ 28			≥ 28	
Front to back ratio, ±30° (dB)		> 23	> 26	> 26	> 24	> 26
Cross polar ratio (dB)	0°	> 19	> 18	> 17	> 15	> 20
Max. power per input (W)		500 (at 50°C ambient temperature)*			250 (at 50°C ambient temperature)*	
Intermodulation IM3 (dBc)		≤ -150 (2 x 43 dBm carrier)			≤ -153 (2 x 43 dBm carrier)	
Impedance (Ω)		50				
Grounding		DC Ground				

Electrical Properties					
Frequency range (MHz)		2 x (1695 - 2690)			
		1695 - 1990	1920 - 2200	2200 - 2490	2490 - 2690
Polarization		+45°, -45°			
Electrical downtilt (°)		2 - 12, continuously adjustable, each band separately			
Gain (dBi)	at mid Tilt	17.2	17.5	18.0	18.4
	over all Tilt	17.0 ± 0.5	17.4 ± 0.5	17.8 ± 0.4	18.1 ± 0.5
Side lobe suppression for first side lobe above main beam (dB)		> 17	> 17	> 17	> 18
Horizontal 3dB beam width (°)		67 ± 5.0	65 ± 3.0	62 ± 2.0	59 ± 4.0
Vertical 3dB beam width (°)		6.6 ± 0.5	6.0 ± 0.5	5.2 ± 0.4	5.0 ± 0.4
VSWR		< 1.5			
Cross polar isolation (dB)		≥ 28			
Inband isolation (dB)		≥ 28			
Front to back ratio, ±30° (dB)		> 25	> 25	> 26	> 26
Cross polar ratio (dB)	0°	> 19	> 19	> 17	> 17
Max. power per input (W)		250 (at 50°C ambient temperature)*			
Intermodulation IM3 (dBc)		≤ -153 (2 x 43 dBm carrier)			
Impedance (Ω)		50			
Grounding		DC Ground			

* Total power : 1000W (at 50°C ambient temperature)

1. Values based on 3GPP recommendations on Base Station Antenna Standards (BASTA).

2. Electrical datasheet in XML format is available.

D100700-160-803/824-960/1427-2200/1695-2690/1026-2990-
 65/65/65/65/65- 150/15.50/170/180/180-M/M/M/M-M-0
 EasyRET 16-Port Antenna with 6 Integrated PCBs - 2.0m
 Model: APE451BR20V06



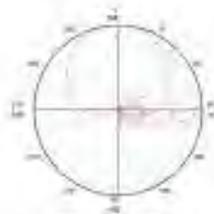
Mechanical Properties	
Antenna dimensions (H x W x D) (mm)	1900 x 369 x 149
Packing dimensions (H x W x D) (mm)	2255 x 435 x 240
Antenna weight (kg)	32.7
Clamps weight (kg)	3.6 (2 units)
Antenna packing weight (kg)	47.5 (included clamps)
Max diameter supported (mm)	50 - 115
Radome material	Fiberglass
Radome colour	Light grey
Operational temperature (°C)	-40 ~ +65
Wind load (N)	Frontal: 985 (at 150 km/h) Lateral: 105 (at 150 km/h) Rear side: 980 (at 150 km/h)
Max. operational wind speed (km/h)	200
Survival wind speed (km/h)	250
Connector	1.0 x 4.3-10 Female
Connector position	Bottom



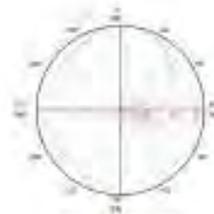
Accessories

Item	Model	Description	Weight	Units per antenna
Downlink kit	ASMDT0001	Mechanical downlink: 0 - 12°	2.1 kg	1 (Separate packing)

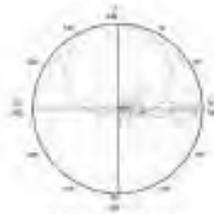
Pattern sample for reference



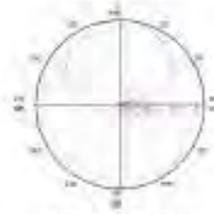
890 - 903 MHz



824 - 960 MHz



1427 - 2200 MHz



1695 - 2690 MHz

D00030C-680-800/834-960/1427-2200/1685-2500/1685-2600-
 65/65/65/65/65- 15V/15.5V/17V/18V/18V-M/M/M/M-M-R
 EasyRET 10-Port Antenna with 5 integrated PCUs - 2.0m
 Model: APC4E18R20v05

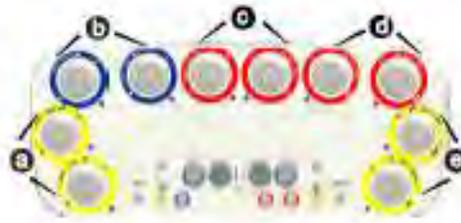


Integrated RET Specifications

Properties								
RET type	Integrated RET							
RET protocol*	AISG 2.0 / 3GPP							
Input voltage range (V)	10- 30 DC							
Power consumption (W)	< 6 (motor activated, 12V) < 1.5 (stand by, 12V)							
Adjustment time (full range) (s)	< 65 (typically, depending on antenna type)							
RET connector	4 x 8 pin connector according to IEC 60130-9 Daisy chain in: Male / Daisy chain out: Female							
Pin assignment according AISG	1	2	3	4	5	6	7	8
	DC	n/c	RS-485B	n/c	RS-485A	DC	DC return	n/c
Lightning protection (kA)	3 (10/350 μs) 10 (8/20 μs)							

* Please confirm the AISG protocol of primary station is compatible with RET antenna protocol interface. The protocol of RET antenna software interface is switchable between AISG 2.0/3GPP and AISG 1.1 with a vendor defined command. For more details about protocol switching function, contact Huawei before system installation.

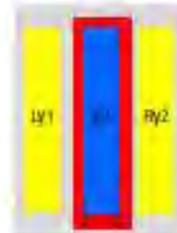
Standards: EN 60950-1 (Safety), EN 65022 (Emission), EN 65024 (Immunity), ETSI EN 301 489, FCC part 15
 Certifications: CE, FCC, RoHS, WEEE



Integrated RET S/N:

- Ⓐ HWMxxx.....Ly1
- Ⓑ HWMxxx.....b1
- Ⓒ HWMxxx.....r1
- Ⓓ HWMxxx.....r2
- Ⓔ HWMxxx.....Ry2

r - Red y - Yellow
 b - Blue
 L - Left array R - Right array



b. Antena eNodeB Sicuani – Lechemoco

R2V4PX308R



12-port sector antenna, 4x 698–960 and 8x 1710–2690 MHz, 65° HPBW, 6x RET with manual override. Bands cascaded SRET (Antenna 1 and Antenna 2).

This product will be discontinued on: March 30, 2022.

Replaced By:

R2V4-65B-R6H4-V2 12-port sector antenna, 4x 694–960 and 8x 1695–2690 MHz, 65° HPBW, 6x RET

General Specifications

Antenna Type	Sector
Band	Multiband
Grounding Type	RF connector inner conductor and body grounded to reflector and mounting bracket
Performance Note	Outdoor usage
Radome Material	ASA, UV stabilized
Radiator Material	Brass Low loss circuit board
Reflector Material	Aluminum
RF Connector Interface	7-16 DIN Female
RF Connector Location	Bottom
RF Connector Quantity, high band	8
RF Connector Quantity, low band	4
RF Connector Quantity, total	12

Remote Electrical Tilt (RET) Information

RET Interface	8-pin DIN Female 8-pin DIN Male
RET Interface, quantity	2 female 2 male
Input Voltage	10–30 Vdc
Internal RET	High band (4) Low band (2)

Page 1 of 4

R2V4PX308R

Power Consumption, idle state, maximum	2 W
Power Consumption, normal conditions, maximum	13 W
Protocol	3GPP/LTE (Single RET)

Dimensions

Width	641 mm 25.236 in
Depth	244 mm 9.606 in
Length	2074 mm 81.654 in
Net Weight, without mounting kit	60 kg 132.277 lb

Electrical Specifications

Impedance	50 ohm
Operating Frequency Band	1710 – 2690 MHz 698 – 960 MHz
Polarization	±45°

Electrical Specifications

Frequency Band, MHz	698–790	790–890	890–960	1710–1920	1920–2170	2300–2690
Gain, dBi	15.1	15.5	15.9	16.4	17.2	17.9
Beamwidth, Horizontal, degrees	65	62	59	62	58	59
Beamwidth, Vertical, degrees	12.8	11	9.9	10.4	9.2	7.4
Beam Tilt, degrees	0–10	0–10	0–10	0–10	0–10	0–10
USLS (First Lobe), dB	18	18	18	18	18	18
Front-to-Back Ratio at 180°, dB	33	33	32	32	33	37
CPR at Boresight, dB	23	19	18	23	21	14
CPR at Sector, dB	13	14	12	13	11	2
Isolation, Cross Polarization, dB	25	25	25	25	25	25
Isolation, Inter-band, dB	30	30	30	30	30	30
VSWR Return loss, dB	1.43 16.0	1.43 15.0	1.43 15.0	1.5 14.0	1.5 14.0	1.5 14.0
PIM, 3rd Order, 2 x 20 W, dBc	-150	-150	-150	-150	-150	-150
Input Power per Port, maximum, watts	300	300	300	250	250	250

Electrical Specifications, BASTA

Frequency Band, MHz	698–790	790–890	890–960	1710–1920	1920–2170	2300–2690
---------------------	---------	---------	---------	-----------	-----------	-----------

Page 2 of 4

©2021 CommScope, Inc. All rights reserved. All trademarks identified by ® or ™ are registered trademarks, respectively, of CommScope. All specifications are subject to change without notice. See www.commscope.com for the most current information. Revised: October 14, 2021

COMMSCOPE®

R2V4PX308R

Gain by all Beam Tilts, average, dBi	14.8	15.3	15.7	15.9	16.8	17.5
Gain by all Beam Tilts Tolerance, dB	±0.6	±0.3	±0.3	±0.6	±0.5	±0.6
Gain by Beam Tilt, average, dBi	0° 14.8 5° 14.8 10° 14.7	0° 15.3 5° 15.3 10° 15.3	0° 15.7 5° 15.7 10° 15.6	0° 16.0 5° 15.9 10° 15.9	0° 16.8 5° 16.8 10° 16.6	0° 17.6 5° 17.6 10° 17.0
Beamwidth, Horizontal Tolerance, degrees	±2.4	±2.6	±2.5	±3	±2.4	±5.7
Beamwidth, Vertical Tolerance, degrees	±0.8	±0.6	±0.3	±0.8	±0.7	±0.7
USLS, beampeak to 20° above beampeak, dB	18	18	18	18	18	18
Front-to-Back Total Power at 180° ± 30°, dB	26	26	25	30	30	31
CPR at Boresight, dB	23	19	18	23	21	19
CPR at Sector, dB	13	14	12	13	11	2

Mechanical Specifications

Wind Loading @ Velocity, frontal	1,673.0 N @ 150 km/h (376.1 lbf @ 150 km/h)
Wind Loading @ Velocity, lateral	374.0 N @ 150 km/h (84.1 lbf @ 150 km/h)
Wind Loading @ Velocity, rear	1,764.0 N @ 150 km/h (396.6 lbf @ 150 km/h)
Wind Speed, maximum	250 km/h 155.343 mph

Packaging and Weights

Width, packed	789 mm 29.095 in
Depth, packed	371 mm 14.606 in
Length, packed	2280 mm 89.764 in
Weight, gross	83 kg 182.988 lb

Regulatory Compliance/Certifications

Agency	Classification
CE	Compliant with the relevant CE product directives
CHINA-ROHS	Above maximum concentration value
ISO 9001:2015	Designed, manufactured and/or distributed under this quality management system
REACH-SVHC	Compliant as per SVHC revision on www.commscope.com/ProductCompliance
ROHS	Compliant/Exempted

c. Antena eNodeB Arequipa – Sicuani

NNH4-65C-R6-V2



12-port sector antenna, 4x 703–894 and 8x 1695–2200 MHz, 65° HPBW, 6x RET.

- Features a downtilt range of 0-10° to provide for improved interference performance.
- Features broadband Low Band (698-896 MHz) and High Band (1695-2360 MHz) arrays for 4T4R (4x MIMO) capability for Band 14, AWS, PCS and WCS applications.
- Independent tilt for all arrays.
- Array configuration provides capability for 4T4R (4x MIMO) on Low band and Dual 4T4R (4x MIMO) on High band.
- Optimized SFR performance across all operating bands.
- Excellent wind loading characteristics.

OBSOLETE

This product was discontinued on March 31, 2021.

Replaced By:

NNH4-65D-R5 12-port sector antenna, 4x 698–896 and 8x 1695–2360 MHz, 65° HPBW, 6x RET.

General Specifications

Antenna Type	Sector
Band	Multiband
Grounding Type	RF connector inner conductor and body grounded to reflector and mounting bracket
Performance Note	Outdoor usage Wind loading figures are validated by wind tunnel measurements described in white paper WP-112634-EN
Radome Material	Fiberglass UV resistant
Radiator Material	Low loss circuit board
Reflector Material	Aluminum
RF Connector Interface	4.3-10 Female
RF Connector Location	Bottom
RF Connector Quantity, high band	8
RF Connector Quantity, low band	4
RF Connector Quantity, total	12

Remote Electrical Tilt (RET) Information

RET Hardware	CommRET V2
---------------------	------------

Page 1 of 1

©2021 CommScope, Inc. All rights reserved. All trademarks identified by ® or ™ are registered trademarks, respectively, of CommScope. All qualifications are stated for illustrative purposes only. See www.commscope.com for the most current information. Revised: September 14, 2021

COMMSCOPE

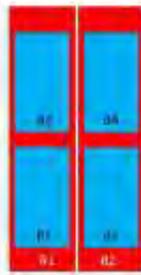
NNH4-65C-R6-V2

RET Interface	8-pin DIN Female 8-pin DIN Male
RET Interface, quantity	1 female 1 male
Input Voltage	10-30 Vdc
Internal RET	High band (4) Low band (2)
Power Consumption, idle state, maximum	1 W
Power Consumption, normal conditions, maximum	8 W
Protocol	3GPP/AISG 2.0 (Single RET)

Dimensions

Width	406 mm 19.920 in
Depth	197 mm 7.756 in
Length	2428 mm 95.984 in
Net Weight, without mounting kit	45.6 kg 101.176 lb

Array Layout



Array	Freq (MHz)	Conns	RET (sect)	AISG RET UID
A1	703-894	1-2	1	CPxxxxxxxxxxxxR1
A2	703-894	3-4	2	CPxxxxxxxxxxxxR2
B1	1695-2200	5-6	3	CPxxxxxxxxxxxxB1
B2	1695-2200	7-8	4	CPxxxxxxxxxxxxB2
B3	1695-2200	9-10	5	CPxxxxxxxxxxxxB3
B4	1695-2200	11-12	6	CPxxxxxxxxxxxxB4

(left) (right)
Bottom

(Sizes of colored boxes are not true depictions of array size)

Port Configuration

NNH4-65C-R6-V2



Electrical Specifications

Impedance	50 ohm
Operating Frequency Band	1695 – 2200 MHz 703 – 804 MHz
Polarization	+45°
Total Input Power, maximum	900 W @ 50 °C

Electrical Specifications

Frequency Band, MHz	703-803	824-894	1695-1880	1850-1990	1920-2200
Gain, dBi	15.8	16	17	17.5	17.8
Beamwidth, Horizontal, degrees	75	73	68	69	61
Beamwidth, Vertical, degrees	9.7	8.7	7.9	7.4	7
Beam Tilt, degrees	2-12	2-12	2-12	2-12	2-12
USLS (First Lobe), dB	19	19	17	18	19
Front-to-Back Ratio at 180°, dB	32	33	39	42	39
Isolation, Cross Polarization, dB	25	25	25	25	25
Isolation, Inter-band, dB	25	25	25	25	25
VSWR Return loss, dB	1.5 14.0	1.3 14.0	1.1 14.0	1.1 14.0	1.1 14.0

Page 3 of 7

©2021 CommScope, Inc. All rights reserved. All trademarks identified by ® or ™ are registered trademarks, respectively, of CommScope. All specifications are subject to change without notice. See www.commscope.com for the most current information. Revised: September 14, 2021

COMMSCOPE®

d. Antena eNodeB Confederación – Cusco



Antenna Specifications

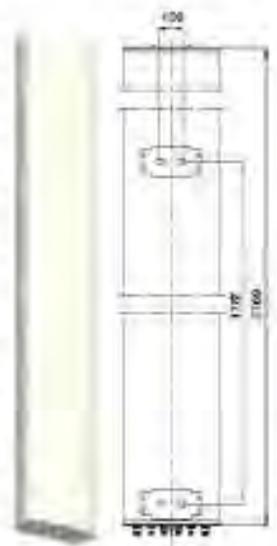
Frequency range (MHz)		Electrical Properties								
		E (890-960)				E+ (1885-2000)				
		890-900	790-810	824-844	880-900	1885-1990	1920-2000	2000-2490	2490-2690	
Polarization		+45°, -45°								
Electrical downtilt (°)		0 - 10, continuously adjustable, each band separately				3 - 13, continuously adjustable, each band separately				
Gain (dBi)	Sector	at mid Tilt	+5.6	+6.5	+6.7	+7.0				
		over all Tilt	15.0 ±0.5	16.0 ±0.5	16.0 ±0.5	16.7 ±0.5				
	Top	at mid Tilt					16.8	17.0	17.2	17.8
		over all Tilt					16.4 ±0.8	16.8 ±0.5	17.0 ±0.5	17.4 ±0.5
Side lobe suppression for first side lobe above main beam (dB)		> -10	> -17	> -17	> -17	> -18	> -18	> -18	> -18	
Horizontal 3dB beam width (°)		60 ±5	60 ±5	60 ±5	60 ±5	65 ±5	65 ±5	61 ±5	60 ±5	
Vertical 3dB beam width (°)		8.5 ±0.7	8.0 ±0.8	7.8 ±0.8	7.5 ±0.8	7.0 ±0.7	6.0 ±0.8	5.5 ±0.8	5.0 ±0.5	
VSWR		≤ 1.5								
Cross polar isolation (dB)		≥ 20								
Isolation (dB)		≥ 20								
Front to back ratio, ±30° (dB)		> 23	> 26	> 26	> 26	> 26	> 27	> 27	> 28	
Cross polar ratio (dB)		> 17	> 16	> 16	> 20	> 15	> 15	> 17	> 17	
Max. power per input (W)		300 (at 50°C ambient temperature)				250 (at 50°C ambient temperature)				
Total power (W)		1200 (at 50°C ambient temperature)								
Intermodulation IM3 (dBc)		≥ -153 (3 × 40 dBm carrier)								
Impedance (Ω)		50								
Grounding		DC Ground								

1 Value based on 3GPP recommendations on Base Station Antenna Standards (BSA STA)
 2 Electrical downtilt in XML format is available.

Mechanical Properties	
Antenna dimensions (H x W x D) (mm)	2768 x 428 x 198
Packing dimensions (H x W x D) (mm)	3960 x 630 x 275
Antenna weight (kg)	4.5
Clamp weight (kg)	5.8 (3 units)
Antenna packing weight (kg)	66.1 (included clamp)
Max. clearance supported (mm)	50 - 115
Radome material	FR4/glass
Radome colour	Light grey
Operational temperature (T _c)	-40 ~ +65
Wind load (N)	Front: 1200 (at 150 km/h) Lateral: 500 (at 150 km/h) Rear side: 1200 (at 150 km/h)
Max. operational wind speed (km/h)	200
Survival wind speed (km/h)	250
Connector	1.3 x 4.5-10 Female
Connector position	Bottom

Accessories

Item	Model	Description	Weight	Units per antenna
Downtilt kit	ASM110P01	Mechanical downtilt 0 - 8°	5.1 kg	1 (separate packing)



ASI4518R10v06

DXXXXXX-880-880/890-890/1885-2000/1885-2000/1885-2000/1885-2000-
 85/86/86/86/86/86-17/17/17.5/17.5/17.5/17.5/17.5/17.5/17.5/17.5/17.5/17.5-
 EasyRET Hexa-Band Antenna with 8 Integrated RCUs - 2.3m



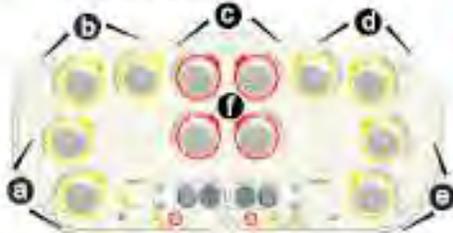
Integrated RET Specifications

Properties								
RET type	Integrated RET							
RET protocol*	AISG 2.0 / 3GPP							
Input voltage range (V)	10 - 30 DC							
Power consumption (W)	< 6 (motor activated, 12V) < 1.5 (stand by, 12V)							
Adjustment time (full range) (s)	< 65 (typically, depending on antenna type)							
RET connector	4 x 8 pin connector according to IEC 60130-8 Delay chain in: Male / Delay chain out: Female							
Pin assignment according AISG	1	2	3	4	5	6	7	8
	DC	vcc	RS-485B	rst	RS-485A	DC	DC return	n/c
Lightning protection (kA)	3 (10/500 μs) 10 (500 μs)							

* Please confirm the AISG protocol of primary station is compatible with RET antenna protocol interface. The protocol of RET antenna software interface is switchable between AISG 2.0/3GPP and AISG 1.1 with a vendor defined command. For more details about protocol switching function, contact Huawei before system installation.

Standards: UL 60950-1 (Safety), UL 60950-22 (Safety – Equipment installed outdoor), EN 55022 (Emission),
 EN 55024 (Immunity), ETSI EN 301 489, FCC Part15, ICES-003

Certification: CE, FCC, IC, RCM

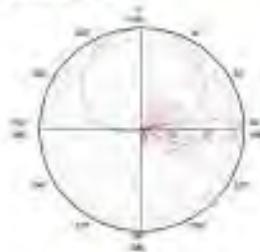


Integrated RET S/N:

- Ⓐ HWMxxx.....LTy2
- Ⓑ HWMxxx.....LBy1
- Ⓒ HWMxxx.....Lr1
- Ⓓ HWMxxx.....RBy3
- Ⓔ HWMxxx.....RTy4
- Ⓕ HWMxxx.....Rr2

r - Red y - Yellow
 L - Left array R - Right array
 T - Top array B - Bottom array

Pattern sample for reference



890 - 960 MHz



1885 - 2000 MHz

NOTE

1. Facilities, such as towers and poles, must bear the weight and wind load of antennas.
2. HUAWEI's standard brackets and accessories must be used for any installation.
3. The antenna working environment must meet the requirements specified in the datasheet.
4. Only qualified personnel are allowed to perform installation. Installation tools and procedures must conform to requirements described in the antenna installation guide.

Huawei Technologies Co., Ltd. Banliao, Longgang District, Shenzhen 518129, P.R.China

www.huawei.com/antenna

Any previous datasheet issues become invalid.

2

Issue: 2018-06-01

Anexo B: Identificación de celdas y datos relevantes de cada eNodeB

a. eNodeB Ura Sicuani

Site Name	Código Único	Sistema	Sector	E-UTRAN CELL ID	Latitud	Longitud	Altura Torre (m)	Marca Antena	Modelo Antena	TM	TE	Azimut
Ura Sicuani	CU230	LTE_2100	S1	47249409	-14.273	-71.22711	28	HUAWEI	APE4518R20v06	1	7	355
			S2	47249410	-14.273	-71.22711	28	HUAWEI	APE4518R20v06	0	6	150
			S3	47249411	-14.273	-71.22711	28	HUAWEI	APE4518R20v06	0	6	255
		LTE_700	S1	47249412	-14.273	-71.22711	28	HUAWEI	APE4518R20v06	1	12	355
			S2	47249413	-14.273	-71.22711	28	HUAWEI	APE4518R20v06	0	12	150
			S3	47249414	-14.273	-71.22711	28	HUAWEI	APE4518R20v06	0	10	255

Fuente: Obtenido de la empresa operadora (elaboración propia)

b. eNodeB Sicuani – Lechemoco

Site Name	Código Único	Sistema	Sector	E-UTRAN CELL ID	Latitud	Longitud	Altura Torre (m)	Marca Antena	Modelo Antena	TM	TE	Azimut
Sicuani Lechemoco	CU014	LTE_2100	S1	123907585	-14.26056	-71.24556	40	COMMSCOPE	R2V4PX308R	5	7.2	310
			S2	123907586	-14.26056	-71.24556	40	COMMSCOPE	R2V4PX308R	7	9	30
			S3	123907587	-14.26056	-71.24556	40	COMMSCOPE	R2V4PX308R	9	8.9	155
		LTE_700	S1	123907591	-14.26056	-71.24556	40	COMMSCOPE	R2V4PX308R	5	8.1	310
			S2	123907592	-14.26056	-71.24556	40	COMMSCOPE	R2V4PX308R	7	9.9	30
			S3	123907593	-14.26056	-71.24556	40	COMMSCOPE	R2V4PX308R	9	9.9	155

Fuente: Obtenido de la empresa operadora (elaboración propia)

c. eNodeB Arequipa – Sicuani

Site Name	Código Único	Sistema	Sector	E-UTRAN CELL ID	Latitud	Longitud	Altura Torre (m)	Marca Antena	Modelo Antena	TM	TE	Azimut
Arequipa Sicuani	CU568	LTE_2100	S1	47249409	-14.28232	-71.22827	24	COMMSCOPE	NNH465CR6V2	1	4.8	0
			S2	47249410	-14.28232	-71.22827	24	COMMSCOPE	NNH465CR6V3	1	3.7	130
			S3	47249411	-14.28232	-71.22827	24	COMMSCOPE	NNH465CR6V4	1	3.3	245
		LTE_700	S1	47249412	-14.28232	-71.22827	24	COMMSCOPE	NNH465CR6V5	1	6.0	0
			S2	47249413	-14.28232	-71.22827	24	COMMSCOPE	NNH465CR6V6	1	4.9	130
			S3	47249414	-14.28232	-71.22827	24	COMMSCOPE	NNH465CR6V7	1	4.5	245

Fuente: Obtenido de la empresa operadora (elaboración propia)

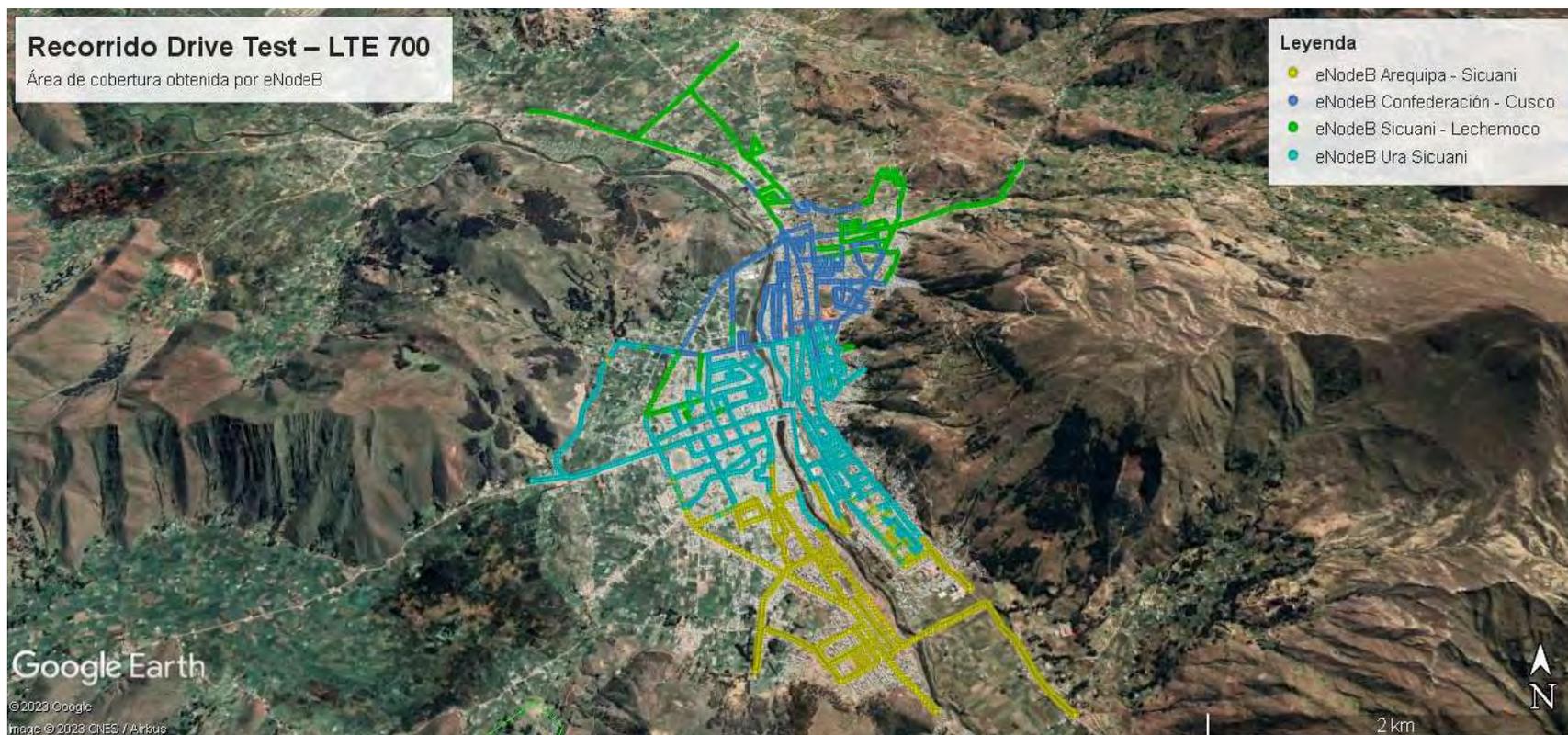
d. eNodeB Confederación – Cusco

Site Name	Código Único	Sistema	Sector	E-UTRAN CELL ID	Latitud	Longitud	Altura Torre (m)	Marca Antena	Modelo Antena	TM	TE	Azimut
Confederación Cusco	CU556	LTE_2100	S1	47246337	-14.26056	-71.22851	26	HUAWEI	ASI4518R10v06	0	5, 5	0
			S2	47246338	-14.26056	-71.22851	26	HUAWEI	ASI4518R10v07	3	5.1	90
			S3	47246339	-14.26056	-71.22851	26	HUAWEI	ASI4518R10v08	1	4.2	210
		LTE_700	S1	47246340	-14.26056	-71.22851	26	HUAWEI	ASI4518R10v09	0	6.2	0
			S2	47246341	-14.26056	-71.22851	26	HUAWEI	ASI4518R10v10	3	6.2	90
			S3	47246342	-14.26056	-71.22851	26	HUAWEI	ASI4518R10v11	1	5.3	210

Fuente: Obtenido de la empresa operadora (elaboración propia)

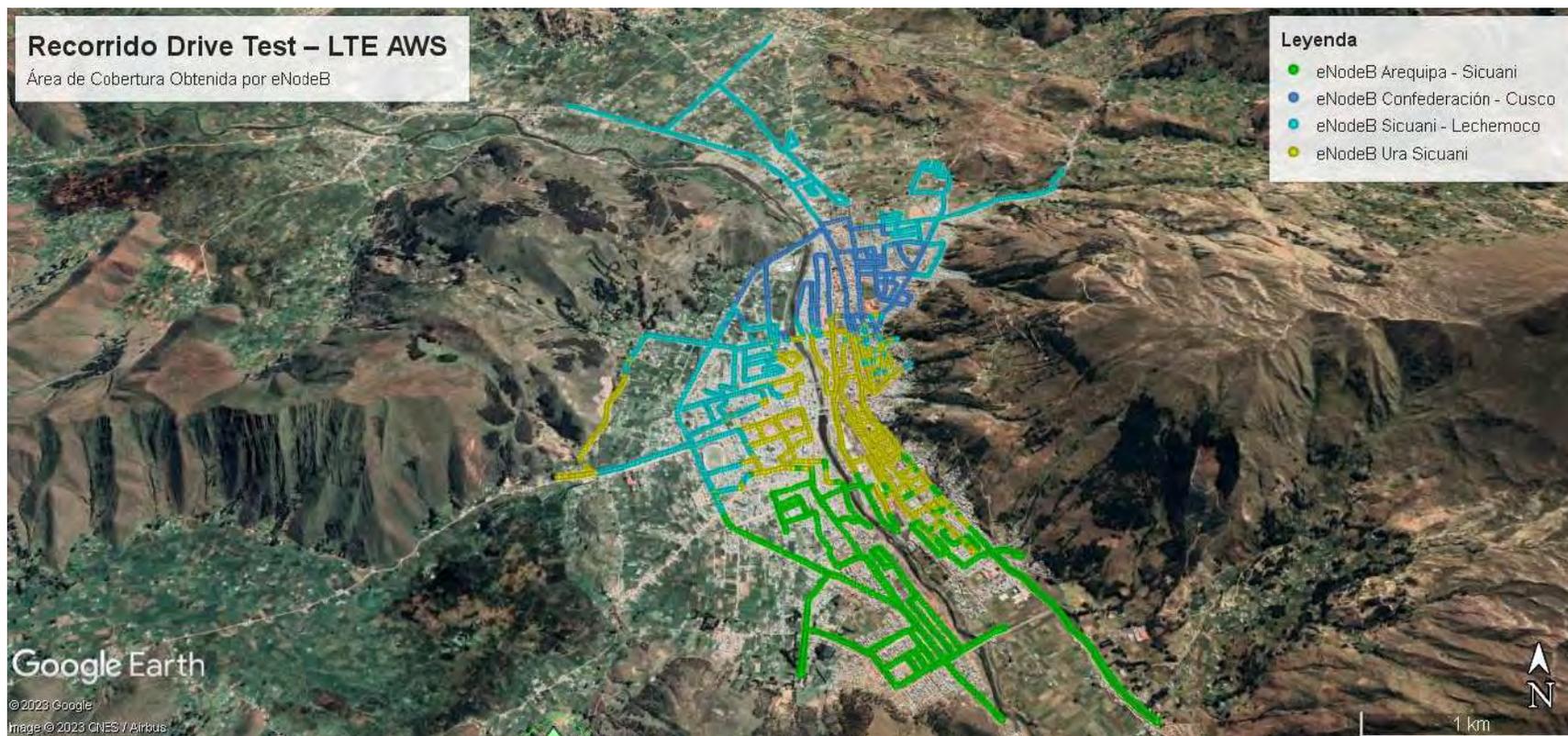
Anexo C: Mapas de medición *Drive Test* – Sicuani

a. Mapa de medición recorrido *Drive Test* para LTE 700 banda 28 - Sicuani



Fuente: Nemo Handy – Google Earth

b. Mapa de medición recorrido *Drive Test* para LTE AWS banda 4 - Sicuani



Fuente: Nemo Handy – Google Earth

Anexo D: Canales E-UTRA para LTE

E-UTRA Operating Band	Downlink			Uplink		
	F _{DL,low} [MHz]	N _{off-DL}	Range of N _{DL}	F _{UL,low} [MHz]	N _{off-UL}	Range of N _{UL}
1	2110	0	0 – 599	1920	18000	18000 – 18599
2	1930	600	600 – 1199	1850	18600	18600 – 19199
3	1805	1200	1200 – 1949	1710	19200	19200 – 19949
4	2110	1950	1950 – 2399	1710	19950	19950 – 20399
5	869	2400	2400 – 2649	824	20400	20400 – 20649
6	875	2650	2650 – 2749	830	20650	20650 – 20749
7	2620	2750	2750 – 3449	2500	20750	20750 – 21449
8	925	3450	3450 – 3799	880	21450	21450 – 21799
9	1844.9	3800	3800 – 4149	1749.9	21800	21800 – 22149
10	2110	4150	4150 – 4749	1710	22150	22150 – 22749
11	1475.9	4750	4750 – 4949	1427.9	22750	22750 – 22949
12	729	5010	5010 – 5179	699	23010	23010 – 23179
13	746	5180	5180 – 5279	777	23180	23180 – 23279
14	758	5280	5280 – 5379	788	23280	23280 – 23379
...						
17	734	5730	5730 – 5849	704	23730	23730 – 23849
18	860	5850	5850 – 5999	815	23850	23850 – 23999
19	875	6000	6000 – 6149	830	24000	24000 – 24149
20	791	6150	6150 – 6449	832	24150	24150 – 24449
21	1495.9	6450	6450 – 6599	1447.9	24450	24450 – 24599
22	3510	6600	6600 – 7399	3410	24600	24600 – 25399
23	2180	7500	7500 – 7699	2000	25500	25500 – 25699
24	1525	7700	7700 – 8039	1626.5	25700	25700 – 26039
25	1930	8040	8040 – 8689	1850	26040	26040 – 26689
26	859	8690	8690 – 9039	814	26690	26690 – 27039
27	852	9040	9040 – 9209	807	27040	27040 – 27209
28	758	9210	9210 – 9659	703	27210	27210 – 27659
29	717	9660	9660 – 9769	N/A		
(NOTE 2)						
30	2350	9770	9770 – 9869	2305	27660	27660 – 27759
31	462.5	9870	9870 – 9919	452.5	27760	27760 – 27809
32	1452	9920	9920 – 10359	N/A		
(NOTE 2)						
33	1900	36000	36000 – 36199	1900	36000	36000 – 36199
34	2010	36200	36200 – 36349	2010	36200	36200 – 36349
35	1850	36350	36350 – 36949	1850	36350	36350 – 36949
36	1930	36950	36950 – 37549	1930	36950	36950 – 37549
37	1910	37550	37550 – 37749	1910	37550	37550 – 37749
38	2570	37750	37750 – 38249	2570	37750	37750 – 38249
39	1880	38250	38250 – 38649	1880	38250	38250 – 38649
40	2300	38650	38650 – 39649	2300	38650	38650 – 39649
41	2496	39650	39650 – 41589	2496	39650	39650 – 41589
42	3400	41590	41590 – 43589	3400	41590	41590 – 43589
43	3600	43590	43590 – 45589	3600	43590	43590 – 45589
44	703	45590	45590 – 46589	703	45590	45590 – 46589
45	1447	46590	46590 – 46789	1447	46590	46590 – 46789
46	5150	46790	46790 – 54539	5150	46790	46790 – 54539
(NOTE 3)						
47	5855	54540	54540 – 55239	5855	54540	54540 – 55239
48	3550	55240	55240 – 56739	3550	55240	55240 – 56739
49	3550	56740	56740 – 58239	3550	56740	56740 – 58239
50	1432	58240	58240 – 59089	1432	58240	58240 – 59089
51	1427	59090	59090 – 59139	1427	59090	59090 – 59139
52	3300	59140	59140 – 60139	3300	59140	59140 – 60139
53	2483.5	60140	60140 – 60254	2483.5	60140	60140 – 60254
65	2110	65536	65536 – 66435	1920	131072	131072 – 131971

66 (NOTE 4)	2110	66436	66436 - 67335	1710	131972	131972 - 132671
67 (NOTE 2)	738	67336	67336 - 67535	N/A		
68	753	67536	67536 - 67835	698	132672	132672 - 132971
69 (NOTE 2)	2570	67836	67836 - 68335	N/A		
70 (NOTE 5)	1995	68336	68336 - 68585	1695	132972	132972 - 133121
71	617	68586	68586 - 68935	663	133122	133122-133471
72	461	68936	68936 - 68985	451	133472	133472-133521
73	460	68986	68986 - 69035	450	133522	133522-133571
74	1475	69036	69036 - 69465	1427	133572	133572 - 134001
75 (NOTE 2)	1432	69466	69466 - 70315	N/A		
76 (NOTE 2)	1427	70316	70316 - 70365	N/A		
85	728	70366	70366 - 70545	698	134002	134002 - 134181
87	420	70546	70546 - 70595	410	134182	134182 - 134231
88	422	70596	70596 - 70645	412	134232	134232 - 134281
<p>NOTE 1: The channel numbers that designate carrier frequencies so close to the operating band edges that the carrier extends beyond the operating band edge shall not be used. This implies that the first 7, 15, 25, 50, 75 and 100 channel numbers at the lower operating band edge and the last 6, 14, 24, 49, 74 and 99 channel numbers at the upper operating band edge shall not be used for channel bandwidths of 1.4, 3, 5, 10, 15 and 20 MHz respectively.</p> <p>NOTE 2: Restricted to E-UTRA operation when carrier aggregation is configured.</p> <p>NOTE 3: The following NDL and NUL are allowed for operation in Band 46 assuming 20MHz channel bandwidth: $N_{DL} = N_{UL} = \{n-2, n-1, n, n+1, n+2 \mid n = 46890 (5160 \text{ MHz}), 47090 (5180 \text{ MHz}), 47290 (5200 \text{ MHz}), 47490 (5220 \text{ MHz}), 47690 (5240 \text{ MHz}), 47890 (5260 \text{ MHz}), 48090 (5280 \text{ MHz}), 48290 (5300 \text{ MHz}), 48490 (5320 \text{ MHz}), 48690 (5340 \text{ MHz}), 50090 (5480 \text{ MHz}), 50290 (5500 \text{ MHz}), 50490 (5520 \text{ MHz}), 50690 (5540 \text{ MHz}), 50890 (5560 \text{ MHz}), 51090 (5580 \text{ MHz}), 51290 (5600 \text{ MHz}), 51490 (5620 \text{ MHz}), 51690 (5640 \text{ MHz}), 51890 (5660 \text{ MHz}), 52090 (5680 \text{ MHz}), 52290 (5700 \text{ MHz}), 52490 (5720 \text{ MHz}), 52740 (5745 \text{ MHz}), 52940 (5765 \text{ MHz}), 53140 (5785 \text{ MHz}), 53340 (5805 \text{ MHz}), 53540 (5825 \text{ MHz}), 53740 (5845 \text{ MHz}), 53940 (5865 \text{ MHz}), 54140 (5885 \text{ MHz}), 54340 (5905 \text{ MHz})\}$. And the following N_{DL} and N_{UL} are allowed for operation in Band 46 assuming 10MHz channel bandwidth: $N_{DL} = N_{UL} = \{n-2, n-1, n, n+1, n+2 \mid n = 52590 (5730 \text{ MHz}), 53590 (5830 \text{ MHz})\}$. 10 MHz channel bandwidth shall only apply in certain regions where the absence of non 3GPP technologies can be guaranteed on a long term basis in this version of specification.</p> <p>NOTE 4: Downlink frequency range 2180 – 2200 MHz is restricted to E-UTRA operation when carrier aggregation is configured.</p> <p>NOTE 5: The range 2010-2020 MHz of the DL operating band is restricted to E-UTRA operation when carrier aggregation is configured and TX-RX separation is 300 MHz. The range 2005-2020 MHz of the DL operating band is restricted to E-UTRA operation when carrier aggregation is configured and TX-RX separation is 295 MHz.</p>						

Fuente: Obtenida de (Zapata, 2022)

Anexo E: Muestras obtenidas de los recorridos Drive Test

Las siguientes tablas muestran 24 muestras del total recolectadas para cada caso (en las tecnologías LTE-700 y LTE-AWS), sólo se consideran las más significativas.

Resultados: Indicadores de Desempeño Red LTE-700 Banda 28 - Sicuani						
Latitude	Longitude	Node	RSRP	RSRQ	SINR	ARFCN
-14.2584925	-71.2223969	47246340	-103	-16	-8	9585
-14.25849199	-71.2223969	47246340	-103	-16	-7.4	9585
-14.25849075	-71.2223969	47246340	-104	-16	-9	9585
-14.25845237	-71.22239496	47246340	-102.6	-13.6	-1.5	9585
-14.25839557	-71.22238369	47246340	-97	-14	-3.5	9585
-14.2582867	-71.2223892	47246340	-99	-14.5	0	9585
-14.2507787	-71.21172351	47246340	-112.5	-15	-4.7	9585
-14.25063947	-71.21167778	47246340	-114	-15	-1.5	9585
-14.25060233	-71.21166153	47246340	-114	-15	-2.5	9585
-14.25051326	-71.21163404	47246340	-114	-15	-4	9585
-14.25046295	-71.21162419	47246340	-113.5	-14	-2	9585
-14.25032557	-71.21158037	47246340	-115	-14.5	-4	9585
-14.25026101	-71.21156979	47246340	-115	-15	-2.9	9585
-14.25013986	-71.21157792	47246340	-113.5	-15	-3.2	9585
-14.2500976	-71.21161608	47246340	-113	-15	-2.7	9585
-14.24997744	-71.21169872	47246340	-113.5	-15	-3.2	9585
-14.24985297	-71.2117299	47246340	-116	-15.5	-3.5	9585
-14.24979229	-71.21172567	47246340	-117.9	-16	-3.7	9585
-14.24973539	-71.21169415	47246340	-118	-15	-3.7	9585
-14.24971959	-71.2116928	47246340	-118	-15	-1.5	9585
-14.24968258	-71.21171135	47246340	-116	-15	-8.5	9585
-14.24974902	-71.2117411	47246340	-114.5	-15	-9.4	9585
-14.2497911	-71.211731	47246340	-116	-15.5	-10.5	9585
-14.24988831	-71.21174234	47246340	-117	-16	-10.5	9585

Resultados: Indicadores de Desempeño Red LTE-AWS Banda 4 - Sicuani						
Latitude	Longitude	Node	RSRP	RSRQ	SINR	ARFCN
-14.2406492	-71.2345352	47246338	-108.6	-11.9	3.1	2050
-14.24073721	-71.23459672	47246338	-109	-14	6.9	2050
-14.2442439	-71.23480004	47246338	-88.9	-9.5	17.5	2050
-14.26015339	-71.22773889	47246338	-89.9	-11	2.8	2050
-14.26028444	-71.2277132	47246338	-96	-12	7.1	2050
-14.26036637	-71.22769288	47246338	-91	-12	2.7	2050
-14.26050743	-71.22766699	47246338	-85.4	-12	-3	2050
-14.26062953	-71.22764258	47246338	-88.2	-9	7	2050
-14.26075921	-71.2276101	47246338	-88.2	-8.5	8	2050
-14.26099746	-71.22756057	47246338	-81	-9	18	2050
-14.26115947	-71.22753629	47246338	-77	-7.9	16.5	2050
-14.26128585	-71.22750637	47246338	-79	-9.5	21	2050
-14.2613735	-71.2274857	47246338	-80.6	-11.9	16.1	2050
-14.26151781	-71.22746159	47246338	-81	-14	18	2050
-14.26165143	-71.22745433	47246338	-82	-15	14.9	2050
-14.26181501	-71.22742531	47246338	-78.9	-15.5	18	2050
-14.26197132	-71.227398	47246338	-76	-12.6	17.6	2050
-14.26210322	-71.22737365	47246338	-75.5	-10.9	11.6	2050
-14.26225961	-71.22733328	47246338	-78	-12	13.5	2050
-14.2623498	-71.22733089	47246338	-82	-10.1	14.5	2050
-14.26252109	-71.2273116	47246338	-84	-15	15.2	2050
-14.26259818	-71.2273027	47246338	-85	-16.9	9.8	2050
-14.26279273	-71.22727221	47246338	-86.2	-16	10.9	2050
-14.26291491	-71.22725799	47246338	-89	-14.5	10.3	2050

Anexo F: Tipos de predicciones en el *software Atoll*

Clasificación	Nombre	Depende del tráfico	Descripción
Por nivel de señal	<i>Coverage by Signal Level</i>	No	Permite predecir las zonas de cobertura según los niveles de señal del transmisor en cada pixel del mapa.
	<i>Coverage by Transmitter</i>	No	Permite predecir las zonas de cobertura por transmisor analizando para cada pixel del mapa el mejor transmisor.
	<i>Overlapping Zones</i>	No	Permite calcular las zonas donde existe cobertura de dos o más transmisores.
	<i>Effective Signal Analysis</i>	No	Permite calcular los niveles de señal de diferentes señales LTE (señales de referencia, SS, PBCH, PDSCH, PDCCH, PUSCH).
Por calidad de señal	<i>Coverage by C/(I+N) Level</i>	Si	Permite predecir los niveles de interferencia y de portadora a interferencia y ruido $C/(I+N)$ para cada pixel del mapa.
	<i>Service Area Analysis</i>	Si	Permite calcular y mostrar los mejores Radio Bearers disponibles para cada pixel del mapa basados en las $C/(I+N)$ de los mismos.
	<i>Effective Service Area Analysis</i>	Si	Permite mostrar las zonas donde un servicio se encuentra disponible, tanto en el DL como en el UL.
	<i>Coverage By Throughput</i>	Si	Permite calcular y mostrar para cada pixel del mapa los <i>Channel Throughputs</i> y <i>Cell Capacities</i> basados en los niveles de $C/(I+N)$ y en los Radio Bearers disponibles. Además, permite mostrar el <i>Aggregate Cell Throughput</i> para resultados de simulaciones.
	<i>Coverage by Quality Indicator</i>	Si	Permite Calcular y mostrar diferentes indicadores de calidad (BLER, BER, entre otros) basados en los Radio bearers y en los niveles de $C/(I+N)$ de cada pixel.

Fuente: Obtenida de (Iglesias, 2016)

Anexo G: Valores de la desviación estándar de *Shadowing*

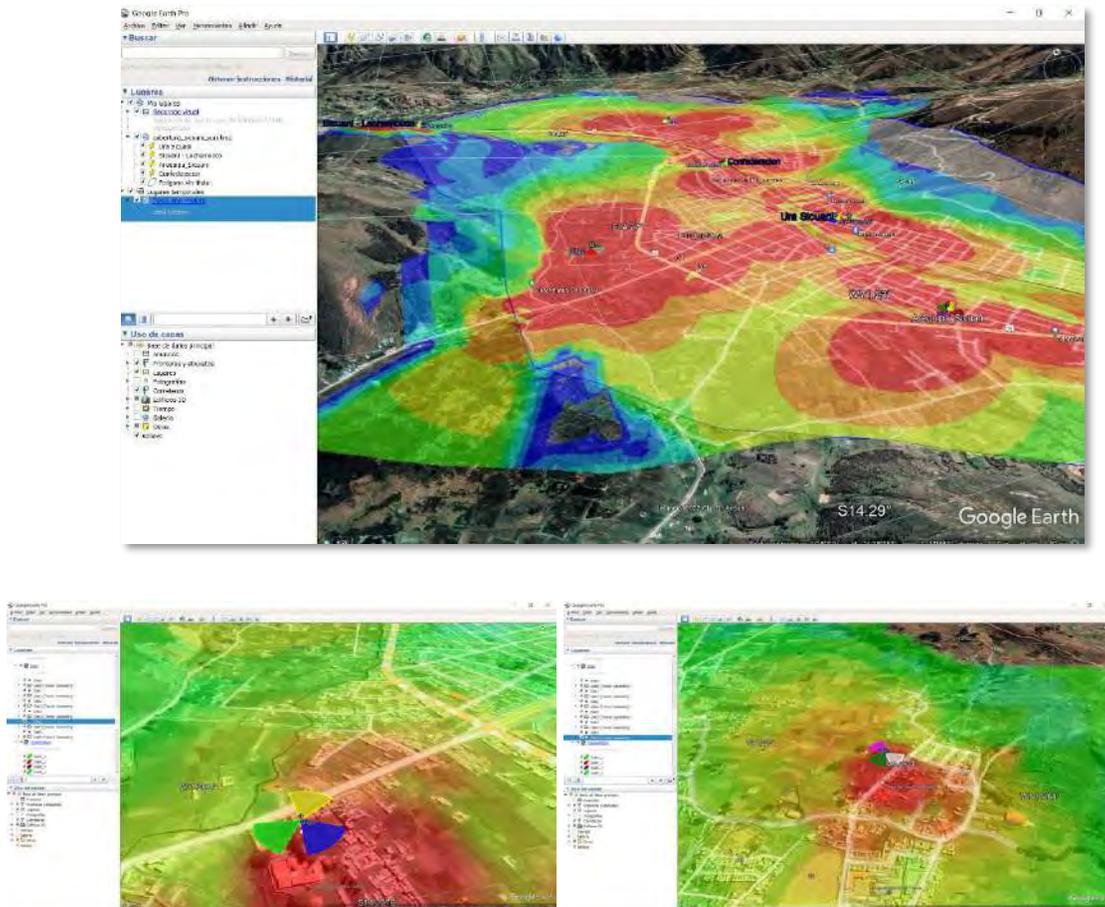
Desviación Estándar de Shadowing	Probabilidad de cobertura de área Celular	Probabilidad de cobertura en el borde Celular	Margen de Shadowing sin ganancia HO	Velocidad UE
9 dB	95%	87.7%	11.7 dB	3 Km/h
				50 Km/h
				120 Km/h
	90%	77.7%	7.7 dB	3 Km/h
				50 Km/h
				120 Km/h
8 dB	95%	86.2%	8.7 dB	3 Km/h
				50 Km/h
				120 Km/h
	90%	75.1%	5.4 dB	3 Km/h
				50 Km/h
				120 Km/h
7 dB	95%	84.9%	7.2 dB	3 Km/h
				50 Km/h
				120 Km/h
	90%	73.3%	4.3 dB	3 Km/h
				50 Km/h
				120 Km/h
6 dB	95%	83.9%	5.9 dB	3 Km/h
				50 Km/h
				120 Km/h
	90%	70.9%	3.3 dB	3 Km/h
				50 Km/h
				120 Km/h

Fuente: Obtenida de (Solórzano, 2018)

Anexo H: Nuevas estaciones base

Las dos nuevas estaciones base, ayudan a rellenar las áreas de crisis recogidas por el *Drive Test*, a la vez se mejoran la calidad de cobertura y señal de la ciudad de Sicuani-Cusco. Se presenta en la figura una vista panorámica de ambos eNodeBs.

Fotografía panorámica de las nuevas estaciones base



Fuente: Software Atoll – Google Earth