

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE ESTUDIO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Estimación del desempeño de una red acceso LTE con doble portadora mediante simulaciones realizadas para la ciudad de Otuzco 2021

Línea de investigación: Comunicación, Tecnologías de la información e innovación

Autores:

Acevedo Celis, Piero Zoe

Padilla Alayo, Claudia Melany

Jurado evaluador:

Presidente : Azabache Fernández, Filiberto Melchor

Secretario : Ramos Rojas, Ovidio Hildebrando

Vocal : Gonzales Cadenillas, Clayder Alejandro

Asesor:

Cerna Sanchez, Eduardo Elmer

Código Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5778-2259>

Trujillo-Perú
2023

Fecha de Sustentación: 27/04/2023

ESTIMACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UNA RED ACCESO LTE CON DOBLE PORTADORA MEDIANTE SIMULACIONES REALIZADAS PARA LA CIUDAD DE OTUZCO 2021

por Claudia Padilla Piero Acevedo

Fecha de entrega: 20-abr-2023 01:02p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2070528460

Nombre del archivo: Tesis_Claudia_Padilla_-_Piero_Acevedo_20-04-23.docx (9.09M)

Total de palabras: 9954

Total de caracteres: 53290


Ms. Ing. Eduardo Cerna Sánchez
Asesor

ESTIMACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UNA RED ACCESO LTE CON DOBLE PORTADORA MEDIANTE SIMULACIONES REALIZADAS PARA LA CIUDAD DE OTUZCO 2021

INFORME DE ORIGINALIDAD

10%	10%	3%	1%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.upao.edu.pe Fuente de Internet	3%
2	1library.co Fuente de Internet	3%
3	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
4	repositorio.espe.edu.ec Fuente de Internet	1%
5	repository.usta.edu.co Fuente de Internet	1%

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

Apagado


Ms. Ing. Eduardo Cerna Sánchez
Asesor

DECLARACION DE AUTENTICIDAD

Yo, Eduardo Elmer Cerna Sanchez, docente del programa de Estudio de Pregrado de la Universidad Privada Antenor Orrego, asesor de la tesis “Estimación del desempeño de una red acceso LTE con doble portadora mediante simulaciones realizadas para la ciudad de Otuzco 2021”, de los autores Piero Zoe Acevedo Celis y Claudia Melany Padilla Alayo, dejo constancia lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud del 10%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software Turnitin el día 20 de abril del 2023.
- He revisado con detalle dicho reporte de la Tesis “Estimación del desempeño de una red acceso LTE con doble portadora mediante simulaciones realizadas para la ciudad de Otuzco 2021” y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las normas establecidas por la Universidad.

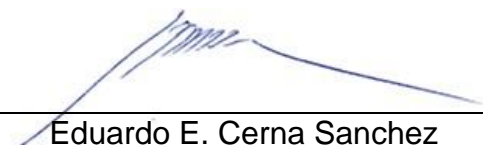
Ciudad y fecha: Trujillo, 27 de abril de 2023



Piero Zoe Acevedo Celis
DNI: 71214838



Padilla Alayo Claudia Melany
DNI: 74981330



Eduardo E. Cerna Sanchez
CIP N° 80252
Asesor de Tesis

Jurado de sustentación Oral

Ms. Ing. FILIBERTO AZABACHE
FERNÁNDEZ
PRESIDENTE
CIP N° 97916

Ms. Ing. OVIDIO HILDEBRANDO
RAMOS ROJAS
SECRETARIO
CIP N° 92622

Ms. Ing. CLAYER ALEJANDRO
GONZALES CADENILLAS
VOCAL
CIP N° 240498

Entregado el: 27/04/2023

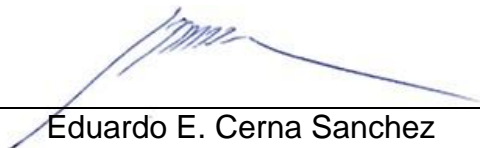
Aprobado por: 27/04/2023



Piero Zoe Acevedo Celis
DNI: 71214838



Padilla Alayo Claudia Melany
DNI: 74981330



Eduardo E. Cerna Sanchez
CIP N° 80252
Asesor de Tesis

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE ESTUDIO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Estimación del desempeño de una red acceso LTE con doble portadora mediante simulaciones realizadas para la ciudad de Otuzco 2021

Línea de investigación: Comunicación, Tecnologías de la información e innovación

Autores:

Acevedo Celis, Piero Zoe

Padilla Alayo, Claudia Melany

Jurado evaluador:

Presidente : Azabache Fernandez, Filiberto Melchor

Secretario : Ramos Rojas, Ovidio Hildebrando

Vocal : Gonzales Cadenillas, Clayder Alejandro

Asesor:

Cerna Sanchez, Eduardo Elmer

Código Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5778-2259>

Trujillo-Perú

2023

Fecha de Sustentación: 27/04/2023

Dedicatoria

A Dios, a mi familia y a mis profesores

Claudia Melany Padilla Alayo

A mi familia por apoyarme en todo momento

Piero Zoe Acevedo Celis

Agradecimientos

Agradecida eternamente por todo el apoyo a mi familia.

Claudia Melany Padilla Alayo

Agradecido con mis padres y hermanos.

Piero Zoe Acevedo Celis

RESUMEN

La presente tesis de investigación tuvo como principal objetivo analizar una red LTE en la ciudad de Otuzco, en base al cumplimiento de indicadores de desempeño, a través del aumento del número de frecuencias portadoras. Esto se realizó sobre un escenario modelado con el uso de un reporte de drive test, para posteriormente crear un escenario similar al de la red real. Al realizar las simulaciones y predicciones respectivas, se encontró al escenario inicial o modelado, con los siguientes resultados para cada indicador de desempeño: RSRP de 88.7%, SINR de 88.7%, Distribución Serving Cell de 75% y un Bloque de Saturación de 108%; bajo el uso de la frecuencia nueva y principal (2535MHz y 900MHz) se comprobó la mejora de los indicadores, y se obtuvieron los siguientes porcentajes: RSRP de 96.6%, SINR de 96.6%, Distribución Serving Cell del 100% y un Bloque de Saturación del 0%. Por último, se obtuvo una mejora del 47.71% en una capacidad de transmisión de 30-40 Mbps.

Palabras clave: red móvil LTE, doble portadora, indicadores de desempeño, escenario inicial, escenario estimado.

ABSTRACT

The main objective of this research thesis was to analyze an LTE network in the city of Otuzco, based on compliance with performance indicators, through the increase in the number of carrier frequencies. This was done on a modeled scenario using a drive test report, to later create a scenario similitar to the real network. When carrying out the respective simulations and predictions, the initial or modeled scenario was found, with the following results for each performance indicator: RSRP of 88.7%, SINR of 88.7%, Serving Cell Distribution of 75% and a Saturation Block of 108%. ; Under the use of the new and main frequency (2535MHz and 900MHz) the improvement of the indicators was verified, and the following percentages were obtained: RSRP of 96.6%, SINR of 96.6%, Serving Cell Distribution of 100% and a Saturation Block. from 0%. Finally, an improvement of 47.71% was obtained in a transmission capacity of 30-40 Mbps.

Keywords: LTE mobile network, dual carrier, performance indicators, initial scenario, estimated scenario.

Presentación

Señores miembros del Jurado:

De conformidad con lo estipulado en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Privada Antenor Orrego, ponemos a su disposición el informe de tesis titulado “ESTIMACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UNA RED ACCESO LTE CON DOBLE PORTADORA MEDIANTE SIMULACIONES REALIZADAS PARA LA CIUDAD DE OTUZCO 2021” para que sea revisado y evaluado y de ser aprobado pueda ser defendido oralmente para optar el título profesional de Ingeniero Electrónico.

De antemano, nos excusamos de los errores involuntarios en que se hubiera incurrido en el desarrollo y redacción del misma, esperando del honorable jurado un justo dictamen.

Acevedo Celis, Piero Zoe

Padilla Alayo, Claudia Melany

Tabla de contenidos

ACREDITACIONES	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS.....	
RESUMEN.....	
ABSTRACT	9
PRESENTACIÓN	
ÍNDICE DE CONTENIDO	
ÍNDICE DE FIGURAS.....	12
ÍNDICE DE TABLAS.....	15
I. INTRODUCCIÓN	16
1.1 Problema de Investigación	16
1.2 Objetivos de la investigación	18
1.3 Justificación del Estudio	18
II. MARCO DE REFERENCIA	19
2.1 Antecedentes del estudio	19
2.2 Marco teórico	22
2.3 Marco conceptual.....	39
2.4 Hipótesis	41
III. METODOLOGIA EMPLEADA.....	45
3.1 Tipo y nivel de investigación.....	45
3.2 Población y muestra.....	45
3.3 Diseño de contrastación.....	45
3.4 Diseño de investigación	46
3.5 Procedimiento	46
3.6 Técnicas e instrumentos de investigación	47
3.7 Procesamiento y análisis de datos.	51
IV. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	68
4.1 Análisis e interpretación de resultados	68
V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	71
VI. CONCLUSIONES.....	84
VII. RECOMENDACIONES.....	85
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
IX. ANEXOS:	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Red de acceso E-UTRAN.	23
Figura 2. Arquitectura de red LTE.	24
Figura 3. Arquitectura básica de la red troncal EPC.	26
Figura 4. Multiplexación de usuarios por OFDMA.	28
Figura 5. Definición gráfica de Resource Block.	30
Figura 6. Patrón de radiación de un dipolo.	31
Figura 7. Sistema MIMO.	32
Figura 8. Modelo de Elevación Digital Aster Global DEM	33
Figura 9. Orto imagen.	33
Figura 10. Ciclo de optimización.	35
Figura 11. Proyección de PEA en el año 2020	49
Figura 12. Imagen en formato GeoTIFF	51
Figura 13. Configuración y recorte de la ciudad de Otuzco.	52
Figura 14. Orto imagen de la ciudad de Otuzco.	53
Figura 15. Superposición de imágenes.	54
Figura 16. Mapa de elevación de terreno de Otuzco 3D.	54
Figura 17. Mapa de clasificación de terreno.	55
Figura 18. Propiedades del Business User.	56
Figura 19. Propiedades del Standard User.	57
Figura 20. Propiedades de Pedestrian.	57
Figura 21. Patrón vertical y horizontal de la antena APXV86-906516-c.	59
Figura 22. Configuración de la antena APXV86-906516-c.	59
Figura 23. Patrón vertical de la antena APXV86-906516-c.	60

<u>Figura 24. Patrón horizontal de la antena APXV86-906516-c.</u>	60
<u>Figura 25. Configuración de un sector del site LAL0102.</u>	61
<u>Figura 26. Ingreso de los datos del drive test en el software Atoll.</u>	62
<u>Figura 27. Ubicación de los 3144 puntos en el terreno (Campo: Serving Cell).</u>	63
<u>Figura 28. Comparación de los puntos (Parámetro: RSRP).</u>	64
<u>Figura 29. Posición de los nuevos sites.</u>	65
<u>Figura 30. Sites con segunda portadora.</u>	65
<u>Figura 31. Configuración de la segunda frecuencia para LAL_NEW03</u>	66
<u>Figura 32. Comparación SINR con criterio aceptable >90%</u>	67
<u>Figura 33. Comparación RSRP escenario y datos drive test.</u>	68
<u>Figura 34. Comparación SINR datos drive test y escenario calibrado.</u>	69
<u>Figura 35. Resource Block en escenario calibrado.</u>	70
<u>Figura 36. Comparación Serving Cell escenario y datos drive test</u>	70
<u>Figura 37. Comparación RSRP escenario modelado y estimado.</u>	71
<u>Figura 38. Comparación SINR escenario modelado y estimado.</u>	72
<u>Figura 39. Comparación Serving Cell escenario modelado y estimado.</u>	73
<u>Figura 40. Comparación Resource Block escenario modelado y estimado.</u>	74
<u>Figura 41. Comparación SINR escenario estimado previo y escenario estimado.</u>	76
<u>Figura 42. Fragmento de Comparación SINR.</u>	78
<u>Figura 43. Comparación vista escenario estimado previo y escenario estimado final.</u>	79
<u>Figura 44. Comparación interferencia escenario estimado previo y escenario estimado.</u>	80
<u>Figura 45. Comparación vista escenario estimado previo y escenario estimado.</u>	81
<u>Figura 46. Comparación interferencia escenario estimado previo y escenario estimado.</u>	81

[Figura 47. Comparación de capacidad de transmisión escenario estimado previo y escenario estimado.](#) 82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Canalización en sistema LTE	29
Tabla 2. Operacionalización de la Variable Independiente	43
Tabla 3. Operacionalización de la Variable Dependiente	44
Tabla 4. Técnicas de recolección de datos	47
Tabla 5. Fragmento de los datos del drive test	48
Tabla 6. Proyección de PEA en el año 2020.	49
Tabla 7. Fragmento de las líneas de consumo controlado por departamento	50
Tabla 8. Cálculo líneas de consumo controlado ciudad de Otuzco.	58
Tabla 9. Resultados del parámetro RSRP	71
Tabla 10. Resultados del parámetro SINR	72
Tabla 11. Resultados del parámetro Serving Cell	73
Tabla 12. Saturación de recursos en escenario modelado.	74
Tabla 13. Saturación de recursos en escenario estimado.	75
Tabla 14. Comparación de capacidad de transmisión.	83

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Problema de Investigación

a. Descripción de la realidad problemática

En el Perú, existen diversos tipos de servicios brindados por empresas de telecomunicaciones, uno de ellos es el servicio de telefonía móvil, que ha ido evolucionando a lo largo de los años. Actualmente, según el Organismo Superior de Inversión Privada en Telecomunicaciones, el 85% de la población peruana puede utilizar la tecnología de Evolución a Largo Plazo (LTE), siendo el estándar más usado para las comunicaciones móviles (Osiptel, 2019).

Para poder comprender e interpretar alguna deficiencia en las redes LTE, es indispensable realizar la evaluación respectiva de los indicadores clave de rendimiento (KPI), ya que estos permitirán obtener la información necesaria sobre el comportamiento y rendimiento de la red (Imoize, 2016). Es por ello que, en diversos trabajos de investigación se han estudiado estos indicadores, tal es el caso de la tesis de Luzuriaga, P. (2019), en el que se realizó un análisis de los KPI's en un escenario modelado y uno estimado. Para este último, se le agregaron dos estaciones base (BS), para obtener una mejora porcentual en los parámetros de la red, sobre todo en el índice de usuarios rechazados por saturación.

Según Richard, C. (2014) la mejora de la capacidad del envío de datos se da a través de la división y aumento de celdas al realizar el aumento de estaciones base. Esto se da al reducir el alcance de cada torre y potencia emitida por los transmisores de radio, así se reutiliza el espectro para permitir transmisiones simultáneas. De esta forma, el aumento de estaciones base es una de las técnicas de ampliación de capacidad más utilizadas en el Perú, puesto que se contabilizan 27 983 distribuidas en las 4 operadoras móviles y una relación de aumento del 3.3 BS en los últimos cinco años. Asimismo, se tiene la concepción

de seguir realizando la ampliación de estas por los siguientes años. (OSIPTEL, 2018)

Sin embargo, según Saha, R. (2017), afirma que un aumento de estaciones base produce mayores interferencias, debido a que funcionan bajo la misma frecuencia. Además, según Fernández, M. (2010), las estaciones base deben utilizar una potencia menor para evitar la producción de interferencias con estaciones base que utilicen canales iguales. De forma que, se diseña la ubicación de las BS para que permita la cobertura suficiente con niveles de señal óptimos.

En base a esta nueva problemática, se realizó la presente investigación para analizar el comportamiento de los indicadores de desempeño en base al uso de doble frecuencia portadora en una red de acceso LTE.

b. Descripción del problema

Variación de los parámetros de un escenario inicial de red de acceso LTE, bajo el incremento del número de frecuencias portadoras.

c. Formulación del Problema

¿Cuál es el comportamiento de los parámetros de la red de acceso LTE de la ciudad de Otuzco en el año 2021, al realizar un aumento del número de frecuencias portadoras LTE?

1.2 Objetivos de la investigación

a. Objetivo General

- Estimar el comportamiento de los parámetros de una red de acceso LTE con el incremento del número de frecuencias (portadoras LTE) utilizadas en las estaciones bases.

b. Objetivos Específicos

- Identificar características técnicas de equipamiento y parámetros de propagación que permitan reproducir un escenario de simulación para una red de acceso LTE en la ciudad de Otuzco.
- Estimar parámetros de desempeño de una red de acceso LTE en la ciudad de Otuzco, mediante proceso de simulación.
- Estimar parámetros de desempeño de una red de acceso LTE en la ciudad de Otuzco, mediante simulación del aumento de portadoras.
- Identificar y describir diferencias en los indicadores de desempeño en la red de acceso en los dos escenarios LTE.

1.3 Justificación del Estudio

La presente investigación estuvo justificada académicamente. Se tuvo un escenario previo en el que se estudiaron los parámetros principales de una red al hacer un aumento de estaciones base. Sin embargo, esto generó problemas adicionales como la degradación de indicadores de KPI, y por ello, esta investigación permitió mostrar las variaciones de los parámetros bajo una distinta perspectiva. Se considera importante obtener este conocimiento, ya que esto conllevaría a brindar una base para futuros estudios del uso de dos a más frecuencias portadoras en una red móvil.

II. MARCO DE REFERENCIA

2.1 Antecedentes del estudio

- a. Análisis de indicadores clave de rendimiento de una red 4G LTE basado en datos experimentales obtenidos de una ciudad inteligente densamente poblada.**

Artículo realizado por Agbotiname Imoize, Kehinde Orolu y Aderemi Atayero en el año 2020 en Nigeria, describe la realización de mediciones de radiofrecuencia y análisis de los indicadores claves de rendimiento a un ancho de banda determinado para una red 4G LTE. Esta investigación fue importante para evaluar el comportamiento de distintas frecuencias en una ciudad y la variación de los indicadores claves de rendimiento de la red 4G LTE.

- b. Análisis de la influencia del aumento del número de sites en los indicadores claves de acceso radio LTE.**

Este trabajo fue hecho por Paulo Luzuriaga en el año 2019, de la Universidad Privada Antenor Orrego, el objetivo general fue analizar la influencia del aumento del número de sites en los indicadores claves de acceso radio LTE del operador móvil en la ciudad de Otuzco. Para ello, por medio de un estudio previo mediante drive test, se estimó un comportamiento previo de la red en simulación. Así, se identificaron los criterios a tomar, poder aumentar el número de estaciones base y analizar los KPI en el escenario con el nuevo modelo. Este trabajo sirvió de suma importancia para el que se presenta, ya que se basó en el diseño estimado para obtener un nuevo diseño modelado bajo diferentes características.

c. Identificación de factores que afectan la calidad de servicio de la red móvil-LTE.

El trabajo de investigación realizado por Bruno Barrantes y Juan Saenz de la Universidad Privada Antenor Orrego en el año 2019, tuvo como principal objetivo el identificar los factores que llegan a afectar la QoS de una red de acceso LTE en la ciudad de Otuzco, se realizó mediante la recolección de datos de un Drive Test. Se realizó la comparación con valores de calidad sugeridos por 3GPP encontrando valores deficientes e identificando que la inadecuada ubicación de las estaciones base pertenecientes a la red permitía el no poder obtener una cobertura uniforme. Esta investigación fue utilizada ya que abarca aspectos importantes de una red de acceso LTE mediante la recolección de datos del aplicativo Drive Test.

d. Estudio del comportamiento de los KPI en campo de las soluciones in-building Sistemas de antenas distribuidas y lamsite para una red de acceso 4G – LTE.

En el año 2016, se realizó el trabajo de investigación por Fidel Guillermo Gil Valeriano de la Universidad Privada Antenor Orrego; acerca del comportamiento de los Indicadores Clave de Rendimiento (KPI) para una red de acceso 4G – LTE, se tuvo como principal objetivo poder determinar los KPI directamente en campo. Para ello, se realizó la evaluación de las características de dos soluciones ubicadas a una determinada distancia. Posterior a ello, se elaboró un reporte basado en la recolección de los indicadores para luego analizarlos en cada una de las soluciones. Esta investigación fue considerada ya que aporta el conocimiento teórico acerca de los indicadores clave de rendimiento, los cuales fueron analizados en el presente trabajo.

e. Planificación y optimización de una red LTE con la herramienta Atoll.

La investigación fue realizada por Luis Iglesias Quiñones en el año 2016 en la Universidad Politécnica de Catalunya, en la que se tuvo como principal objetivo planificar y optimizar una red LTE mediante el Software Atoll. Se tuvo que obtener los conocimientos necesarios para el uso del Software y así realizar el diseño y optimización respectiva, para finalmente obtener distintas características de la red. Se utilizó la información acerca del uso del software Atoll para el desarrollo del presente trabajo.

f. Carrier Aggregation in Long Term Evolution Advanced

Este trabajo de investigación realizado por Mohammed Abduljawad, Mohamed Hadi y Jalel Chebil en el año 2012, describe y define los conceptos relacionados a la agregación de diferentes frecuencias portadoras en la colaboración de grupos (3GPP) LTE-Advanced a diferentes escenarios de implementación y planificación. Este artículo fue fundamental para el aumento de tráfico de datos en las redes 4G debido a la constante evolución tecnológica y como con ayuda del aumento de portadoras las mejoras son bastante considerables. Esta investigación fue utilizada para sintetizar los conceptos, ventajas, componentes y diseño de una red LTE que hace el uso del Carrier aggregation.

2.2 Marco teórico

2.2.1 Historia de los sistemas de telecomunicaciones móviles:

Los primeros sistemas de telecomunicaciones móviles fueron mostrados en los 80. Según Cox (2014), la primera generación (1G) usaba técnicas de comunicación análoga, grandes sistemas que no usaban todo el espectro de radio disponible eficientemente. Los celulares eran costosos y solo se utilizaba para voz.

Esto fue reemplazado en 1990 con la aparición de la segunda generación (2G). Fueron los primeros sistemas en usar tecnología digital, por consiguiente, se usó de una forma más eficiente el espectro de radio. A diferencia del 1G, este sistema contaba con mensajería. El sistema más popular 2G fue el GSM (Global System for Mobile Communications) (Cox, 2014).

Posteriormente, apareció la tecnología 3G, no tuvo un gran impacto porque se esperaba un mejor rendimiento. No obstante, la tecnología 3G obtuvo mejores resultados cuando se introdujo 3.5G. Esta tecnología aumenta la tasa promedio a la que un usuario puede descargar y subir información a una mayor velocidad de datos (Cox, 2014).

2.2.2 Estandarización LTE:

La tecnología de cuarta generación o 4G destaca en que los servicios de voz, mensajes y otros usan el protocolo IP. Además, la velocidad se mejoró con gran diferencia en comparación con las antiguas generaciones, alcanzando velocidades entre el rango de 100Mb/s y 1Gb/s. (Agusti, 2010: 35) Otras diferencias y beneficios de la LTE es que sus equipos son más fiables, escalables, más fáciles de implementar y con menor costo ya que al utilizar protocolo de internet, disminuye el número de conversores en la red estructurada. Asimismo, ofrece menor retardo dentro de una red y alta calidad de vídeo. (Fernández, 2015).

a. Arquitectura de la red LTE.

La arquitectura total del sistema LTE se llama sistema de paquetes evolucionado (EPS). Dicha arquitectura está formada por una red de acceso E-UTRAN y la red troncal EPC, esta última es una versión mejorada de los sistemas de segunda y tercera generación (Agusti, 2010:85).

b. Red de acceso E-UTRAN:

La arquitectura de esta red E-UTRAN (Figura 1) está compuesta por un elemento o entidad singular llamada evolved NodeB (eNB). Un eNB es un elemento equipado que tiene como función el control de acceso inalámbrico, además se encuentra conectado a una red central (Watanabe, 2012). Además, un eNB pertenece a la estación base (BS) de esta red y comprende totalmente su funcionalidad (Agusti, 2010: 86).

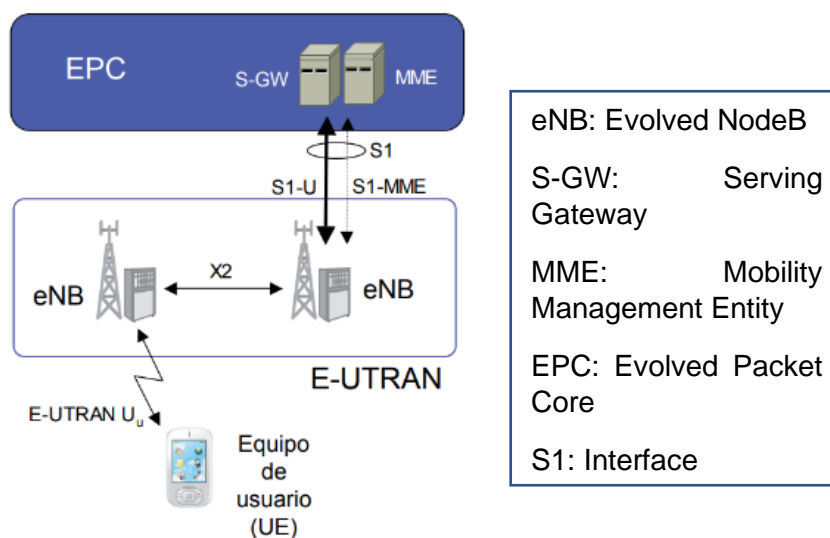


Figura 1. Red de acceso E-UTRAN.

Fuente: LTE Nuevas tendencias en comunicaciones móviles (2010) p.63

Las dos redes que componen la arquitectura del sistema LTE generan transferencia de paquetes IP entre el equipo del usuario y las redes de paquetes externas como Internet. A este servicio de transferencia de paquetes IP de la red LTE se le conoce como Servicio al Portador EPS y el servicio de transferencia de paquetes por la red E-UTRAN se le conoce como Portador de Acceso de Radio (E-RAB).

En la Figura 2, se observa la arquitectura del sistema LTE. Para que el usuario tenga una conexión con la red E-UTRAN, es necesario darse mediante el enlace E-UTRAN U, que es una de las interfaces utilizadas por los eNBs. Luego el usuario al estar en E-UTRAN deberá llegar a la red troncal EPC mediante el interfaz S1 siendo este el controlador y gestor para el acceso. Por otra parte, las redes de paquetes utilizan el enlace SGi para llegar al EPC. Otra cualidad del sistema LTE es que también se puede acceder a sus servicios mediante otras redes que no pertenecen a la familia de EPC, como UTRAN y GERAN (Agusti, 2010:80).

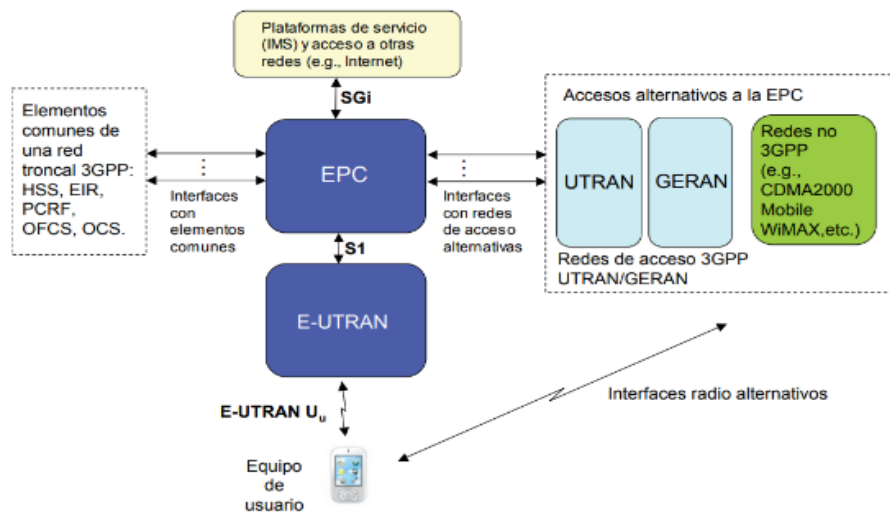


Figura 2. Arquitectura de red LTE.

Fuente: LTE Nuevas tendencias en comunicaciones móviles (2010) p.62

- **Red troncal EPC:**

Esta arquitectura ha sido diseñada para generar un servicio de conexión IP a través de una red mejorada que aprovecha los servicios de la red de acceso E-UTRAN.

El núcleo de la red EPC se constituye por tres entidades: Entidad de Gestión de Movilidad (MME), Puerta de Enlace de Servicio (S-GW) y Paquetes de Datos de la Puerta de Enlace de Red (P-GW). Además, contienen una base de datos llamada Servicio de Abonado Doméstico (HSS) y todo este conjunto de cuatro elementos conecta al usuario, que está conectado mediante de la red de acceso E-UTRAN, y redes externas que se conectan directamente a la red troncal EPC.

La entidad MME inspecciona las funciones de traspaso del plano del usuario a través de la interfaz S11 junto con S-GW mediante el protocolo Estrato de No Acceso (NAS), este protocolo forma parte de la capa más alta entre el equipo de usuario y la entidad MME, utilizándose para funciones como conexión de red, configuración de portadoras y conexión de red (3GPP, 2011). A través del enlace S6a, la entidad MME se conecta con la entidad HSS para obtener la información que permite saber qué usuarios tienen permitido establecer conexión mediante la red E-UTRAN. Y las entidades MME pueden conectarse entre ellas mismas mediante la interfaz S10 (Agusti, 2010:79).

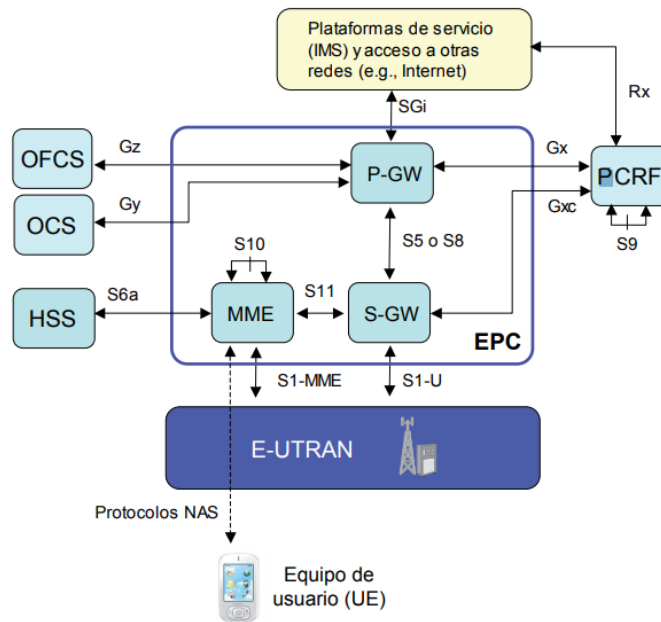


Figura 3. Arquitectura básica de la red troncal EPC.

Fuente: LTE Nuevas tendencias en comunicaciones móviles (2010) p.79

La conexión de redes externas con EPC es mediante la entidad P-GW a través de la interfaz SGi, la entidad P-GW asigna direcciones IP a los usuarios. Luego P-GW se conecta con S-GW mediante la interfaz S5 o S8, si ambas entidades son del mismo operador es mediante S5, caso contrario, se conectan mediante la interfaz S8.

En la Figura 3 también se observa la entidad Función de Política y Reglas de Cobro (PCRF), la cual maneja los servicios portadores EPS de la red LTE, este servicio representa la transferencia de paquetes IP que tiene adjuntos indicadores de calidad (Agusti, 2010: 118). Mediante normas de uso se configuran ciertas funciones específicas de la entidad P-GW.

Por último, las entidades que se encargan de la facturación de la red son Sistema de Carga Fuera de Línea (OFCS) en el caso de postpago y Sistema de Carga en Línea (OCS) para el caso de prepago de proveedor de servicios (Agusti, 2010:80).

c. Técnica de transmisión

- **Modulación Multiportadora en sistemas de cuarta generación**

La modulación multiportadora (MCM) se considera como un tipo de multiplexación por división de frecuencias. Es una banda base-proceso la cual usa subcanales paralelos bajo un mismo ancho de banda para enviar información. Es utilizada debido a que posee un rendimiento eficaz bajo las interferencias entre símbolos a comparación del uso de una sola frecuencia (Garg, 2007:23-9). Esto se evidencia en la pérdida en relación señal ruido (SNR):

$$(SNR)_{loss} = 10 \log \frac{L_b + L_c - 1}{L_b} (db) \quad (1)$$

Donde L_b es la longitud original del bloque, L_c es la respuesta del canal en longitud, y $L_b + L_c - 1$, es la nueva longitud del símbolo cíclicamente extendido. Y esta no posee interferencia entre símbolos. Sin embargo, esto produce un aumento de energía y bits no codificados a los datos.

La modulación multiportadora se da mediante dos tipos diferentes los cuales son (Garg, 2007:23-9):

- Acceso Múltiple por división de código de múltiples portadoras (MC-CDMA), este tipo en sí es un OFDM con una superposición de CDMA. Además, para que varios usuarios puedan acceder al sistema, se les asigna varios códigos distribuidos de acuerdo con el tiempo y frecuencia; y se utiliza la modulación QPSK.
- Multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM).

- **Técnica de Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal**

Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA) es la técnica que se utiliza en down-link (enlace descendente) de LTE, aparece por la modulación de la Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM) en la que se dispone de un conjunto de símbolos que se desean transmitir simultáneamente, cada uno llega a modularse mediante una de las subportadoras. Así mismo, esto permite transmitir diferentes flujos de información al usar distintas subportadoras y, por medio de éstas el usuario receptor podrá recuperar el contenido y así diferenciarlas del resto de subportadoras (Agusti, 2010:190).

En la Figura 4 se establece que para los usuarios existen U flujos de información. Se tienen de 1 a U usuarios, y $1 - N_u$ símbolos de información N_k representa la cantidad de símbolos enviados para el usuario k-ésimo y d_{ik} es el i-ésimo símbolo del k-ésimo usuario (Agusti, 2010:190).

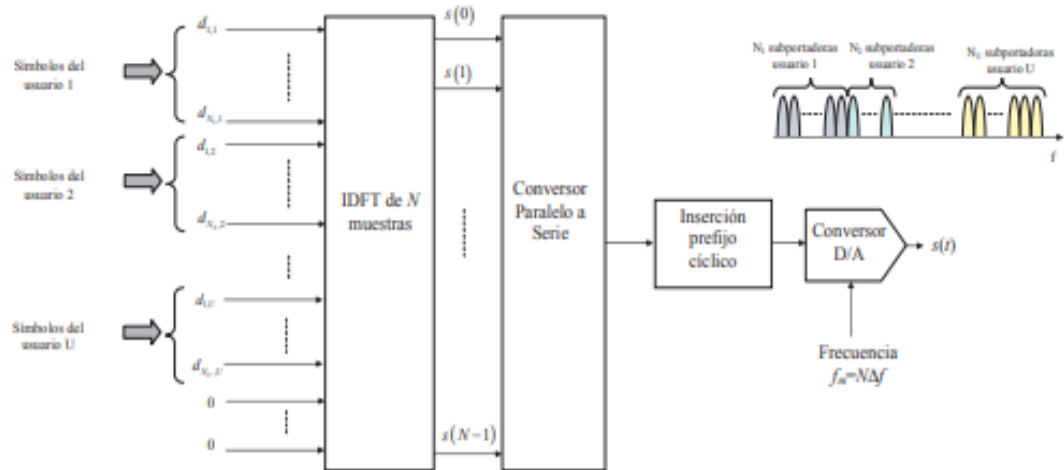


Figura 4. Multiplexación de usuarios por OFDMA.

Fuente: LTE Nuevas tendencias en comunicaciones móviles (2010) p.190

Esta técnica permite que se distribuyan símbolos de un usuario entre subportadoras no contiguas. Además de:

- Diversidad multiusuario, ya que el proceso de asignar portadoras a los usuarios se lleva a cabo dinámicamente, y es posible cambiar la asignación en poco tiempo;
- Diversidad frecuencial, por permitir que un usuario tenga diferentes subportadoras.
- Flexibilidad en la banda asignada, permite que los usuarios obtengan diferentes velocidades de transmisión respecto a las necesidades de cada uno, asignando la cantidad de portadoras apropiadas.

d. Capa Física

La capa física consta del uso de la técnica de transmisión OFDMA y SC-FDMA, la primera para el enlace descendente y la segunda para el enlace ascendente entre un celular y eNB. Tener en cuenta que en LTE, no se utiliza todo el ancho de banda del espectro, hay una separación entre bandas y cada banda conforma subportadoras que también tienen una diferencia entre ellas mismas, de 15kHz. En este caso, el enfoque será solamente en el enlace descendente (Agusti, 2010: 251).

Tabla 1. Canalización en sistema LTE.

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz.
Tamaño FFT	128	256	512	1024	1536	2048
Número de subportadoras disponibles	73	181	301	601	901	1201

Fuente: LTE Nuevas tendencias en comunicaciones móviles (2010) p.251

- **Bloque de Recursos**

Más conocido como Resource Block o PRB (Physical Resource Block), es la información señalada por el eNB a un celular. Esta información tiene un tamaño de 180kHz, ya que está constituida por 12 subportadoras ($12 \times 15\text{kHz} = 180\text{kHz}$), en un intervalo de tiempo de medio milisegundo (Figura 5). Este bloque transmite aproximadamente 7 símbolos OFDMA (Agusti, 2010: 252).

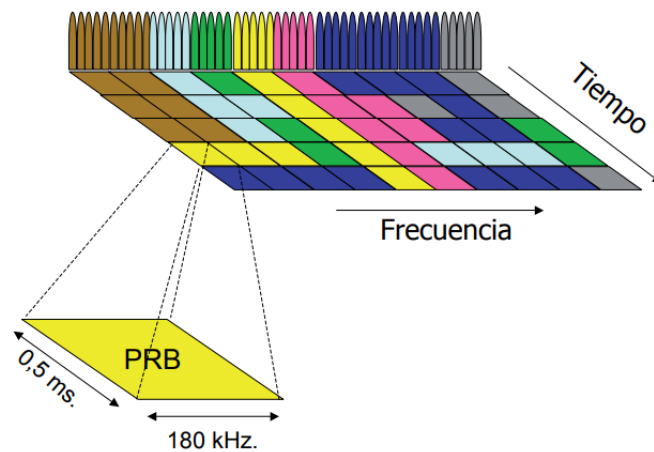


Figura 5. Definición gráfica de Resource Block.

Fuente: LTE Nuevas tendencias en comunicaciones móviles (2010) p. 252

2.2.3 Planeación y diseño de una red

a) **Parámetros de las antenas**

Una antena es un dispositivo que cumple la función de recibir o entregar ondas electromagnéticas. Existen una gran variedad de tipos que se diferencian principalmente en la potencia que emiten y en las frecuencias que toleran (Huidobro, 2013:1).

- **Patrón de radiación:**

Se representa como una gráfica que muestra la radiación de la antena en distintas direcciones (Figura 6). Esta gráfica se compone de patrón vertical y patrón horizontal. Es decir, una vista desde arriba y la otra de perfil (Huidobro, 2013:5).

- **Ganancia:**

La ganancia de la antena es la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección y la potencia entregada a la misma antena. Su unidad es el dBi (Huidobro, 2013:4).

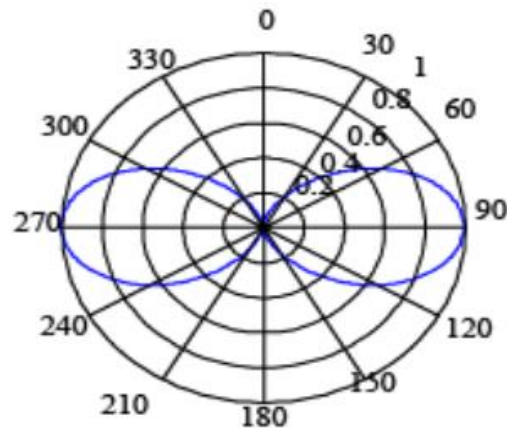


Figura 6. Patrón de radiación de un dipolo.

Fuente: Antenas de Telecomunicaciones (2013) p.4

- **Técnicas de antenas inteligentes:**

Una de las técnicas de antena inteligente es el sistema MIMO (múltiples entradas y múltiples salidas), este tiene como principal función permitir un rendimiento de datos de alta velocidad en los teléfonos móviles, ampliando así, la capacidad de las redes 4G.

Se basa en que se utilizan fundamentalmente varias antenas en la parte de transmisión y recepción (Figura 7) para el aumento de la capacidad del canal (Garg, 2007:23-11).

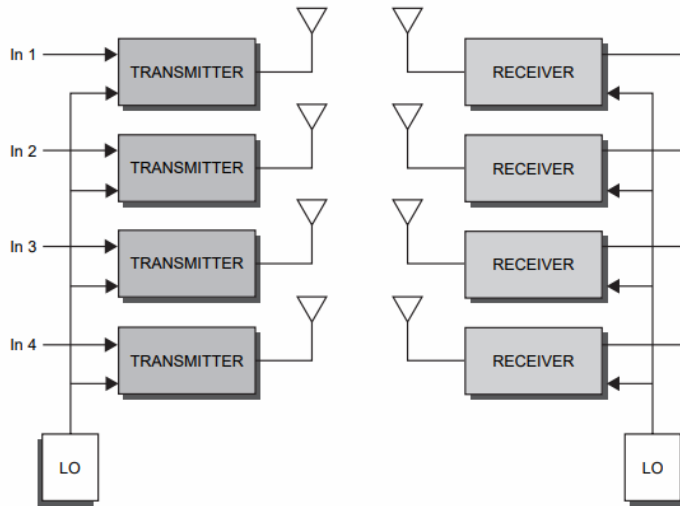


Figura 7. Sistema MIMO.

Fuente: Wireless Communications & Networking. (2007) p.23-12

b) Caracterización del terreno.

Para cualquier región es necesario el conocer las condiciones orográficas. La información topográfica caracteriza al terreno y permite predecir el comportamiento y funcionamiento de los sistemas de comunicación (Morochó, 2016).

- **Modelo de Elevación Digital (DEM)**

Este modelo es la representación cartográfica de la elevación de la superficie terrestre con relación a un dato de referencia (Figura 8). Se utiliza para obtener datos de un terreno como su elevación, pendiente u orientación, excluyendo datos como la vegetación. (Balasubramanian, 2017).

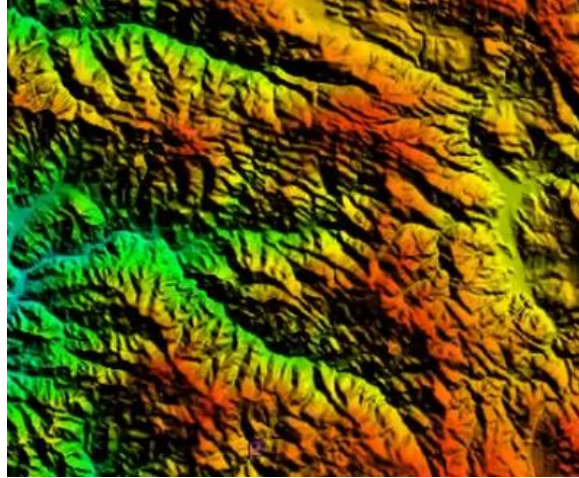


Figura 8. Modelo de Elevación Digital Aster Global DEM.

Fuente: EarthData Search

- **Ortoimagen**

Una ortoimagen es una fotografía aérea que contiene precisión métrica (Figura 9) y que está corregida geoméricamente a consecuencia de distorsiones como: diferencias de elevación, inclinación del sensor y óptica de la cámara (INEGI, 2003).



Figura 9. Orto imagen.

Fuente: Ortofoto urbana y ortofoto estricta (2008) p.6

2.2.4 Optimización de una red

a) Interferencia entre símbolos (ISI)

Un canal con ancho de banda limitado propaga un pulso de onda que va a través de él. Cuando el ancho de banda del canal y el ancho de banda del pulso son similares, la propagación del pulso tendrá una duración de símbolo excesiva y se obtiene la superposición de los pulsos de la señal, definiéndose como la interferencia entre símbolos (Garg, 2007:94).

b) Indicadores Clave de Desempeño (KPI)

La optimización de una red mejora el rendimiento, siendo la red más estable, con mayor capacidad y menor nivel de interferencia en la transferencia de datos. Esta optimización se realiza diariamente y es necesaria para cumplir con ciertos parámetros o también llamados Indicadores Claves de Rendimiento (KPI). Estos parámetros dependen de los requisitos del operador y se establecen después de construir la red y antes de ser usada por el usuario (Zhang, 2018:24).

Según Zhang, antes de lanzar la red el proceso típico para la optimización es separar la red en grupos de sitios llamados clústeres (Figura 10) para luego optimizar los clústeres hasta llegar a un KPI pactado. Las variaciones que se realizan durante la optimización suelen ser inclinación de una antena (variación de tilt eléctrico/mecánico o movimiento de azimut) sin embargo, si una red no cursa un alto tráfico, los resultados no son muy acertados. Debido

a esto, la prueba de conducción es el método fundamental para lograr los KPIs establecidos antes que la red sea usada por el usuario. En conclusión, la optimización de una red LTE se realiza en dos movimientos, uno es optimizar la red antes de ser lanzada y otra posterior, es decir cuando hay tráfico. (Zhang, 2018:25)

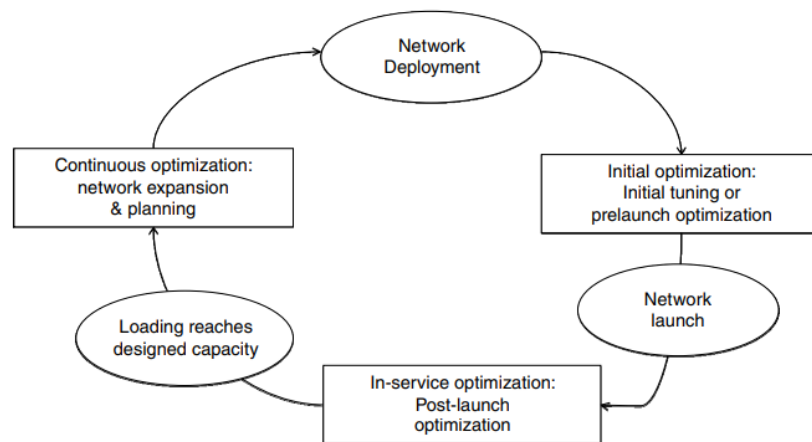


Figura 10. Ciclo de optimización.

Fuente: LTE Optimization and Principle and Method (2018) p. 26

a) RSRP

Por las siglas, significa Potencia Recibida de la Señal de Referencia, es decir, es la potencia recibida que transportan señales de referencia y matemáticamente, es el promedio de las potencias recibidas de los elementos que transportan señales de referencia. Las cantidades típicas de este indicador oscilan entre -130 dBm señal débil y -50 dBm señal potente (Zhang, 2018:44).

b) RSRQ

Por sus siglas significa Calidad de la Señal de Referencia Recibida, es decir es la relación entre la señal deseada y la potencia total recibida. Su unidad es el dB y negativo. Sus valores típicos oscilan entre -3 dB, al tener poca interferencia, y -18 dB al tener mucha interferencia (Zhang, 2018:44).

c) SINR

Por sus siglas significa Relación Señal Interferencia más Ruido, se define como la relación entre la señal de referencia y la interferencia más el ruido, dando a conocer la calidad de la señal. (Zhang, 2018:47).

d) SERVING CELL

Serving cell es la celda donde está alojado el dispositivo del usuario. Si un usuario no está configurado con agregación de portadoras, la celda a la que se conecta, se le llama celda primaria. Si el dispositivo admite agregación de portadoras, se utilizan celdas primarias y secundarias. (Zhang, 2018:22).

Para recopilar datos de medición se usa comúnmente un método llamado Drive Test (DT), este es un método manual que recoge información en un área de la red y obtener datos como: fallas de software o hardware, accesibilidad e identificar áreas de interferencia. Parámetros como la calidad de la señal y rendimiento e indicadores de la calidad de enlace descendente de la red.

2.2.5 Teorema de Shannon

Este teorema se usa para hallar la capacidad de información en un canal de comunicación mediante la relación señal/ruido (P/N). En donde C representa la capacidad máxima en bps (Rioul & Magossi, 2014:105).

$$C = B \times \log_2 \left(1 + \frac{P}{N} \right) \text{ (bps)} \quad (2)$$

C = Capacidad máxima en bits por segundo.

B = Ancho de banda en Hz.

P/N = Relación señal a ruido.

2.2.6 Agregación de portadoras (Carrier Aggregation)

Cada año sacan nuevos equipos celulares, nuevas plataformas y servicios de internet, por lo tanto, esto ocasiona que los usuarios reclamen mayor velocidad de datos para estar siempre conectados y actualizados. Estas tasas de velocidad están limitadas por el espectro y la mejor forma para garantizar el aumento de datos es mediante la agregación de portadoras. No solo obtienes datos más rápidos, sino que es compatible con distintos escenarios (Hedlund & Cotanis, 2017:5).

Uno de los objetivos al utilizar la agregación de portadoras es mejorar los datos de usuarios dentro de una zona superpuesta, es decir, una zona donde las antenas ya están ubicadas y no van a ser movidas o transportadas a otra zona (Hedlund & Cotanis, 2017:8).

2.2.7 Atoll Software

Atoll es una plataforma de optimización y diseño de red inalámbrica multi-tecnología que soporta operadores inalámbricos durante todo el ciclo de vida de la red, desde el diseño inicial hasta la densificación y optimización. Además, incluye capacidades avanzadas de diseño de red multi-RAT de un solo RAN para tecnologías de acceso radioeléctrico 3GPP y 3GPP2, incluyendo 5G NR, LTE, NB-IoT, UMTS, GSM y CDMA.

Es compatible con los últimos avances tecnológicos como MIMO masivo, 3D beamforming y propagación mmWave para el diseño y despliegue de redes 5G. Atoll proporciona a los operadores y proveedores un marco potente y único para diseñar y optimizar redes de acceso radioeléctrico interior y exterior.

2.3 Marco conceptual

Definición de términos básicos:

- **4G**
Tecnología móvil de cuarta generación, más utilizada mundialmente.

- **Estación base**
Estación fija de recepción y transmisión compuesta de antenas de baja potencia (BTS).

- **Celda**
Identificador de portadora utilizada en un sector.

- **Downlink**
Enlace de comunicación de una antena a un dispositivo móvil.

- **GSM**
Tecnología móvil de segunda generación.

- **Interferencia**
Señal adherida que provoca alteración y deformación a una señal original.

- **Frecuencia**
Tasa de oscilación dentro del espectro electromagnético.

- **LTE**
Estándar utilizado en la tecnología móvil de cuarta generación (Evolución a largo plazo).

- **Portadora**
Señal principal que contiene la información base para luego ser modificada y transmitida.

- **RSRP**
Medida del nivel de potencia de la señal recibida de un dispositivo móvil.

- **RSRQ**
Calidad de la señal recibida de un dispositivo móvil.

- **Sector**
Identificador de un área de cobertura por una antena.

- **SINR**
Relación entre la interferencia y la potencia de la señal recibida.

- **Throughput**
Cantidad de datos transmitidos en unidades de bits por segundo.

- **Uplink**
Enlace de comunicación de un dispositivo móvil a una antena.

- **UMTS**
Estándar de la tecnología móvil de tercera generación.

2.4 Hipótesis

2.4.1 General:

El aumento del número de frecuencias portadoras incrementa el cumplimiento de los parámetros de desempeño de una red de acceso LTE en la ciudad de Otuzco, al evaluarse a través de simulación.

2.4.2 Variables e indicadores

2.4.2.1. Variable 01

- Número de portadoras

Definición Conceptual:

- La portadora es una onda de radiofrecuencia que transmite información a través de un tipo de modulación y variación de características que depende del propósito de transmisión.

Indicadores:

- Número de portadora inicial
- Número de portadoras finales

2.4.2.2. Variable 02

- Parámetros de red LTE

Definición Conceptual:

- Es la representación del rendimiento de una red LTE, ya que para medir este rendimiento se basan en distintos parámetros y criterios de aceptabilidad establecidos por cada operador, antes y durante el despliegue de red para el uso del usuario.

Indicadores:

- Comportamiento RSRP
- Comportamiento SINR
- Comportamiento Distribución por Serving Cell
- Comportamiento saturación de recursos por usuarios.

2.4.2.3. Operacionalización de las variables

Tabla 2. Operacionalización de la Variable Independiente

VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INDICADORES	INSTRUMENTO	UNIDAD DE MEDIDA
- Número de portadoras	La portadora es una onda de radiofrecuencia que transmite información a través de un tipo de modulación que implica la cual varía dichas características de la frecuencia portadora dependiendo de los objetivos de la transmisión de información y genera distintos resultados en un mismo escenario sobre los indicadores de optimización.	Número de portadora inicial	Reportes del software Atoll	Nominal
		Número de portadoras finales	Reportes del software Atoll	Nominal

Tabla 3. Operacionalización de la Variable Dependiente

VARIABLE DEPENDIENTE	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INDICADORES	INSTRUMENTO	UNIDAD DE MEDIDA
Parámetros de red LTE	Es la representación del rendimiento de una red LTE, ya que para medir este rendimiento se basan en distintos parámetros que estos son establecidos por cada operador, antes y después de ser construida, para el uso del usuario.	Comportamiento RSRP	Reportes del software Atoll	dBm
		Comportamiento SINR	Reportes del software Atoll	dB
		Comportamiento Distribución por Serving Cell	Reportes del software Atoll	Serving cell/sector
		Comportamiento saturación de recursos por usuarios	Reportes del software Atoll	Usuarios/sector

III. METODOLOGÍA EMPLEADA

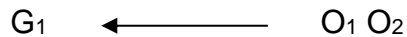
3.1 Tipo y nivel de investigación

Según la naturaleza de los objetivos, el tipo de investigación realizada en el trabajo es descriptiva. Asimismo, según el alcance del objetivo general y específicos es clasificada como nivel documental. Se investigó sobre la modificación del número de portadoras, con el fin de evaluar y describir los indicadores de desempeño en una red de acceso LTE de una ciudad.

3.2 Población y muestra

La población fue tomada a partir de la red acceso LTE de la ciudad de Otuzco. Al tener esto como población, se trabajó con esta como un todo. Es por ello que la muestra es igual que la población (única).

3.3 Diseño de contrastación



Donde:

G₁: Red de acceso LTE de la ciudad de Otuzco.

O₁: Observación de parámetros de desempeño de radiofrecuencia de una red de acceso LTE de la ciudad de Otuzco.

O₂: Observación de parámetros de desempeño de radiofrecuencia de una red de acceso LTE de la ciudad de Otuzco con aumento de portadoras.

3.4 Diseño de investigación

El diseño de la investigación es de tipo descriptivo documental. Se recolectaron datos mediante la generación de reportes de simulación en la red de acceso, de manera que se puedan identificar los parámetros de red y su evaluación al aumentar el número de portadoras.

3.5 Procedimiento

- Recopilación de los datos del informe de optimización de radiofrecuencia de la red de acceso LTE de la ciudad de Otuzco. Este informe contiene 3144 puntos de medición, los cuales contienen 3 de los 4 parámetros principales a analizar: RSRP, SINR y Serving Cell.
- Configuración y calibración de parámetros de simulación de un modelo base de la red de acceso LTE en la ciudad de Otuzco.
- Variación de la variable independiente en el modelo base con la ayuda del software Atoll.
- Comparación y evaluación de los dos escenarios de red LTE debido a la variación de las variables dependientes o parámetros en cada punto de medición.

3.6 Técnicas e instrumentos de investigación

3.6.1 Técnicas

La Tabla 04 muestra las técnicas de investigación empleadas en esta investigación.

Tabla 4. Técnicas de recolección de datos

Técnica	Forma de aplicación	Forma de obtención
Análisis de documentos	Identificación de los indicadores claves de una red de acceso LTE y población estimada en la ciudad de Otuzco.	Recolección de los datos de drive test de radiofrecuencia de la red en la ciudad de Otuzco, reporte de Osiptel de las líneas de consumo y reporte del instituto nacional de estadística e informática de población económicamente activa.
Observación	Observación de una simulación inicial (escenario base de la red móvil) para cada punto obtenido en la medición del drive test, basado en una población estimada.	Guía de observación de reportes e indicadores en los escenarios realizados por el programa simulador.

3.6.2 Recopilación de información

- Datos del Drive Test de radiofrecuencia de la ciudad de Otuzco en el año 2017. (Tabla 5)
- Datos del reporte de Osiptel de las líneas de consumo controlado por departamento en el año 2019.
- Datos del reporte del Instituto Nacional de Estadística e Informática de estimación y proyecciones de población por departamento, provincia y distrito en el año 2020.
- Datos del reporte del Instituto Nacional de Estadística e Informática de población económicamente activa según ámbito geográfico 2008-2018.

Tabla 5. Fragmento de los datos del drive test.

Nº	Latitud	Longitud	RSRP	SINR	Serving Cell
			Drive Test	Drive Test	Drive Test
1	-7.90372	-78.56958	-92.8	13.3	248
2	-7.90372	-78.56959	-93.2	12.6	248
3	-7.90369	-78.56957	-92.3	15.7	248
4	-7.90372	-78.56958	-92.9	14.3	248
5	-7.90374	-78.56959	-91.3	14	248
6	-7.90376	-78.56959	-89.8	14.6	248
7	-7.90377	-78.56965	-94.8	2.6	248
8	-7.90378	-78.56971	-92.1	10.8	248
9	-7.90378	-78.56978	-101.1	4.9	248
10	-7.90378	-78.56985	-96.3	6.4	248

Fuente: Reporte de Drive Test (2017)

3.6.3 Información de población

En el programa simulador Atoll, para obtener una simulación con precisión en el parámetro de usuarios por sector, se necesitan los usuarios en la ciudad de la zona a evaluar. Por ende, se recopiló la información estadística de la proyección de población en la ciudad de Otuzco en el año 2020 según la INEI. (Tabla 6)

Debido a que los datos de líneas de consumo se encontraron hasta el año 2018 (Tabla 7), se decidió hacer una proyección de población económicamente activa hasta el año 2020 (Figura 11), para coincidir con la proyección hecha por la INEI en el número de habitantes. Con el software Microsoft Excel, mediante el uso de la fórmula “pronostico”, se proyectó que la población económicamente activa (PEA) para el año 2020 en La Libertad sería de 1088350 habitantes (Figura 12). Las líneas de consumo controlado de la ciudad de La Libertad representan el 3.91% de la población económicamente activa.

Tabla 6. Proyección de PEA en el año 2020.

LA LIBERTAD		
AÑO	POBLACIÓN	PEA
2016	1882405	978200
2017	1888972	1005600
2018	1938501	1033300
2019	1979901	1060800
2020	2016771	1088350



Figura 11. Proyección de PEA en el año 2020.

Tabla 7. Fragmento de las líneas de consumo controlado por departamento

Región	Empresa	Abr-18	May-18	Jun-18
La Libertad	América Móvil Perú S.A.C.	43	37	35
La Libertad	Entel Perú S.A.	94,235	96,499	100,780
La Libertad	Telefónica del Perú S.A.A.	224,525	223,809	222,850
La Libertad	Viettel Perú S.A.C.	31,396	35,586	40,445
	Total	6,558,914	6,737,847	6,873,511

Fuente: Osiptel (2018)

3.7 Procesamiento y análisis de datos.

3.7.1 Procedimientos para la elaboración del Escenario Modelado

a. Configuración de la caracterización del terreno.

Para obtener la resolución del mapa topográfico con las coordenadas geográficas de latitud y longitud de la ciudad de Otuzco, se hizo uso del servidor Earth Data de la NASA que proporciona imágenes satelitales. De las diferentes opciones se escogió la descarga con el modelo de elevación digital ASTER GDEM, el cual contiene un mapeo completo del planeta, ya que cubre el 99% de la superficie. No se utilizó el tradicional formato SRTM, ya que el escogido contiene una resolución espacial de 30 metros por pixel y formatos GeoTIFF (Figura 12). Mientras que el formato SRTM, cubre el 80% de la superficie terrestre con una resolución espacial de 60 metros por pixel.



Figura 12. Imagen en formato GeoTIFF.

Fuente: EarthData Search (2022)

Para poder obtener una imagen con las deformaciones del terreno y relieve, se obtuvo la orto imagen de la ubicación deseada. Además, para recortar con exactitud la ubicación de la ciudad de Otuzco, se utilizó el software SAS PLANET. Este es un programa gratuito que descarga imágenes satelitales de alta resolución y muestra los mapas convencionales de servidores como

Google o Bing con sus respectivas coordenadas de latitud y longitud. Mediante este software, la vista de la ciudad será más acertada.

En el software SAS Planet, se recortó y guardó la ortoimagen de la ciudad de Otuzco a una configuración de Zooms x20 (Figura 13), para más exactitud en la resolución del terreno (Figura 14).

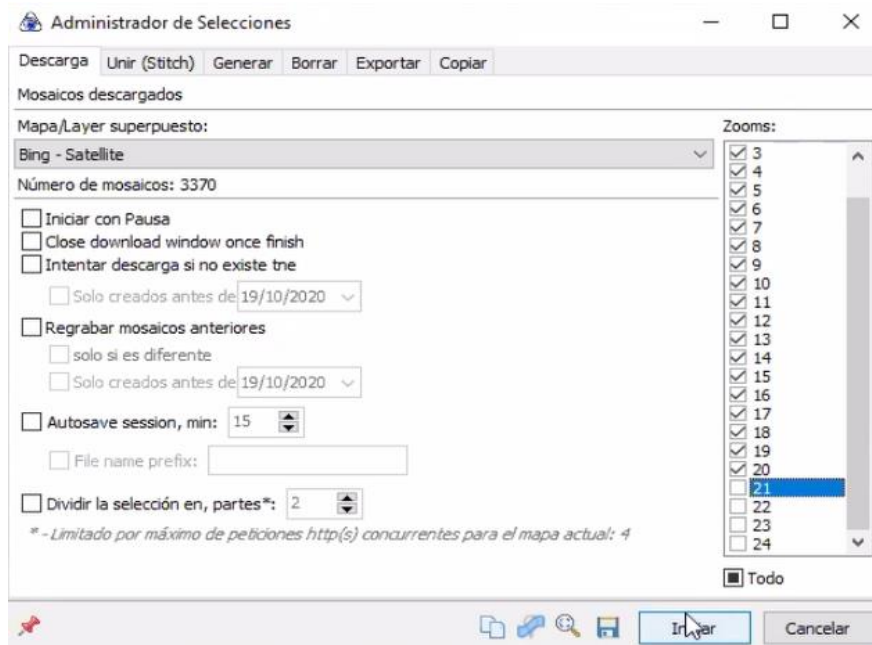


Figura 13. Configuración y recorte de la ciudad de Otuzco.

Fuente: Software SAS Planet (2022)



Figura 14. Orto imagen de la ciudad de Otuzco.

Fuente: Software SAS Planet (2022)

La imagen del modelo de elevación digital ASTER GDEM abarcaba un área extensa que no permitía la localización exacta de la ciudad, y para realizar el recorte exacto de la ciudad, se sobrepuso la orto imagen sobre el mapa de elevación de terreno en el software Global Mapper (Figura 15). La herramienta Global Mapper se utiliza para edición, visualización y gestión de imágenes espaciales con una amplia compatibilidad de formatos (Figura 16).

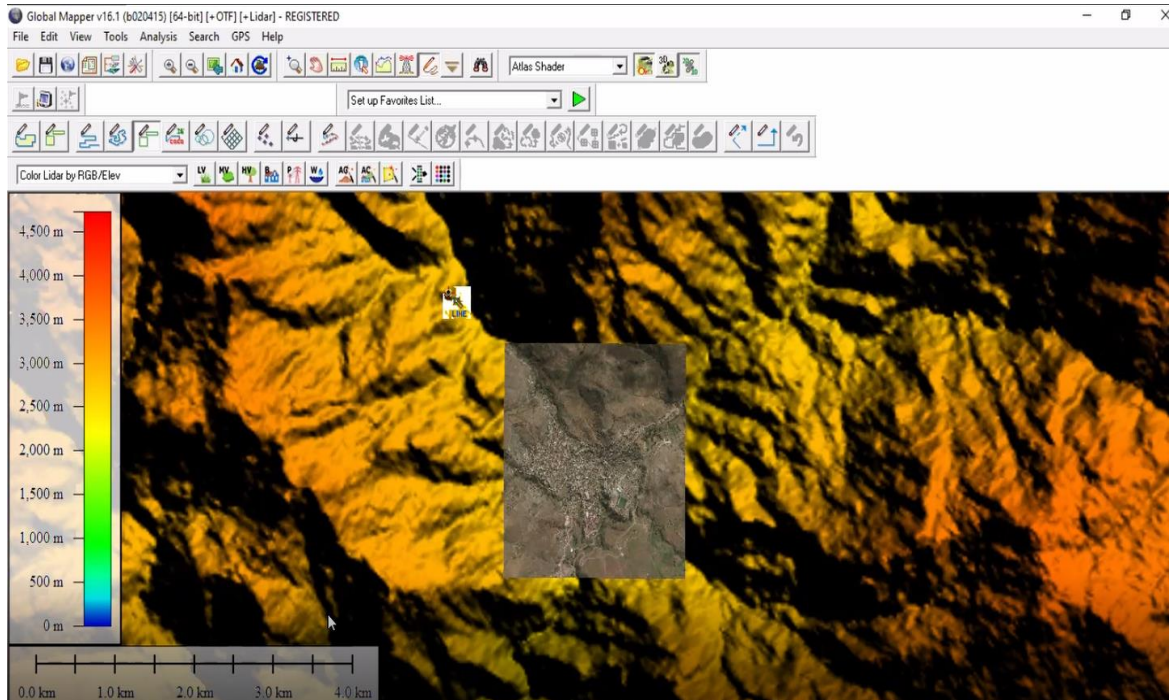


Figura 15. Superposición de imágenes.

Fuente: Software Global Mapper. (2022)

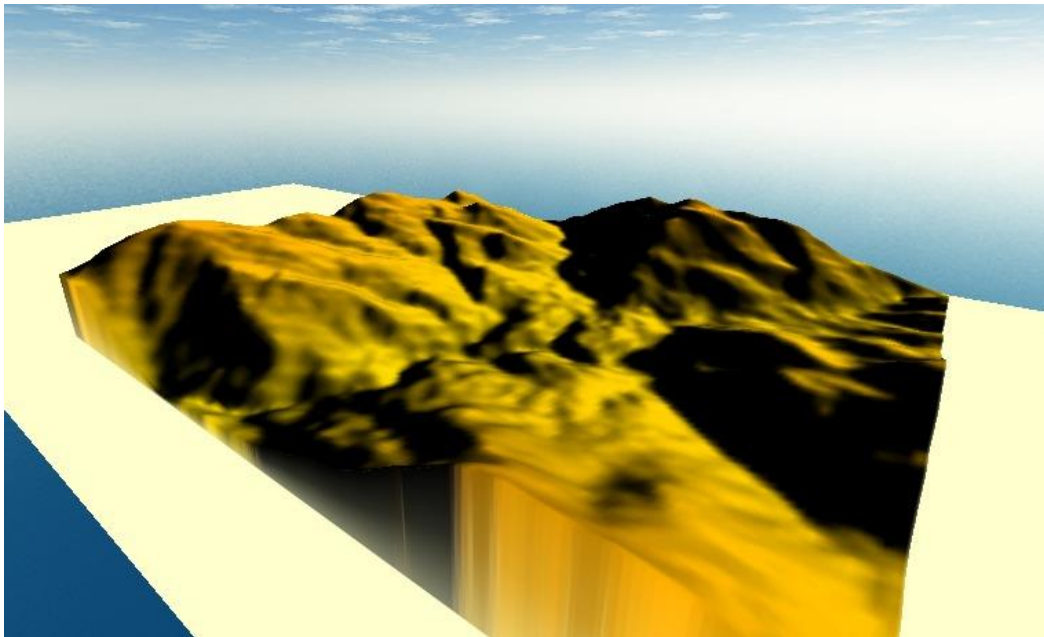


Figura 16. Mapa de elevación de terreno de Otuzco 3D.

Fuente: Software Global Mapper. (2022)

Ambos mapas se ingresaron al software Atoll y se realizó la clasificación y división de terrenos (Figura 17). Otuzco está reconocido por el software Atoll como una zona suburbana; sin embargo, fue necesario realizar una subdivisión del terreno para poder caracterizar cada zona con una mayor precisión de acuerdo con: concurrencia de personas, establecimientos y tránsito.

1. S_Rural: Esta zona presenta un menor número de viviendas, por ende, hay una menor concurrencia e interacción de habitantes.
2. S_Suburbano: Esta zona es el término medio, posee las características de las otras dos zonas, pero a nivel moderado.
3. S_Urbano: Esta zona es caracterizada por tener mayor cantidad de establecimientos tales como iglesias, tiendas al centro de la ciudad y paraderos, entonces se presentará una mayor concurrencia de personas y tránsito.

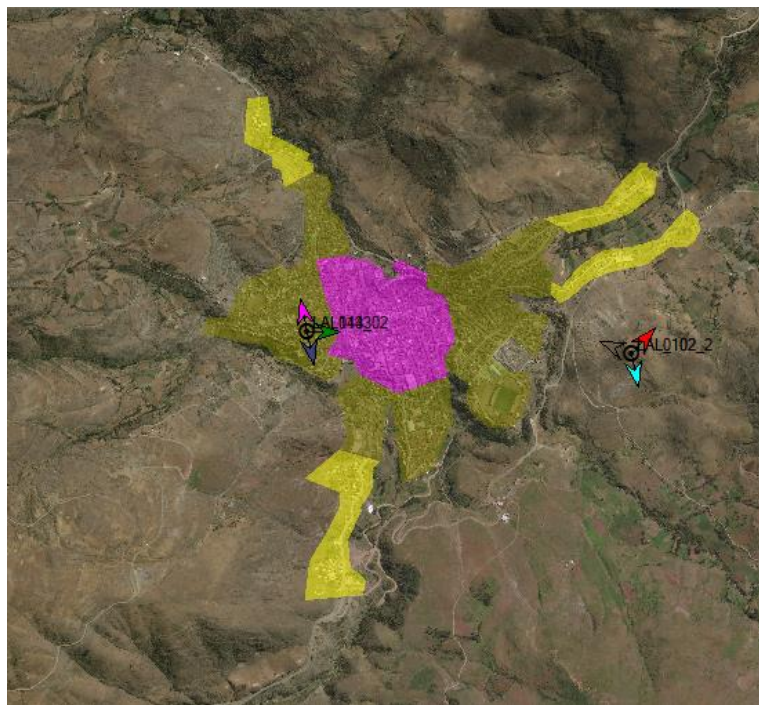


Figura 17. Mapa de clasificación de terreno.

Fuente: Software Atoll. (2022)

Una vez clasificada cada zona, se realizó la caracterización de cada una de ellas configurando el tipo de usuario, su movilidad y densidad del terreno:

a) Usuarios:

- Business User: Son los usuarios que contienen una mayor cantidad demanda de servicios (Figura 18). En nuestro caso, navegación por la web (Mobile Internet Access) y apertura rápida en las páginas web (High Speed Internet).
- Standard User: Estos usuarios son personas que hacen un uso común del Internet, también llamados Mobile Internet Access (Figura 19).

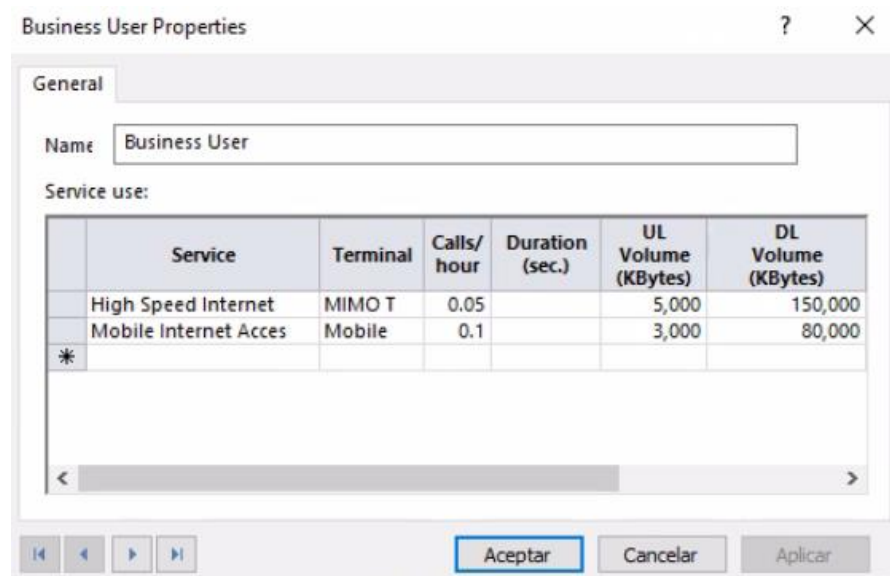


Figura 18. Propiedades del Business User.

Fuente: Software Atoll. (2022)

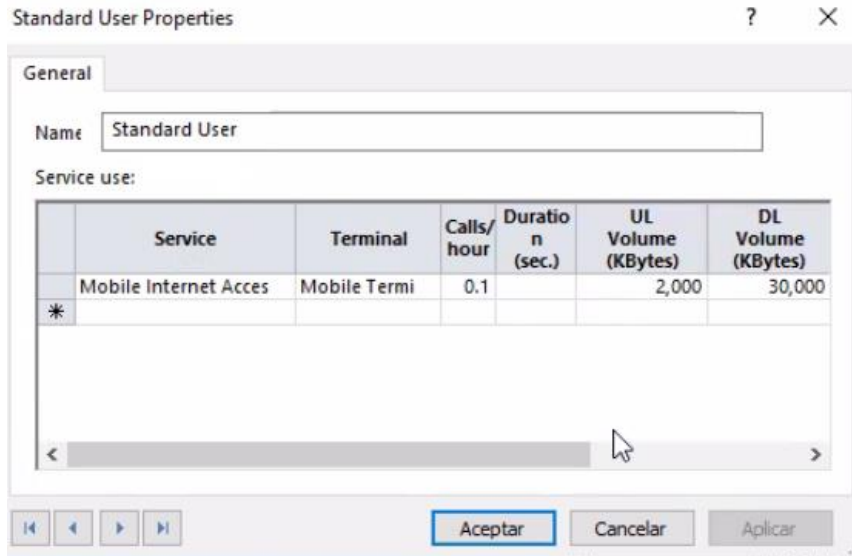


Figura 19. Propiedades del Standard User.

Fuente: Software Atoll. (2022)

b) Movilidad:

- Fixed: Consiste en usuarios estáticos, con una velocidad de 0 km/h.
- Pedestrian: Estos usuarios se encuentran caminando, con una velocidad de 3 km/h (Figura 20).
- Driver: Usuarios que se encuentran en un automóvil, con una velocidad de 50 km/h.

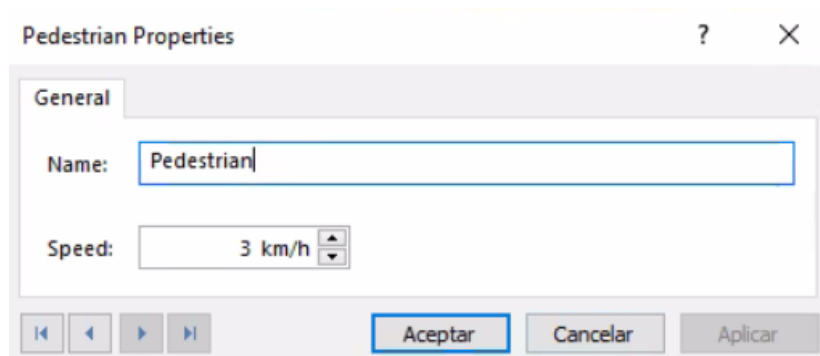


Figura 20. Propiedades de Pedestrian.

Fuente: Software Atoll. (2022)

c) Densidad: Usuarios promedio por cada kilómetro cuadrado.

Para completar este parámetro, se vio necesario obtener la cantidad de usuarios y líneas de consumo controlado en la ciudad de Otuzco. Al tener únicamente los reportes del departamento de La Libertad de líneas de consumo controlado, y obtener del año 2018 que las líneas representan el 3.91% de población económicamente activa, se realizó una multiplicación cruzada ya que son directamente proporcional, para obtener las líneas de consumo controlado en la ciudad de Otuzco. (Tabla 8)

Tabla 8. Cálculo líneas de consumo controlado ciudad de Otuzco.

Año: 2020	PEA	Líneas
La Libertad	1088350	42554
Otuzco	14477	566

Fuente: Osiptel e INEI (2018)

b. Configuración de las antenas

Se realizó la configuración de las antenas, con la búsqueda de la hoja técnica de la antena APXV86-906516-c y se realizó la elaboración del patrón de radiación (Figura 21).

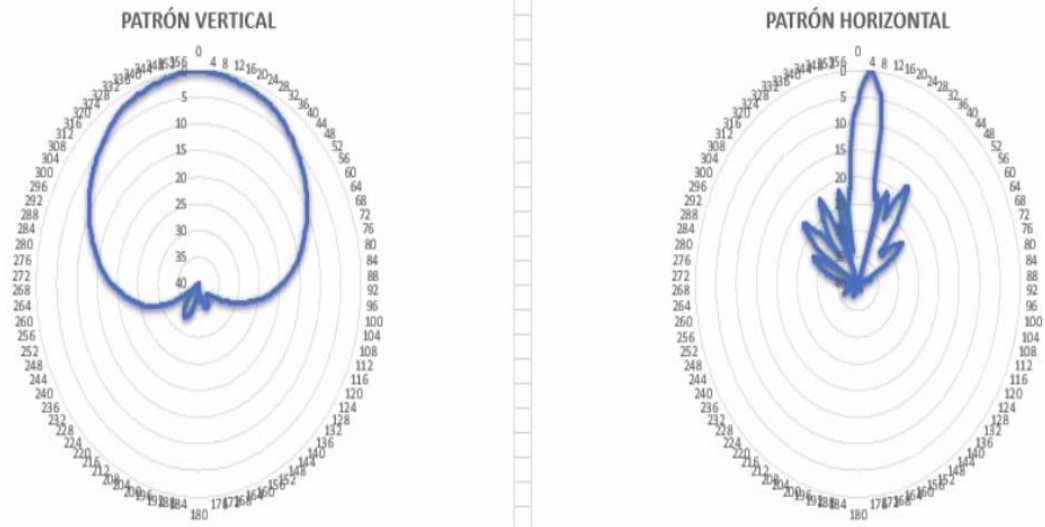


Figura 21. Patrón vertical y horizontal de la antena APXV86-906516-c.

Los datos del patrón de radiación fueron ingresados para la creación de la antena APXV86-906516-c y así realizar las siguientes configuraciones:

APXV86-906516-c Properties													
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> ? × </div>													
<div style="display: flex; border-bottom: 1px solid gray; margin-bottom: 5px;"> General Horizontal Pattern Vertical Pattern </div>													
Name:	APXV86-906516-c												
Physical antenna:	63 deg 17.5dBi												
Manufacturer:	RFS												
Half-power beamwidth:	63 °												
Gain:	17.5 dBi												
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <tr> <td>Pattern</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Electrical tilt:</td> <td>°</td> </tr> <tr> <td>Electrical azimuth:</td> <td>°</td> </tr> </div> <div style="width: 45%;"> <tr> <td>Frequencies</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Min:</td> <td>870 MHz</td> </tr> <tr> <td>Max:</td> <td>960 MHz</td> </tr> </div> </div>		Pattern		Electrical tilt:	°	Electrical azimuth:	°	Frequencies		Min:	870 MHz	Max:	960 MHz
Pattern													
Electrical tilt:	°												
Electrical azimuth:	°												
Frequencies													
Min:	870 MHz												
Max:	960 MHz												

Figura 22. Configuración de la antena APXV86-906516-c.

Fuente: Software Atoll. (2022)

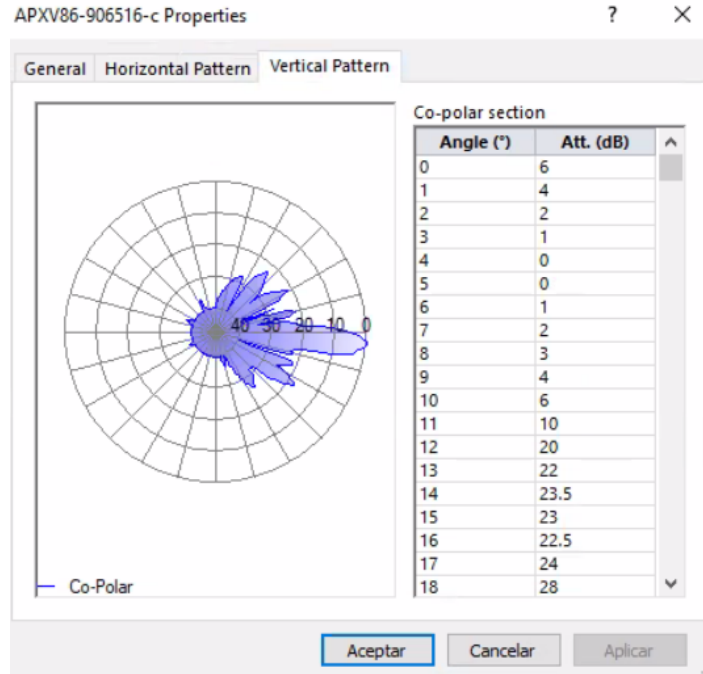


Figura 23. Patrón vertical de la antena APXV86-906516-c.

Fuente: Software Atoll. (2022)

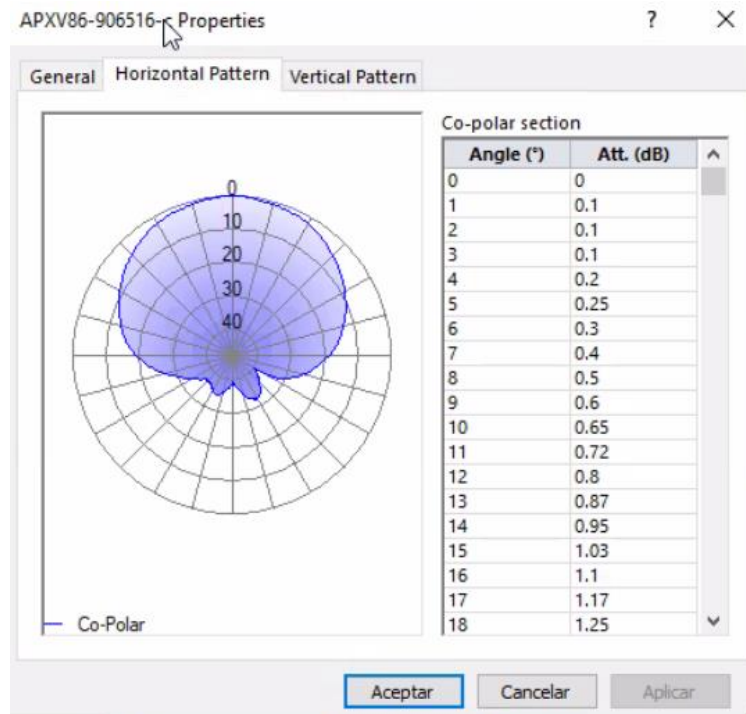


Figura 24. Patrón horizontal de la antena APXV86-906516-c.

Fuente: Software Atoll. (2022)

c. Configuración de las estaciones base

Se crearon las dos estaciones base de la ciudad de Otuzco: LAL0102 (PINIP) y LAL0143 (Ermita). Cada una se ingresó con su respectiva ubicación en latitud y longitud y se agregó una antena a cada sector por site con la siguiente configuración: (Figura 25)

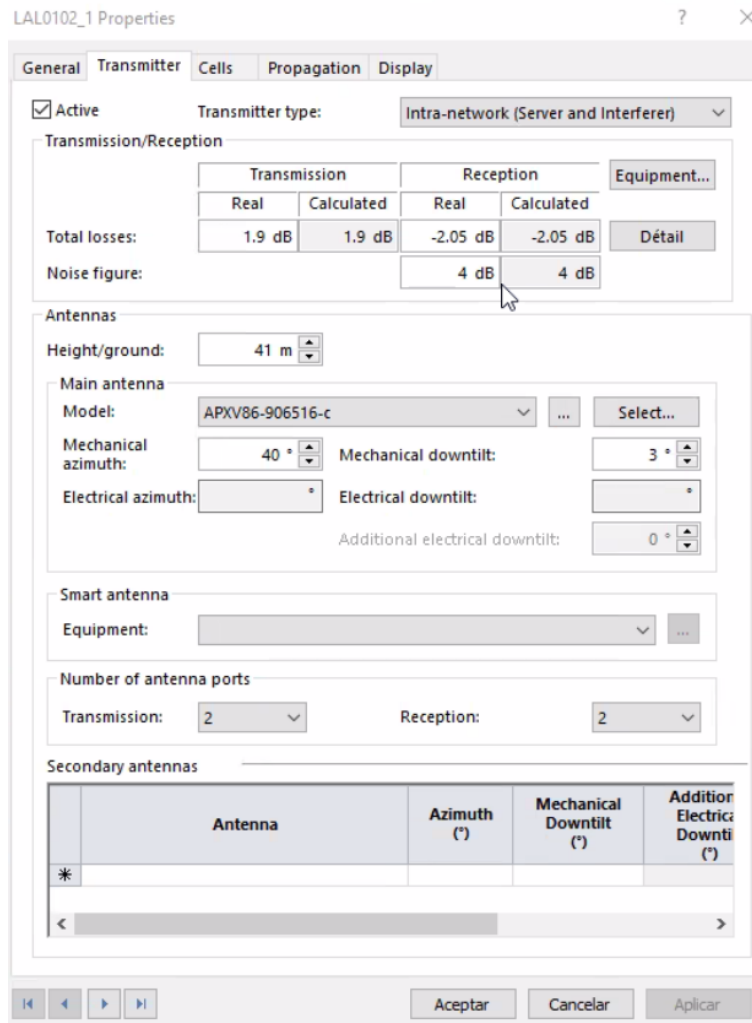


Figura 25. Configuración de un sector del site LAL0102.

Fuente: Software Atoll. (2022)

d. Calibración del escenario

Para poder realizar un modelamiento del escenario más cercano a los datos de drive test, se ingresaron los datos en el software Atoll. Este reporte contiene 3144 puntos de medición reales tomados en la ciudad de Otuzco (Figura 26).

X	Y	Alt. DTM (m)	Clutter	Clutter height (m)	DTM + clutter (m)	N	RSRP	SINR	Serving cell
-78.56957660	-7.903721271	2,700				1	-92.8	13.3	LAL0143_3 (248-2110.00MHz)
-78.56958566	-7.903721324	2,700				2	-93.2	12.6	LAL0143_3 (248-2110.00MHz)
-78.56956769	-7.903694106	2,701				3	-92.3	15.7	LAL0143_3 (248-2110.00MHz)
-78.56957660	-7.903721271	2,700				4	-92.9	14.3	LAL0143_3 (248-2110.00MHz)
-78.56958555	-7.903739399	2,699				5	-91.3	14	LAL0143_3 (248-2110.00MHz)
-78.56959451	-7.903757526	2,698				6	-89.8	14.6	LAL0143_3 (248-2110.00MHz)
-78.56964884	-7.90376688	2,697				7	-94.8	2.6	LAL0143_3 (248-2110.00MHz)
-78.56971224	-7.903776287	2,695				8	-92.1	10.8	LAL0143_3 (248-2110.00MHz)
-78.56977569	-7.903776656	2,693				9	-101.1	4.9	LAL0143_3 (248-2110.00MHz)
-78.56984820	-7.903777078	2,692				10	-96.3	6.4	LAL0143_3 (248-2110.00MHz)
-78.56989347	-7.903786379	2,691				11	-95.6	1.7	LAL0143_3 (248-2110.00MHz)
-78.56995671	-7.903822898	2,690				12	-92.2	9.4	LAL0143_3 (248-2110.00MHz)
-78.56998369	-7.903859206	2,689				13	-95.9	-1	LAL0143_3 (248-2110.00MHz)
-78.57002896	-7.903868507	2,688				14	-95.8	0.6	LAL0143_3 (248-2110.00MHz)
-78.57007428	-7.903868771	2,688				15	-101	4.4	LAL0143_3 (248-2110.00MHz)
-78.57011048	-7.903878019	2,688				16	-99.2	-0.3	LAL0143_3 (248-2110.00MHz)
-78.57015580	-7.903878283	2,688				17	-98.5	6.8	LAL0143_3 (248-2110.00MHz)
-78.57020107	-7.903887584	2,690				18	-99.1	7	LAL0143_3 (248-2110.00MHz)
-78.57027364	-7.903878968	2,692				19	-99.7	5.1	LAL0143_3 (248-2110.00MHz)
-78.57033714	-7.9038703	2,694				20	-101.6	2.9	LAL0143_3 (248-2110.00MHz)
-78.57042783	-7.90386179	2,698				21	-97.7	-0.2	LAL0143_3 (248-2110.00MHz)
-78.57048222	-7.903862106	2,700				22	-95.9	-1.6	LAL0143_3 (248-2110.00MHz)
-78.57051858	-7.903844242	2,702				23	-91.1	-0.5	LAL0143_3 (248-2110.00MHz)
-78.5705639	-7.903844506	2,704				24	-96.1	4	LAL0143_3 (248-2110.00MHz)
-78.57057307	-7.903826484	2,704				25	-95.4	6.6	LAL0143_3 (248-2110.00MHz)
-78.57060933	-7.903826695	2,706				26	-100.9	-1.1	LAL0143_3 (248-2110.00MHz)
-78.57066376	-7.903817974	2,708				27	-100.8	0.6	LAL0143_3 (248-2110.00MHz)
-78.57069112	-7.90379102	2,709				28	-96	6.3	LAL0143_3 (247-2110.00MHz)
-78.57072748	-7.903773156	2,711				29	-95.8	6.7	LAL0143_3 (247-2110.00MHz)
-78.57077301	-7.90373727	2,713				30	-99.2	4.6	LAL0143_3 (247-2110.00MHz)
-78.57080927	-7.903737481	2,715				31	-101.1	2.1	LAL0143_3 (247-2110.00MHz)
-78.57086376	-7.903719722	2,717				32	-99	3.3	LAL0143_3 (247-2110.00MHz)
-78.57088194	-7.90371079	2,718				33	-98	0.9	LAL0143_3 (247-2110.00MHz)

Figura 26. Ingreso de los datos del drive test en el software Atoll.

Fuente: Software Atoll. (2022)

Una vez ingresados los datos, se puede apreciar la ubicación de cada uno de ellos a lo largo de todo el terreno. (Figura 27)

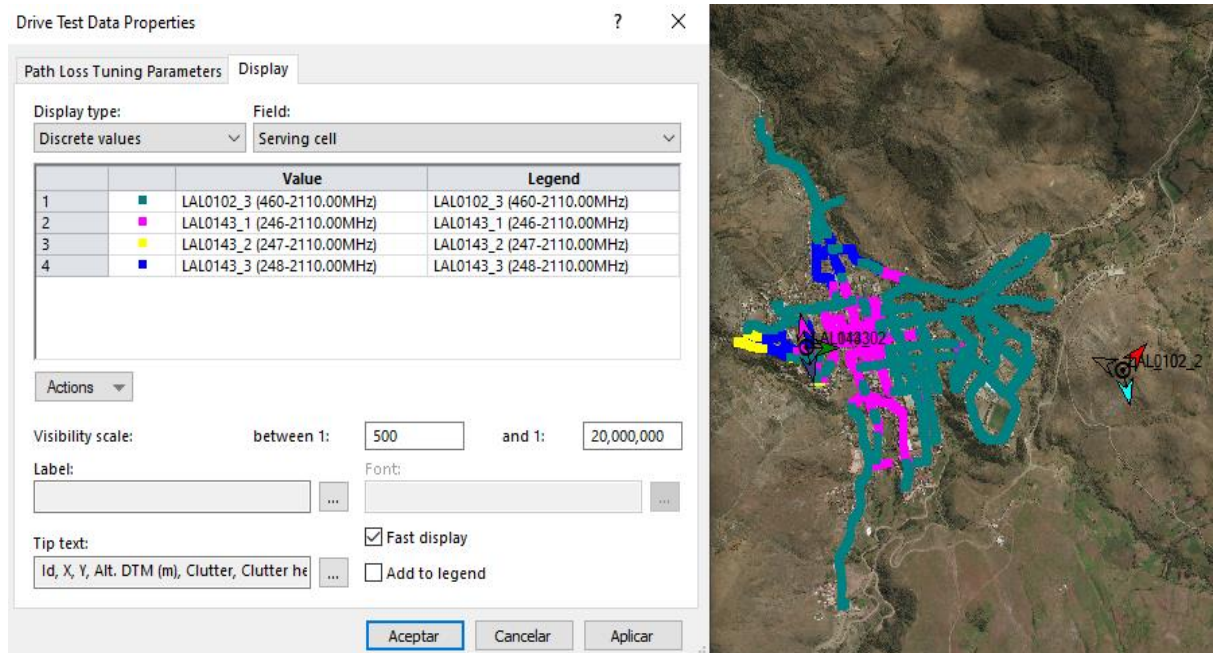


Figura 27. Ubicación de los 3144 puntos en el terreno (Campo: Serving Cell).

Fuente: Software Atoll. (2022)

Con los datos del drive test, se calibró el escenario mediante la configuración del modelo de propagación. Al realizar la calibración automática, se obtenía la configuración por defecto de dicho modelo, se comparó entre los datos reales del drive test y los datos del simulador (RSRP, Serving Cell y SINR). Esta comparación permitió obtener un escenario concreto, en base al parámetro RSRP (Figura 28).

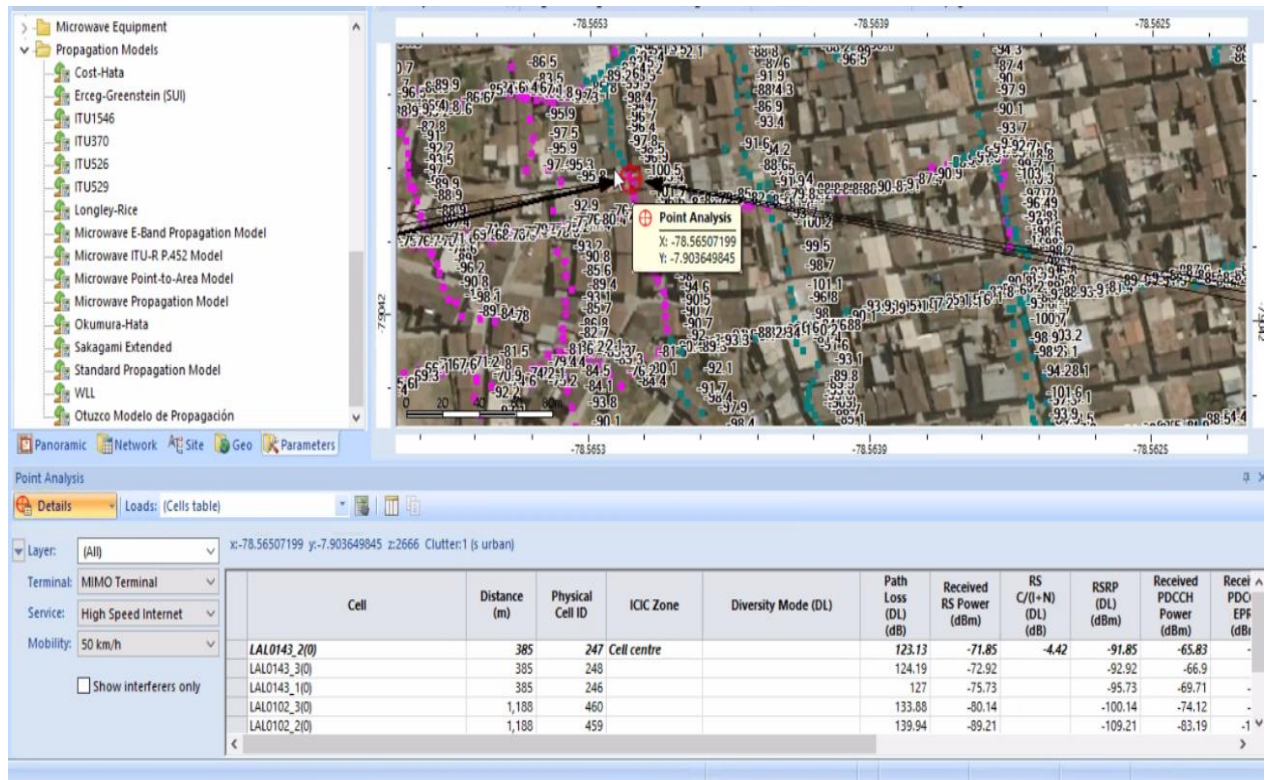


Figura 28. Comparación de los puntos (Parámetro: RSRP).

Fuente: Software Atoll. (2022)

3.7.2 Procedimientos para la elaboración del Escenario Estimado

Al proponer el nuevo escenario y realizar el aumento del número de frecuencias, se planteó la superposición de un site, bajo las mismas características del principal (ubicación y configuración); haciéndose uso así de dos frecuencias. Los nuevos sites reciben el nombre de LAL102_2 y LAL143_2. (Figura 29)



Figura 29. Posición de los nuevos sites.

Fuente: Software Atoll. (2022)

Luego de colocar y obtener 4 sites, colocar en la misma posición los nuevos sites, siendo estos: LALNEW_03, LALNEW_04, LAL102_2 y LAL143_2. (Figura 30)

Para los sites mencionados, se utilizará la banda E-UTRAN 7 con una frecuencia de 2535 MHz. (Figura 31)

Segunda Frecuencia		Name	Longitude	Latitude
<input checked="" type="checkbox"/>	LAL_NEW03_1	LAL_NEW01	-78.56516	-7.899999
<input checked="" type="checkbox"/>	LAL_NEW03_2	LAL_NEW02	-78.56091	-7.90772
<input checked="" type="checkbox"/>	LAL_NEW03_3	LAL_NEW03	-78.56516	-7.899999
<input checked="" type="checkbox"/>	LAL_NEW04_1	LAL_NEW04	-78.56091	-7.90772
<input checked="" type="checkbox"/>	LAL_NEW04_2	LAL0102	-78.5544	-7.905097
<input checked="" type="checkbox"/>	LAL_NEW04_3	LAL0143	-78.568524	-7.904176
<input checked="" type="checkbox"/>	LAL102_2_1	LAL102_2	-78.5544	-7.905097
<input checked="" type="checkbox"/>	LAL102_2_2	LAL143_02	-78.568524	-7.904176
<input checked="" type="checkbox"/>	LAL102_2_3			
<input checked="" type="checkbox"/>	LAL143_02_1			
<input checked="" type="checkbox"/>	LAL143_02_2			
<input checked="" type="checkbox"/>	LAL143_02_3			

Figura 30. Sites con segunda portadora.

Fuente: Software Atoll. (2022)

LAL_NEW03_1 Properties

General Transmitter Cells Propagation Display

	1
Name	LAL_NEW03_1(0)
ID	400
Active	<input checked="" type="checkbox"/>
Order	1
Layer	Macro Layer
Cell Type	LTE
Frequency Band	E-UTRA Band 7 - 10MHz
Channel Number	3,100
Channel Allocation Status	Not Allocated
Physical Cell ID Domain	
Physical Cell ID	400
PSS ID	1
SSS ID	133
PSS ID status	Not Allocated
SSS ID status	Not Allocated
Reuse distance (m)	
Max Power (dBm)	43
RS EPRE per antenna port (dBm)	15.4
SS EPRE Offset / RS (dB)	0
PBCH EPRE Offset / RS (dB)	0
PDCCH EPRE Offset / RS (dB)	0
PDSCH EPRE Offset / RS (dB)	0
Min RSRP (dBm)	-120
Cell Selection Threshold (dB)	0
Cell Individual Offset (dB)	0
Handover Margin (dB)	0
Cell Edge Margin (dB)	0
Fractional Power Control Factor	1
Max Noise Rise (UL) (dB)	6
Max PUSCH C/(I+N) (dB)	20
Interference Coordination Support	

Figura 31. Configuración de la segunda frecuencia para LAL_NEW03

Fuente: Software Atoll. (2022)

Debido a que algunas celdas/transmisores no tenían usuarios conectados (LAL102_1 y LAL143_1), se decidió apagar estos mismos; ya que teóricamente, se entiende que al haber más transmisores encendidos, se provocará un incremento de interferencias afectando al parámetro SINR. (Figura 32)

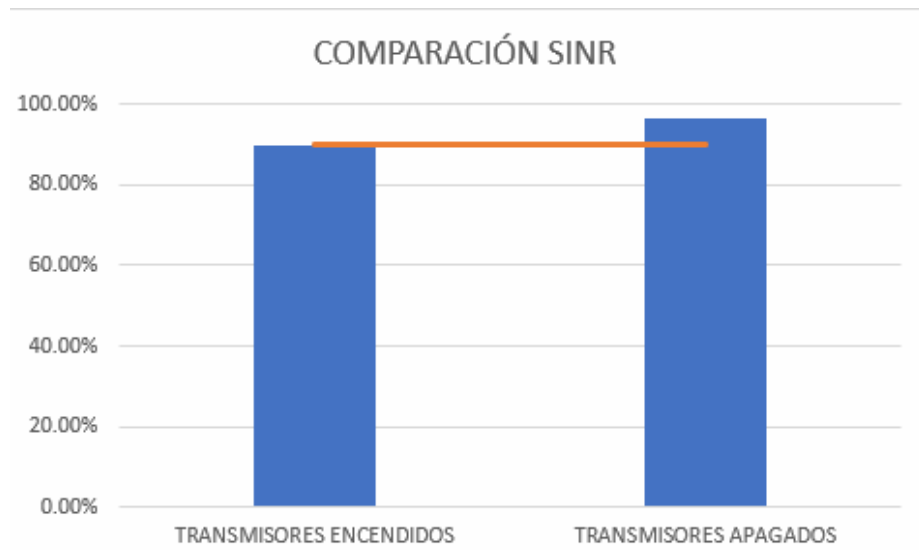


Figura 32. Comparación SINR con criterio aceptable >90%

Fuente: Software Atoll. (2022)

Una vez apagadas estas celdas, luego de obtener los nuevos resultados, se comprobó la mejora del parámetro SINR.

IV. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Análisis e interpretación de resultados

Después de calibrar el escenario de la ciudad de Otuzco en el software Atoll, se comparó este con los datos del reporte drive test que fueron tomados en la misma ciudad. La Figura 33 es una comparación del indicador RSRP que se obtuvieron y los datos del drive test.

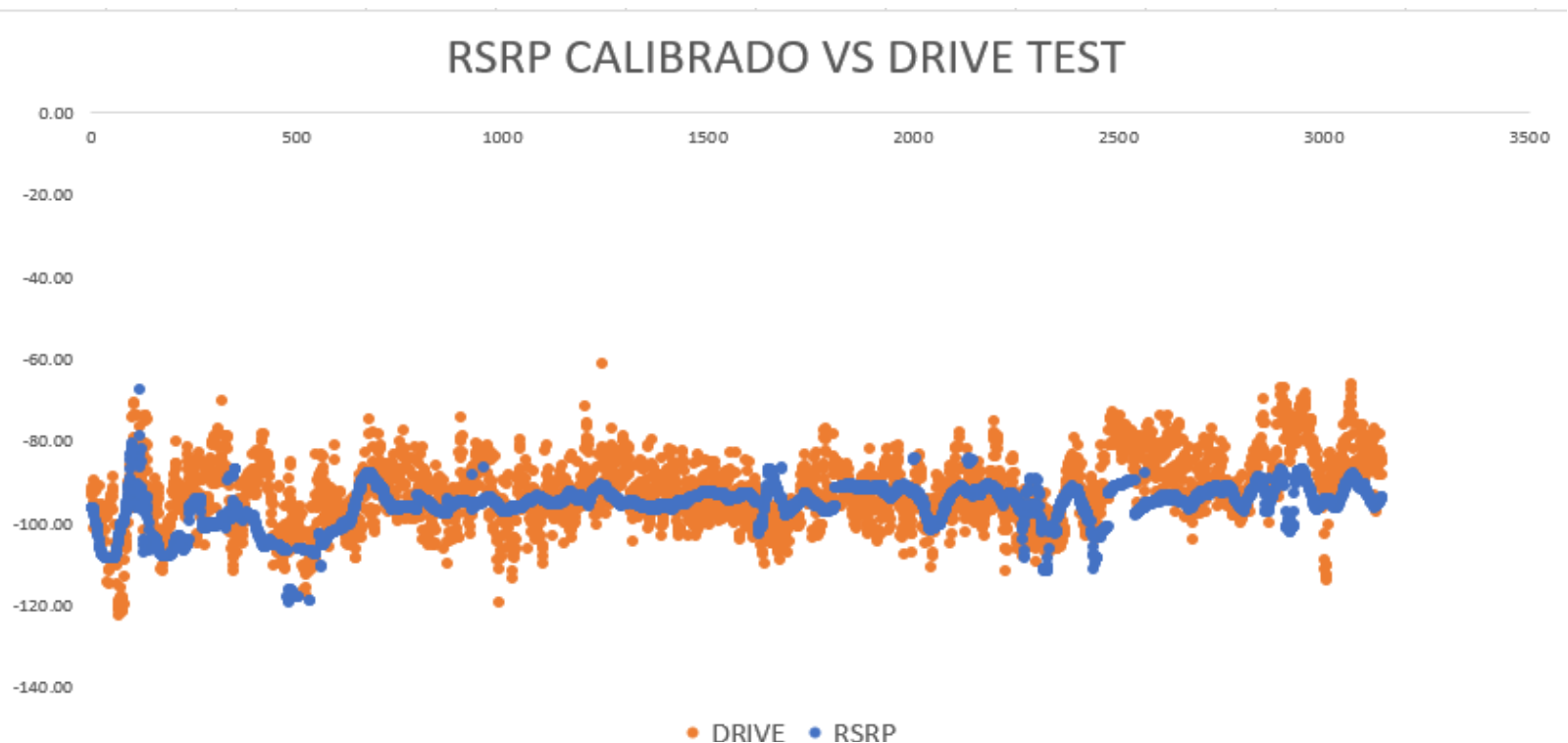


Figura 33. Comparación RSRP escenario y datos drive test.

Fuente: Software Atoll. (2022)

En la Figura 34 se observan los resultados del parámetro SINR de los datos del drive test y del escenario calibrado. En la Figura 35, el parámetro resource block saturation obtuvo una saturación de 72.4% en el transmisor LAL102_3 y 41.6% en el transmisor LAL143_1.

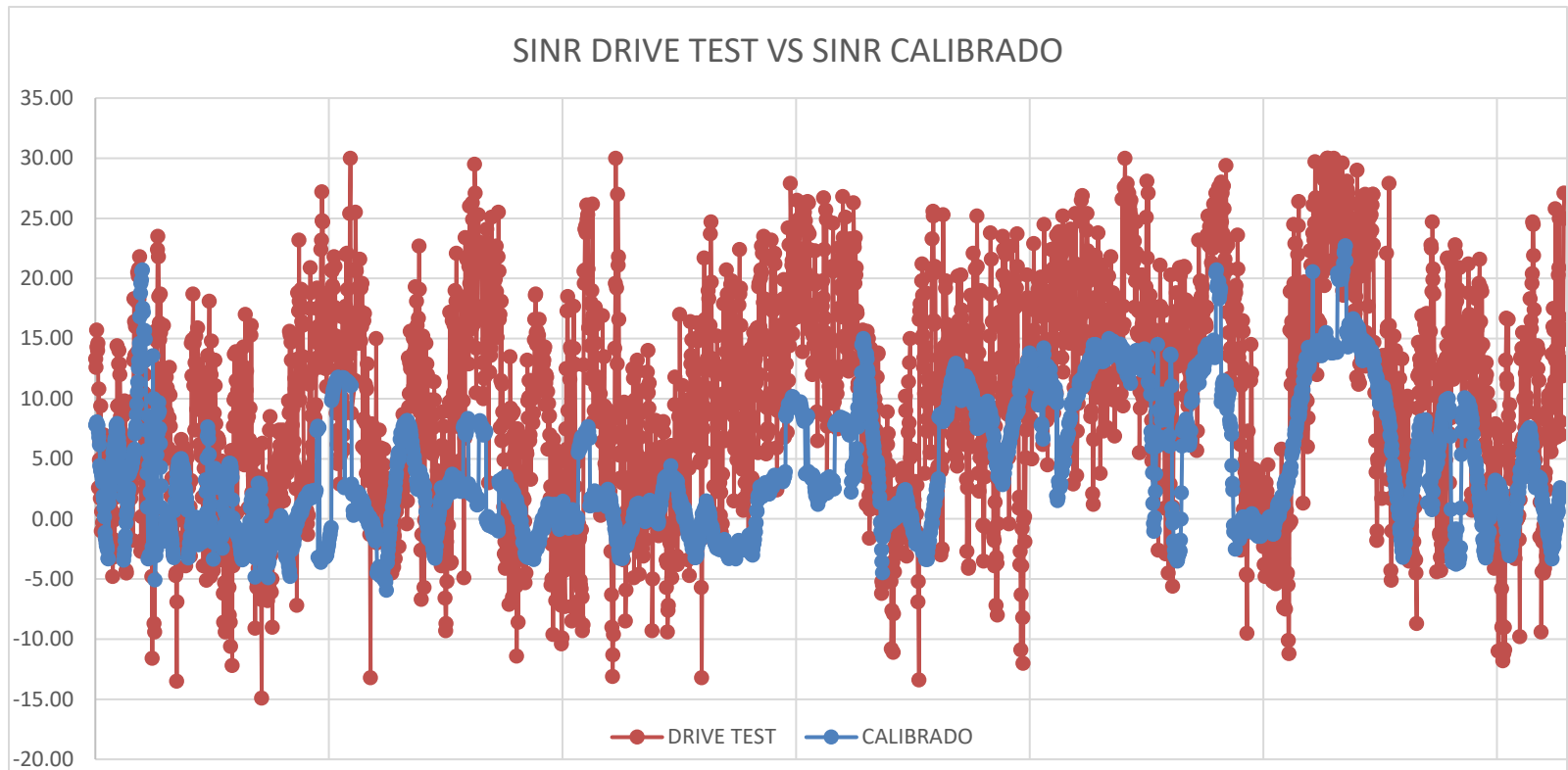


Figura 34. Comparación SINR datos drive test y escenario calibrado.

Fuente: Software Atoll. (2022)

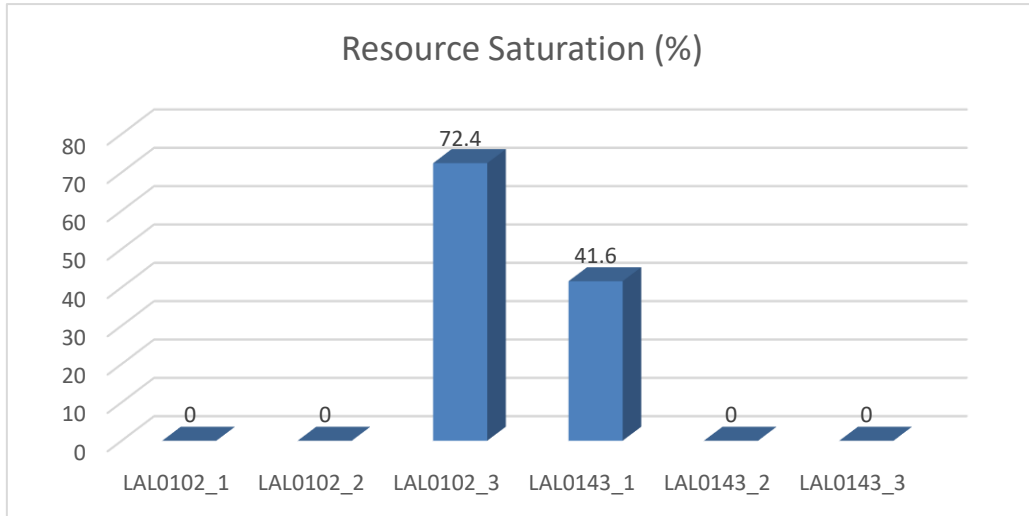


Figura 35. Resource Block en escenario calibrado.

Fuente: Software Atoll. (2022)

Se obtuvieron valores cercanos y en ambos reportes, sus datos promedios son muy similares. En la Figura 36 se observa la comparación del indicador Serving Cell.

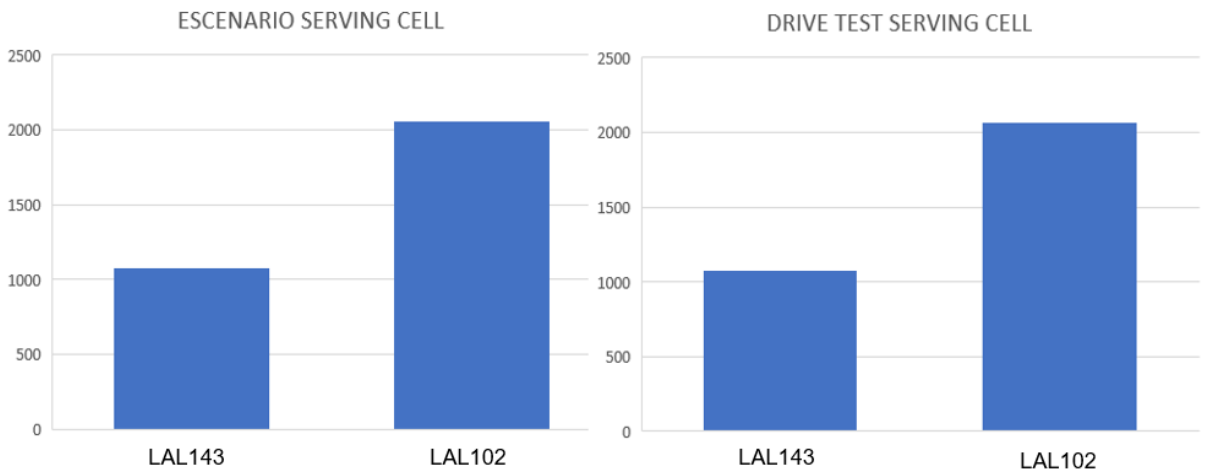


Figura 36. Comparación Serving Cell escenario y datos drive test

Fuente: Software Atoll. (2022)

Como se observan, los parámetros en la ciudad de Otuzco ya están calibrados y listos para pasar a la siguiente etapa, la comparación del escenario modelado y el escenario estimado.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Al realizar la simulación y análisis de los escenarios bajo los indicadores clave de acceso (KPIs) se obtuvieron los siguientes resultados para cada parámetro:

A. RSRP

El criterio tomado es el de un valor de RSRP ≥ -103 dBm. El valor promedio del escenario modelado tuvo como resultado -95.8 dBm y el del escenario estimado fue de -91.5 dBm. Obteniendo un 88.7% de muestras mayores que -103 dBm (escenario modelado) y un 96.55% de muestras mayores que -103 dBm (escenario estimado). (Figura 37)

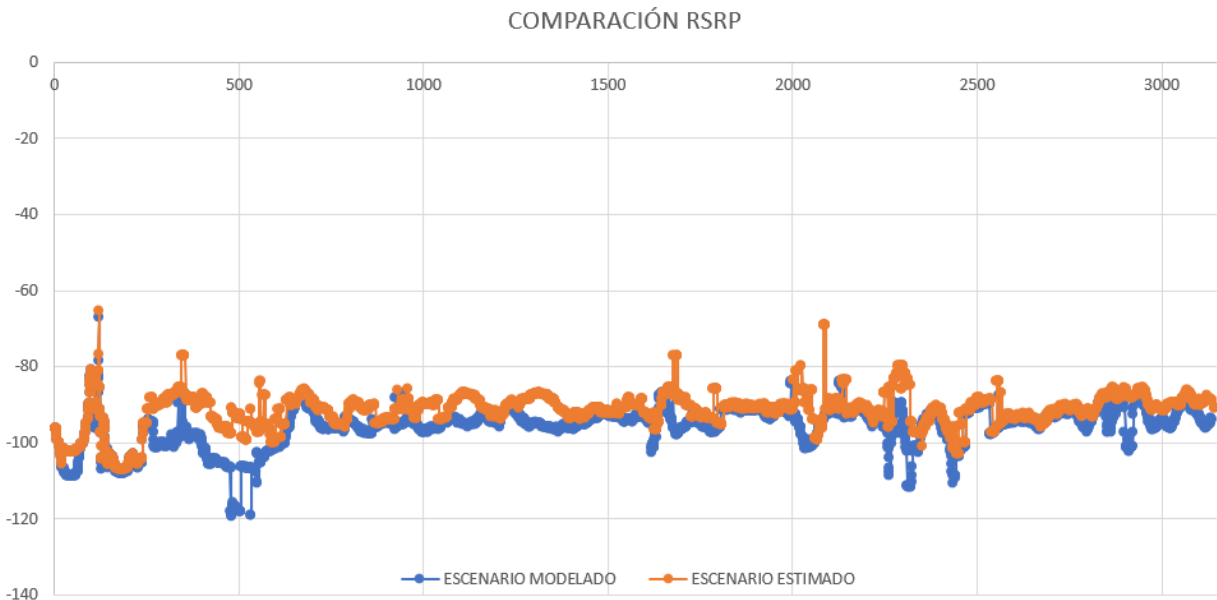


Figura 37. Comparación RSRP escenario modelado y estimado.

Fuente: Software Atoll. (2022)

Para una mejor muestra de resultados, se realizó la siguiente tabla:

Tabla 9. Resultados del parámetro RSRP

Número de muestras	Criterio	Porcentaje
3037	Mayor igual que -103 dBm	96.6%
107	Menor que -103 dBm	3.4%

B. SINR

Se toma el criterio de obtener un nivel de SINR ≥ -2 dB y que el 90% de número de muestras sea mayor a este valor. El porcentaje de muestras del escenario modelado fue de 88.7% y el del escenario estimado fue de 96.59%. (Figura 38)

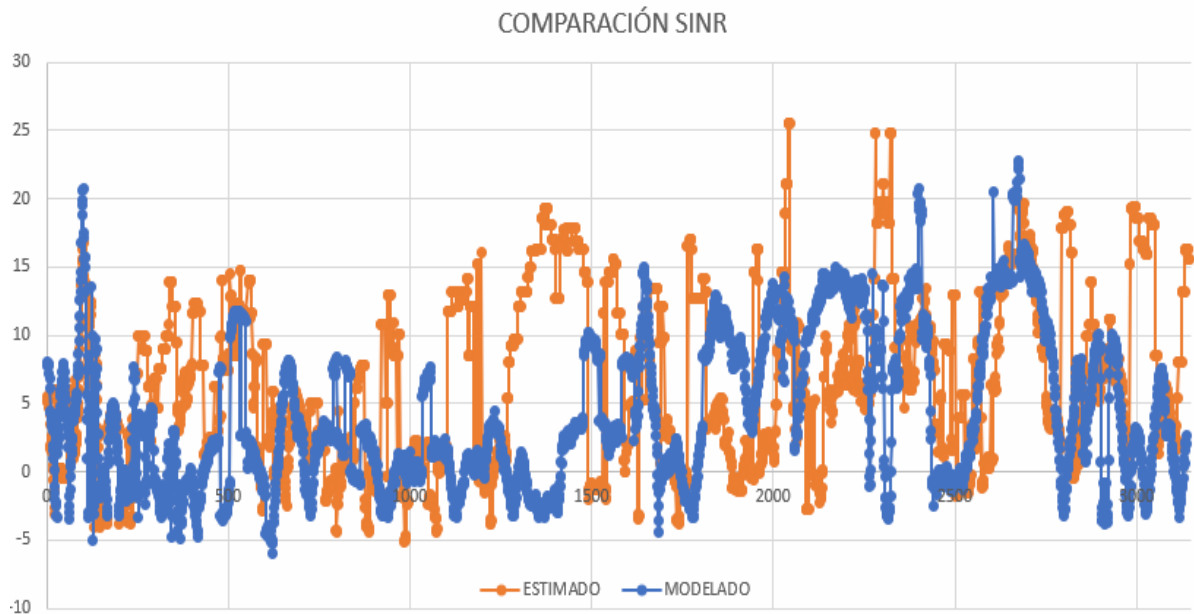


Figura 38. Comparación SINR escenario modelado y estimado.

Fuente: Software Atoll. (2022)

Para una mejor muestra de resultados, se realizó la siguiente tabla:

Tabla 10. Resultados del parámetro SINR

Número de muestras	Criterio	Porcentaje
3037	Mayor igual que -2 dBm	96.59%
107	Menor que -2 dBm	3.41%

C. Serving Cell

El criterio de distribución de celdas se tomó a partir del rango de aceptación del 60% del número de muestras. Es decir, el 60% de muestras de usuarios conectados en un site debe ser menor igual a 1886. Para el escenario modelado, se obtuvo una excesiva distribución del 75%, ya que 3 de los 4 sectores con usuarios, no tenían sobrecarga. Para el escenario estimado, ningún site pasó del umbral y el más alto fue LALNEW04 con una distribución máxima del 29,4 %, por lo tanto, se tuvo una distribución equitativa. (Figura 39)

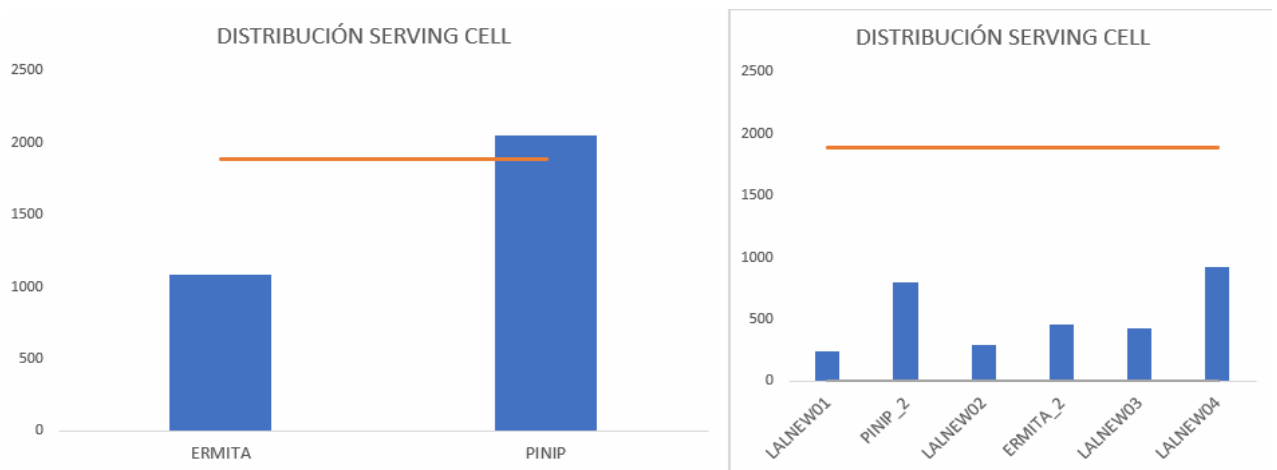


Figura 39. Comparación Serving Cell escenario modelado y estimado.

Fuente: Software Atoll. (2022)

Para una mejor muestra de resultados, se realizó la siguiente tabla:

Tabla 11. Resultados del parámetro Serving Cell

Total de usuarios	Sites	Distribución
46.2	LAL_NEW01	100.00%
42.8	LAL_NEW02	100.00%
83.1	LAL_NEW03	100.00%
138.1	LAL_NEW04	100.00%
129	ERMITA_2	100.00%
67.2	PINIP_2	100.00%

D. Resource Block Saturation

Para el escenario modelado, se obtuvo una distribución de bloque de recursos con una saturación máxima del 67% en un site y un número máximo de usuarios conectados de 101 en un site. En el escenario estimado, se obtuvo una distribución de bloque de recursos con una saturación de 0% y un número máximo de usuarios conectados de 138 en un site. (Figura 40)

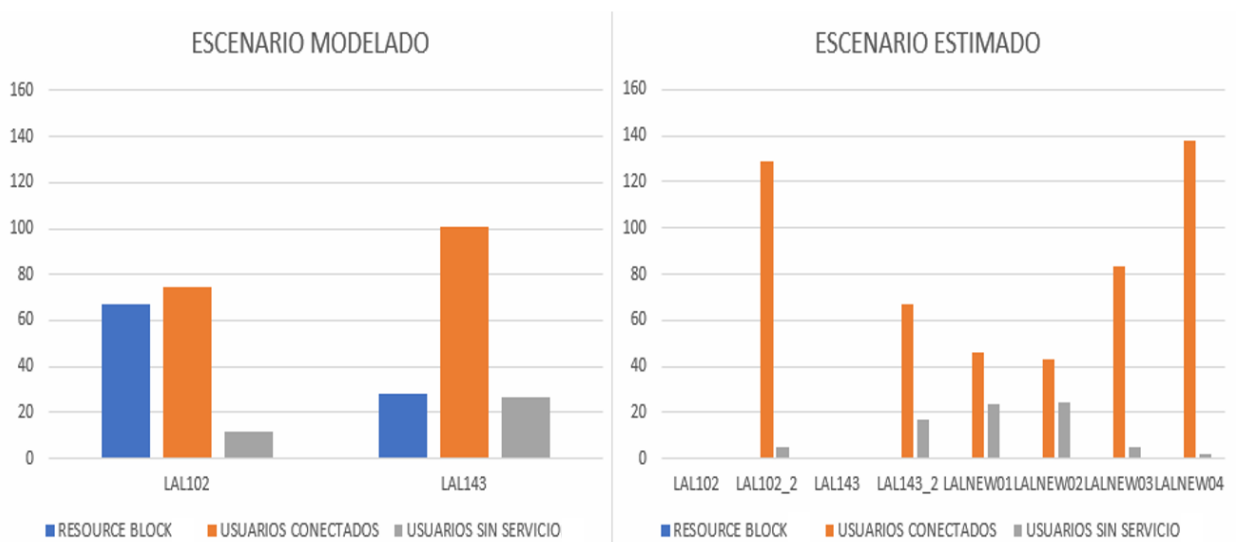


Figura 40. Comparación Resource Block escenario modelado y estimado.

Fuente: Software Atoll. (2022)

Para una mejor muestra de resultados, se realizó una tabla para el escenario modelado (Tabla 12) y otra para el escenario estimado. (Tabla 13)

Tabla 12. Saturación de recursos en escenario modelado.

Site	Número total de usuarios conectados	Usuarios sin servicio	Usuarios rechazados por saturación	Saturación de recursos
LAL102	74.5	40.8	234.5	67.04%
LAL143	101	59.5	63.6	28.38%
TOTAL	175.5	100.3	298.1	108%

Tabla 13. Saturación de recursos en escenario estimado.

Site	Número total de usuarios conectados	Usuarios sin servicio	Usuarios rechazados por saturación	Saturación de recursos
LAL102_2	129	6.3	0	0%
LAL143_2	67.3	13.9	0	0%
LALNEW_01	46.2	14.4	0	0%
LALNEW_02	42.8	13.9	0	0%
LALNEW_03	83.1	4.3	0	0%
LALNEW_04	138.1	2.3	0	0%
TOTAL	175.5	55.1	0	0%

Realizando la comparación con el escenario estimado previo (tesista Paulo Luzuriaga) que se toma como precedente, se observó que el parámetro SINR llega hasta un máximo del 90% de puntos $>-2\text{dB}$. En el escenario estimado final, el parámetro SINR llega al 96.59%, motivo por el que, la capacidad de transmisión (Throughput) fue mayor, ya que se encuentra directamente en relación con el parámetro señal/ruido. (Figura 41)

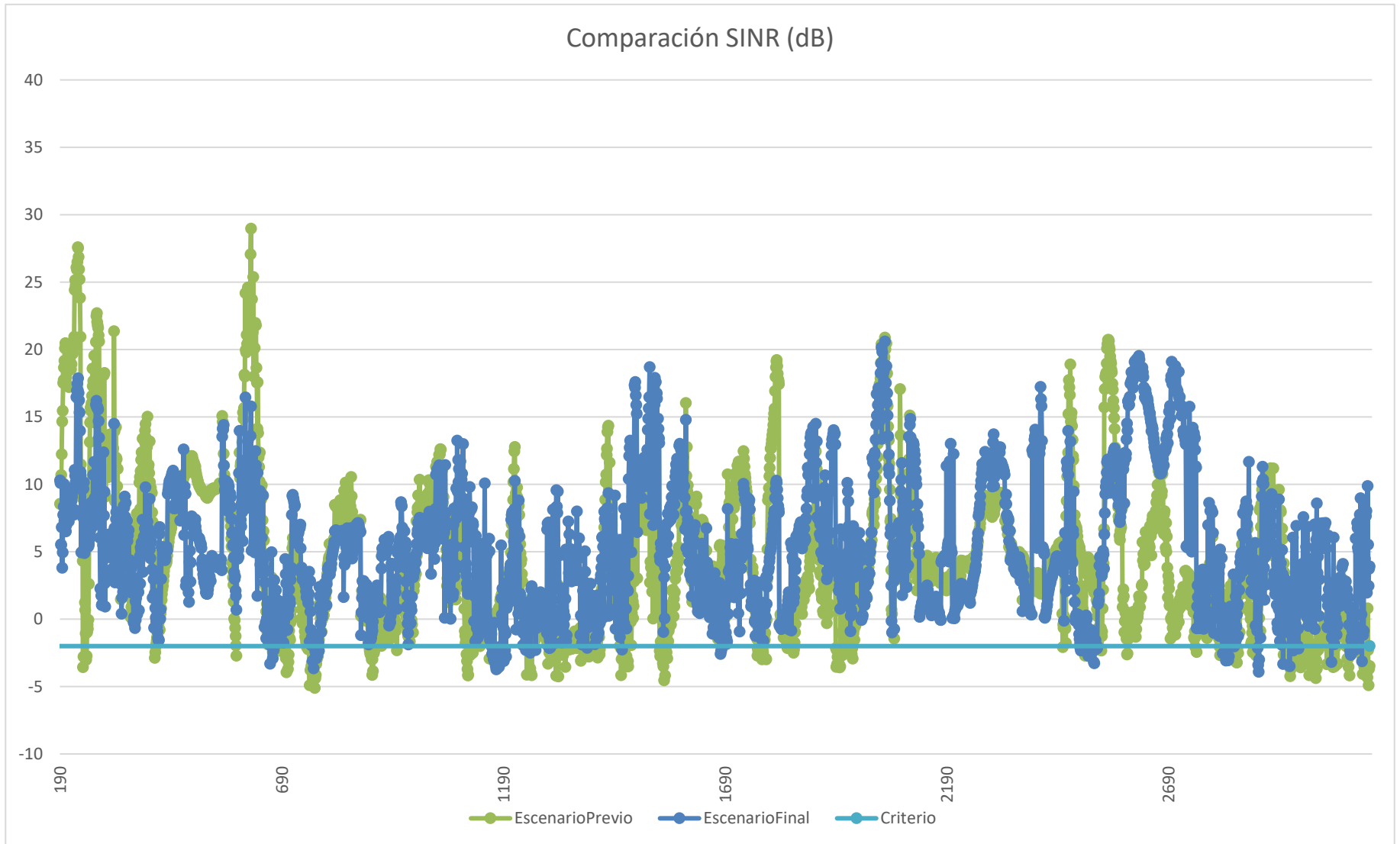


Figura 41. Comparación SINR escenario estimado previo y escenario estimado.

Fuente: Microsoft Excel. (2022)

Sin embargo, se observa que en algunos puntos de los 3144 de muestra, el parámetro SINR no llega a mostrar una mejora (Figura 42). Se escogieron puntos al azar dentro de los rangos no mejorados, y en el software Atoll se revisaron las interferencias más considerables provenientes de distintas celdas (distinto sector y BTS).

Se utilizó el programa Google Earth, para agregar una capa con los puntos y las coordenadas de las estaciones base finales. Posterior a ello, se trazó una línea de vista desde cada uno de los puntos de muestra hacia las coordenadas de las BTS causantes de mayor interferencia y se encontraron líneas de vista directas. Por ejemplo, en el punto número 5, se observa una vista directa de punto a punto, que no es obstruida por alguna estructura geográfica o física considerable. (Figura 43)

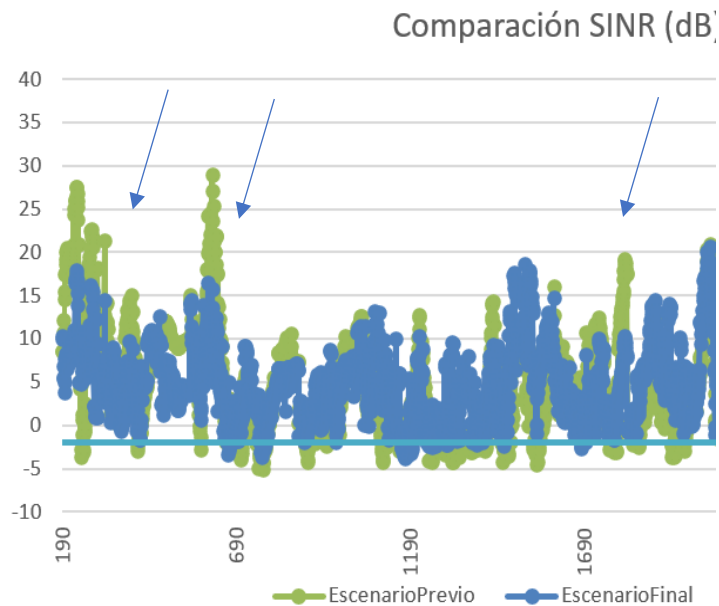


Figura 42. Fragmento de Comparación SINR.

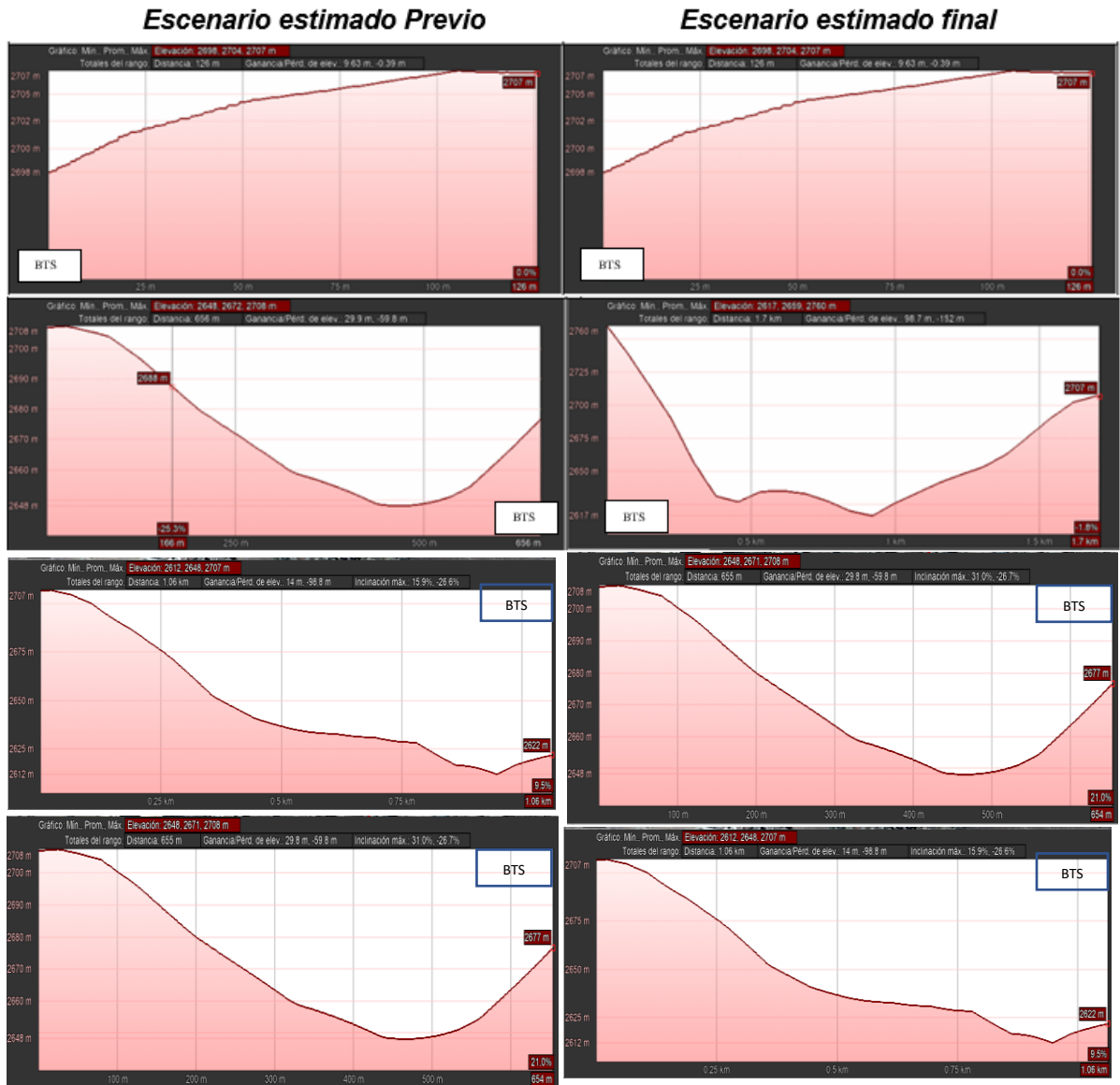


Figura 43. Comparación vista escenario estimado previo y escenario estimado final.

Fuente: Google Earth (2022)

En el escenario estimado final, se presentan varias celdas con un nivel alto de potencia para ser captado por el usuario móvil. Esto ocasiona que móvil detecte varias señales considerables a la vez y sean interpretadas como interferencia. A comparación del escenario estimado previo, donde las celdas consideradas como

interferencia, presentan una diferencia de potencia mayor, es decir, una baja señal, por lo tanto, se obtiene una mejor relación señal/ruido. (Figura 44)

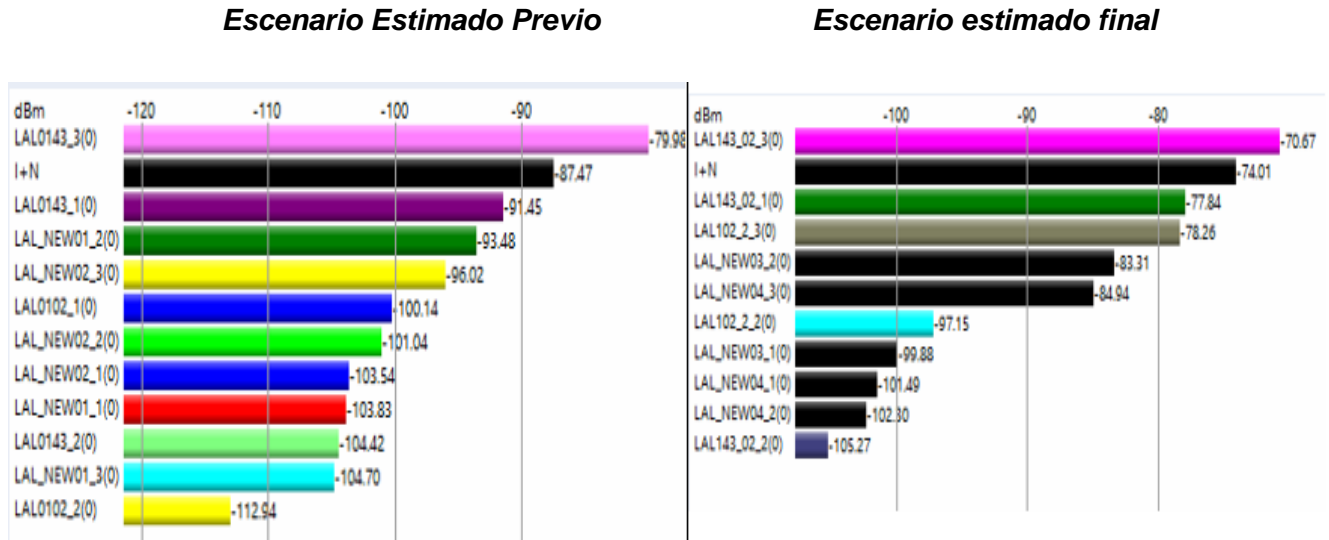


Figura 44. Comparación interferencia escenario estimado previo y escenario estimado.

Fuente: Software Atoll (2022)

Este mismo análisis, se realizó en otros puntos y se obtuvieron los mismos resultados en las líneas de vista punto a punto (Figura 45) y potencia, como por ejemplo en el punto 150. (Figura 46)

Escenario Estimado Previo

Escenario estimado final

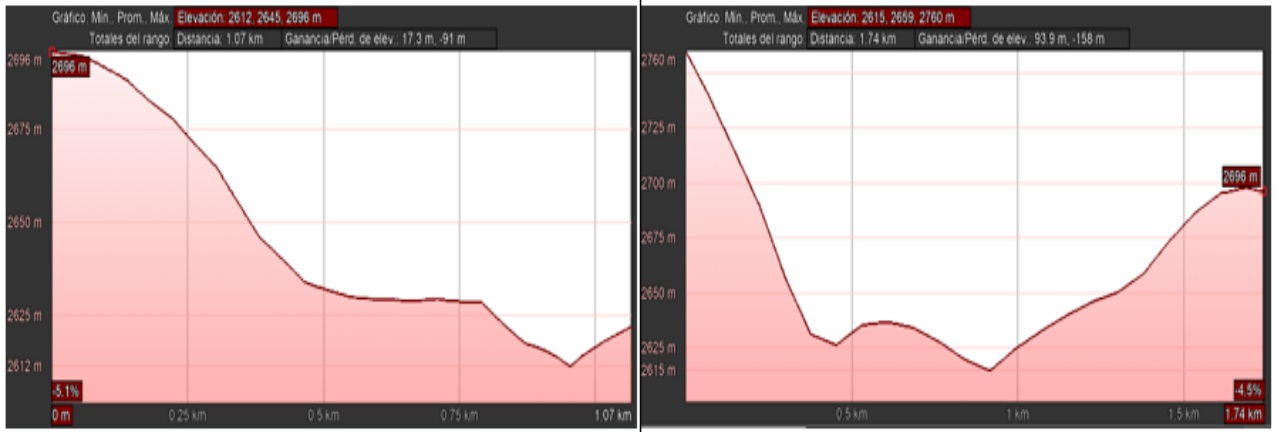


Figura 45. Comparación vista escenario estimado previo y escenario estimado.

Fuente: Google Earth (2022)

Escenario Estimado Previo

Escenario estimado final

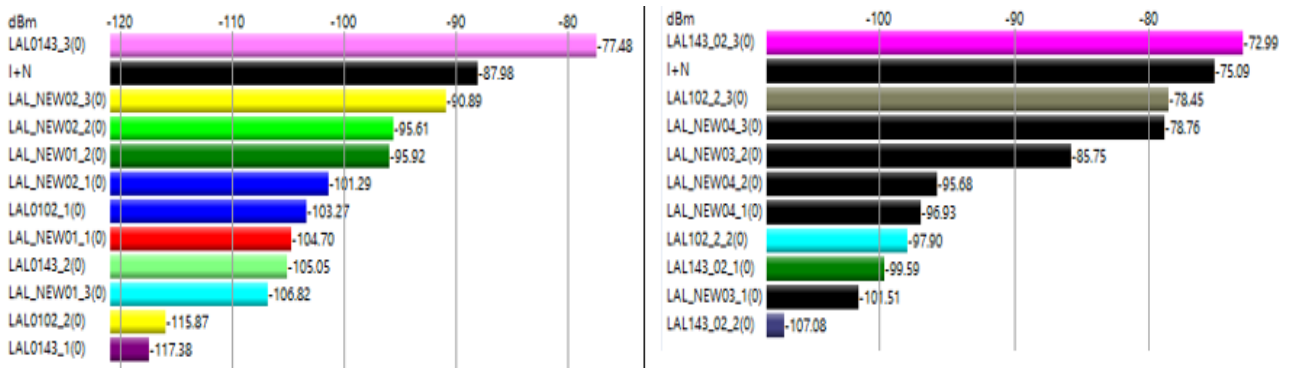


Figura 46. Comparación interferencia escenario estimado previo y escenario estimado.

Fuente: Software Atoll (2022)

Se aplicó el teorema de Shannon, para hallar la capacidad de transmisión en los 3144 puntos de muestra, comparando los escenarios finales propuestos, se obtienen los siguientes resultados: (Figura 47)

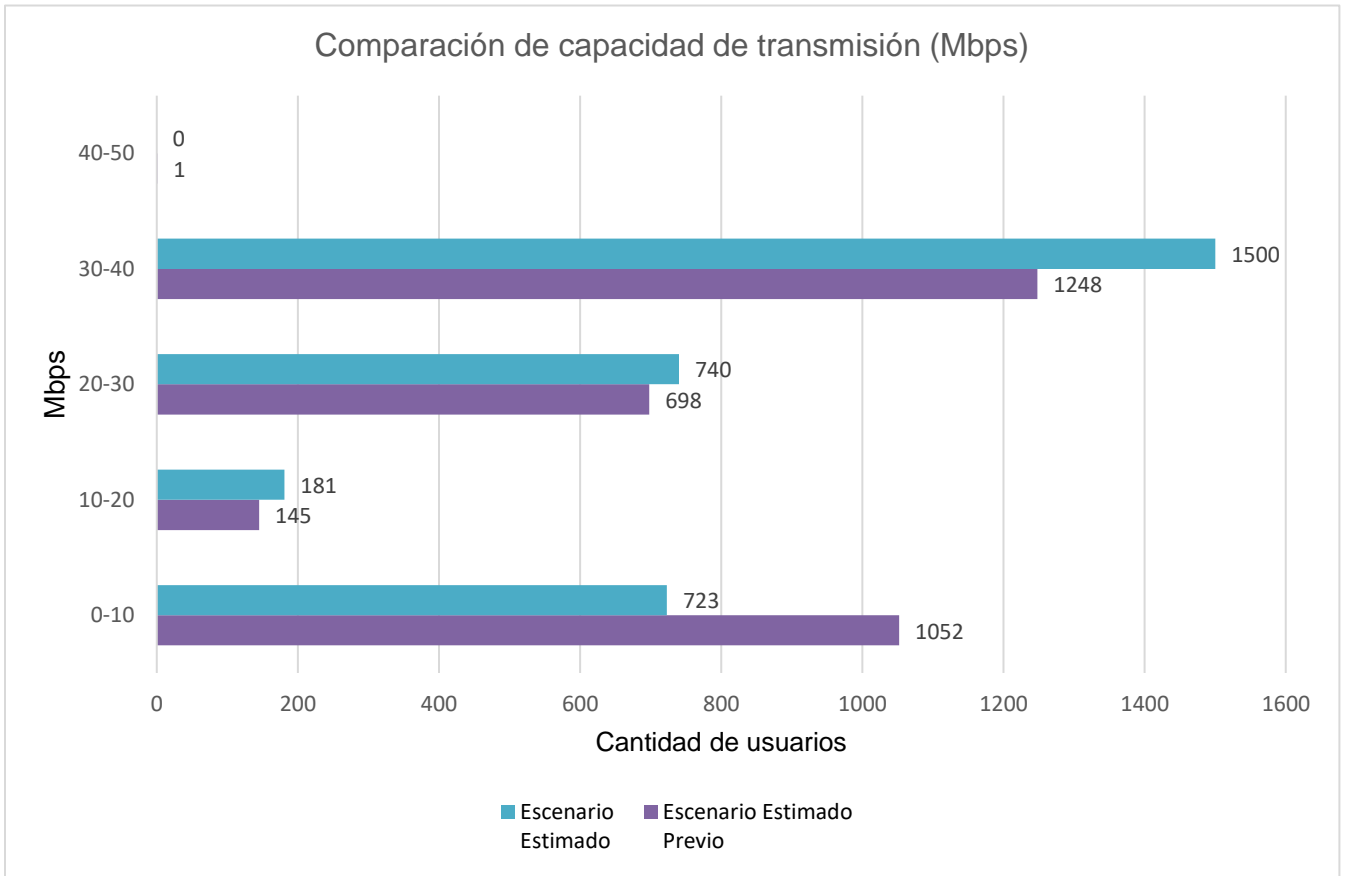


Figura 47. Comparación de capacidad de transmisión escenario estimado previo y escenario estimado.

Al aumentar la relación señal/ruido, se obtendrá mejor capacidad de transmisión. Se observa que en el escenario estimado previo se obtuvo un 33.46% del total de las muestras en velocidad bajas entre 0-10 Mbps, mientras que el escenario estimado final solo es de 23% (Tabla 14); y el mayor porcentaje de muestras entre los 30-40 Mbps, lo obtiene el escenario estimado final con un 47.71%, mientras que el escenario estimado previo se obtiene un 39.69% (Tabla 14)

Tabla 14. Comparación de capacidad de transmisión.

Capacidad de transmisión	Escenario modelado	Porcentaje	Escenario estimado	Porcentaje
0-10 (Mbps)	1052	33.46 %	723	23.00 %
10-20 (Mbps)	145	4.61 %	181	5.76 %
20-30 (Mbps)	698	22.20 %	740	23.54 %
30-40 (Mbps)	1248	39.69 %	1500	47.71 %
40-50 (Mbps)	1	0.03 %	0	0.00 %
Total	3144	100.00 %	3144	100.00 %

Una vez obtenidos los resultados finales del escenario modelado, se comprobó que el método de Carrier Agregation mejora significativamente los parámetros evaluados: RSRP, SINR, Resource Block Saturation y Distribución de Serving Cell; sin la necesidad de aumentar el número de BS. Esto implicaría el ahorro de costos, cobertura similar, menor interferencia; por lo tanto, mejor calidad del servicio móvil.

VI. CONCLUSIONES

- Para la elaboración del escenario modelado, se hizo uso de la banda E-UTRAN 8 a una frecuencia de 900MHz para la frecuencia inicial con el modelo de antena APXV86-906516-c y el modelo de propagación de Atoll.
- Para realizar el escenario estimado, se trabajó bajo la banda E-UTRAN 7 a una frecuencia de 2535MHz para la segunda frecuencia portadora, bajo el mismo modelo de propagación inicial.
- Conforme a la simulación del escenario inicial se obtuvieron los siguientes indicadores de rendimiento en una red 4G LTE: RSRP = 88.7%, SINR = 88.7%, Serving Cell = 75% y Resource Block Saturation de 108%.
- Conforme a la simulación del escenario estimado se obtuvieron los siguientes indicadores de rendimiento RSRP = 96.6%, SINR = 96.6%, Serving Cell = 100% y Resource Block Saturation del 0%.
- Conforme a la simulación del escenario estimado junto con el método de Carrier Aggregation se obtuvo una mejora del 47.71% en una capacidad de transmisión de 30-40 Mbps, 5.76% en el rango de 10-20 Mbps y del 23.54% en el rango de 20-30 Mbps.
- Se lograron identificar los indicadores que afectan la calidad del servicio en una red 4G LTE obteniendo un incremento del 7.9% en los parámetros RSRP y SINR, 25% en el parámetro Serving Cell y una disminución al 0% del parámetro Resource Block Saturation. Además, al mejorar el SINR, la velocidad de transmisión mejoró en un 8.02% en el rango óptimo de 30-40 Mbps, también se mejoró en un 1.15% en un rango de 10-20 Mbps y en 1.34% en un rango de 20-30 Mbps.

VII. RECOMENDACIONES

- Para estudios futuros, se recomienda utilizar un dron para el mapeo del terreno de la ciudad de Otuzco, ya que existe un mapa de terreno que se puede incluir en la caracterización del escenario. Permitiendo así, un escenario mucho más preciso.
- Se recomienda en base a la buena respuesta de la red en el uso de dos frecuencias, en utilizar una tercera para complementar al 100% el parámetro del SINR.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agusti, R. (2010). *LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles*. España: Vodafone España.
- Balasubramanian, A. (2017). *Digital Elevation Model (DEM) in GIS*.
- Barrantes, Bruno y Saenz, Juan (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*. (Tesis para obtener el título de profesional de ingeniero electrónico). Universidad Privada Antenor Orrego, Perú.
- Clarke, R. N. (2013). *Expanding mobile wireless capacity: The challenges presented by technology and economics*. Washington: ScienceDirect.
- Cox, C. (2014). *An Introduction to LTE*. Reino Unido: Wiley.
- Daniel Argandoña, J. M. (2014). *Estimación de torres en las redes móviles para el año 2025 en el Perú*. Perú: Osiptel.
- Fernández Salmerón, V. (2010). *Ejemplo de diseño e implementación de una estación base GSM/UMTS*. Gandia: UPV.
- García Falaguera, J. (2014). *Diseño de un Plan Nominal para un Sistema LTE Mediante una herramienta de planificación Radio Comercial*. Catalunya: TelecomBCN.
- Garg, V. (2007). *Wireless communications and networking*. San Francisco, EEUU: Morgan Kaufmann
- Gil, Fidel. (2016). *Estudio del comportamiento de los KPI en campo de las soluciones in-building das y lampsite para una red de acceso 4G – LTE, en la ciudad de Trujillo*. (Tesis para obtener el título profesional de ingeniero electrónico). Universidad Privada Antenor Orrego, Perú.
- Huidobro, J. (2013). *Antenas de telecomunicaciones*. ACTA, 1-5.

- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2020). *Perú: Estimaciones y Proyecciones de Población por Departamento, Provincia y Distrito, 2018-2020*. Recuperado de: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1715/libro.pdf
- Ibrahim, Taufiq. (2012). *Mapa Indicador de Nivel de Señal Atoll*. Recuperado de: <https://tholeibrahim.wordpress.com/2012/08/01/using-earth-explorer-digital-map-for-coverage-prediction-in-atoll/>
- Iglesias, Luis. (2016). *Planificación y Optimización de una red LTE con la herramienta Atoll*. (Tesis para obtener el título profesional de ingeniero electrónico). Universidad Privada Antenor Orrego, Perú.
- Imoize, A. L. (2018). *MEASUREMENTS-BASED PERFORMANCE ANALYSIS OF A 4G LTE*. Nigeria: ResearchGate.
- INEGI. (2003). *Manual de Procedimientos de Ortografía*. Recuperado de: https://www.snieg.mx/DocAcervoINN/documentacion/inf_nvo_acervo/SNIGMA/inf_topografica/Manual_Procedimientos_Ortofotografia.pdf
- Lema, M. (2015). *Contribution to the Optimization of 4G Mobile Communications by Means of Advanced Carrier Aggregation Strategies*. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Luzuriaga, P. (2019). *Análisis de la influencia del aumento del número de sites en los indicadores claves de acceso radio LTE en la ciudad de Otuzco 2019*. (Tesis para obtener el título profesional de ingeniero electrónico). Universidad Privada Antenor Orrego, Perú.
- Mohammed, A. & Mohamed H. & Jalel C. (2012). *Carrier Aggregation in Long Term Evolution-Advanced*. International Islamic University Malaysia, Malaysia.
- Morocho, M. (2016). *Planificación de Radioenlaces con base en topografía digital*.

Recuperado de: <http://www.radiocomunicaciones.net/pdf/planificacion-radioenlace-cartografia-digital.pdf>

Osiptel. (2018). *Despliegue de Estaciones Base Celular en el Perú*. Obtenido de <https://sociedadtelecom.pe/2018/08/20/despliegue-de-estaciones-base-celular-en-el-peru/>

Palá, V. (2008). *Ortofoto Urbana y Ortofoto estricta*. Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña. Recuperado de: https://www.icgc.cat/content/download/3963/13218/version/1/file/orto_urbana_i_trueorto.pdf

Rioul, Olivier & Magossi, José. (2014). *Shannon's Formula and Hartley's Rule: A Mathematical Coincidence?*

Saha, R. (2016). *CELLULAR MOBILE COMMUNICATION A FUNDAMENTAL PERSPECTIVE*. Thailand: R&D NextEvolution.

Zhang, X. (2018). *LTE Optimization Engineering Handbook*. Beijing: Wiley.

3GPP. (2011). *Universal Mobile Telecommunications System*. Francia: ETSI.

IX. ANEXOS:

Reporte de Optimización Otuzco

TC59	Target Coverage 4G for 3Mbit/s							
02/01/2017	RSRP out car		RSRP in car		RSRP Indoor	SINR		Passlost
KV	dBm (≥)	Target (≥)	dBm (≥)	Target (≥)	dBm (≥)	dB (>=)	Target (≥)	
Dense Urban	-96	90	-102	90	-117	-2	90	21
Urban	-100	90	-106	90	-117	-2	90	17
Sub Urban	-103	90	-109	90	-117	-2	90	14

KPI	Value					Bitel vs Claro	Bitel vs Entel	Bitel vs Movistar	Target	Bitel vs Target	Bitel After vs Before
	Bitel After	Claro	Entel	Movistar	Bitel Before						
RSRP Indoor (% Ratio of samples have reached Data 3Mbit/s)	97.00	73.72	77.37	77.99	98.97	-88.57	-86.73	-86.35	90	69.96	-191.48
SINR (% Ratio of samples have reached Data SINR >= -2)	91.55	99.18	98.97	98.31	86.82	928.17	723.71	399.50	90	15.52	35.90
Average LTE DL Throughput	3.28		16.82		1.90		80.49		3	9.36	72.30
Average LTE UL Throughput	5.02				2.82				0.256	1861.78	77.89
LTE DL Throughput (≥ 3 Mbps)	41.46		100.00		12.50		100.00		90	-485.37	33.10
LTE UL Throughput (≥256 Kbps)	100.00				90.63		-100.00		90	100.00	100.00
HOSR	100.00		99.02		100.00		-100.00		99.5	100.00	0.00
CSSR CSFB	99.20		98.51		98.69		-46.13		98	60.00	38.80
CDR CSFB	0.00		0.00		0.00		0.00		1	100.00	0.00
CST CSFB Average	3.50		5.77		3.34		-39.26		6	41.63	-4.95
% Samples CST CSFB reach target (6s)	99.19		62.81		98.68		-97.82		90	91.90	38.64
TR after CSFB	0.04		0.05		0.09		-20.00		0.5	92.00	55.56