



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE ELECTROTECNIA Y COMPUTACIÓN**

**Trabajo Monográfico Para optar al título de Ingeniero en  
Telecomunicaciones**

***“Análisis comparativo de interferencia Intra frecuencia e Inter frecuencia  
de una red LTE-A en la ciudad de Managua”***

**Autores:**

- ❖ **Br. Kevin Enrique Espinoza Carrero (2015-0317I)**
- ❖ **Br. Hansell Martin Varela Lorío (2015-0184I)**

**Tutor:**

- ❖ **Ing. Marlovio José Sevilla Hernández.**

**Noviembre, 2023.**

**Managua, Nicaragua.**



## Dedicatoria

Dedicamos el presente trabajo monográfico primeramente a **Dios** por habernos permitido llegar a este momento tan importante de nuestra formación profesional y académica dándonos sabiduría y perseverancia para la culminación de nuestra tesis.

A nuestros padres por ser nuestros pilares más importantes que con mucho esfuerzo y apoyo incondicional nos respaldaron para lograr culminar con éxito.

A todas las personas que nos han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con mucho logro en especial aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

***Hansell Varela y Kevin Espinoza***

## Agradecimientos

### **Agradecemos:**

#### **A DIOS:**

Por habernos permitido llegar hasta este punto de nuestras vidas y habernos dado salud para lograr nuestros objetivos, además por su infinitud y amor, por estar en cada paso que dimos para el desarrollo de nuestro trabajo monográfico a lo largo de este camino en nuestros estudios universitarios.

#### **A NUESTROS PADRES:**

Por sus apoyos incondicionales, por sus palabras de aliento, sus consejos, su amor por habernos formado con buenos valores y porque siempre serán nuestros ejemplos a seguir en nuestros día a día.

#### **A NUESTRO TUTOR:**

Agradecemos cordialmente a nuestro tutor. **Ing. Marlovio José Sevilla Hernández**, por su enorme paciencia, dedicación y apoyo durante el proceso de la preparación de este trabajo monográfico que mediante sus directrices y orientaciones logramos en conjunto la ejecución de nuestra tesis

***Hansell Varela y Kevin Espinoza***

## Resumen

En el presente trabajo monográfico se realizó un estudio comparativo entre las redes LTE y LTE-A (Long Term Evolution Advanced). El estudio se enfocó en el rendimiento del Throughput en la descarga de datos en ambas redes. La realización de mediciones de campo previo y posterior a la implementación de la red LTE-A se realizó en un clúster de 17 sitios en las bandas de frecuencias B2, B4 y B28 FDD (Frequency Division Duplex), en la ciudad de Managua. Durante los drives test se recopilaban parámetros de intensidad de la señal, calidad de la señal, la razón señal ruido y el Throughput. entre ambas tecnologías. Los datos recopilados se utilizaron en el estudio comparativo para identificar los parámetros que incidieron en el desempeño del Throughput.

En la segunda parte del documento se muestran resultados de las simulaciones de Monte Carlo en la herramienta ATOLL® para realizar el análisis del Throughput a nivel de Inter frecuencia e intra-frecuencia en la red LTE-A desplegada en el clúster de 17 sitios en la ciudad de Managua. Los resultados obtenidos de las simulaciones de Monte Carlo más los resultados de las mediciones de campo previas y posteriores se utilizaron para la realización de un estudio comparativo.

**Palabras Claves:** LTE-A, FDD, Throughput, ATOLL®, Drive Test, Inter frecuencia, Intra frecuencia, Monte Carlo.

## Abstract

In the present monographic work, a comparative study was carried out between LTE and LTE-A (Long Term Evolution Advanced) networks. The study focused on the throughput performance of downloading data on both networks. Field measurements were carried out before and after the implementation of the LTE-A network in a cluster of 17 sites in the B2, B4 and B28 FDD (Frequency Division Duplex) frequency bands, in the city of Managua. During the drive tests, parameters of signal intensity, signal quality, signal-to-noise ratio and throughput were collected. between both technologies the data collected was used in the comparative study to identify the parameters that affected the throughput performance.

The second part of the document shows the results of Monte Carlo simulations to carry out throughput analysis at the inter-frequency and intra-frequency level in the LTE-A network deployed in the cluster of 17 sites in the city of Managua. The results obtained from the Monte Carlo simulations plus the results of the field measurements before and after were used to carry out a comparative study.

**Keywords:** LTE-A, FDD, Throughput, ATOLL®, Drive Test, Inter frequency, Intra frequency, Monte Carlo.

## Lista de Abreviaturas

- **ANSI: American Standard For Telecommunications**
- **BER: Bit Error Rate**
- **BLER: Block Error Rate**
- **CA: Carrier Aggregation**
- **CQI: Indicador de calidad del canal**
- **C(I+N): Carrier to interface Noise**
- **DL: Down link**
- **eNB Evolved NodeB**
- **FDD: Frequency Division Duplex**
- **E-UTRAN: Evolved Terrestrial Radio Access Network**
- **EPC: Evolved Packet Core**
- **LTE: Long Term Evolution**
- **LTE-A: Long Term Evolution-Advanced**
- **MME: Mobility Management Entity**
- **MIMO: Multiple Input Multiple Output**
- **PDSCH: Physical Downlink Shared Channel+**
- **PD-GW: Packet Data Network Gateway**
- **RN: Relays Node**
- **RSRP: Received Reference Signal Energy per Resource Element**
- **RSRQ: Reference Signal Received Quality**
- **RSSI: Received signal strength indicator**
- **RLC: Radio Link Control**
- **SPM: Standard Propagation Model**
- **SINR: Signal to Interference plus Noise Ratio**
- **CNIR: relación portadora-ruido e interferencia**
- **S-GW: Serving Gateway**
- **TDD: Time Division Duplex**
- **UL: Uplink**
- **3GPP: Third Generation Partnership Project**

## Índice de contenido

Capítulo I: Datos Generales.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos. ....	2
1.3 Justificación.....	3
Capítulo II: Conceptos Generales de LTE y LTE-Advanced. ....	4
2.1 Marco Teórico. ....	4
2.2 Diseño Metodológico. ....	20
2.3 Etapas del Diseño Metodológico. ....	21
2.4 Estructura del trabajo monográfico.....	22
Capitulo III. Análisis de las mediciones de campo previas y posteriores a la agregación de la tercera portadora en la red LTE-A. ....	24
3.1 Introducción del Capítulo III. ....	24
3.2 Los equipos utilizados para realizar un Drive Test son las siguientes:.....	25
3.3 Mediciones de Campo de los sitios. ....	26
3.4 Software de medición. Tems Investigation 22.3.6.....	29
3.5 Software de post proceso Tems Discovery 22.3.1.....	32
3.6 Drive Test Previo (LTE) – Posterior (LTE-A). ....	33
3.7 Interferencia Inter frecuencia .....	45
Capítulo IV. Análisis del Throughput en la red LTE-Advanced desplegada.....	48
4.1 Introducción del Capítulo IV.....	48
4.2 Análisis de los distintos parámetros en LTE y LTE-A.....	49
Capitulo V. Planificación de la red de LTE-A en la herramienta de simulación ATOLL. ....	58
5.1 Introducción del Capítulo V.....	58
5.2 Método para la planificación de la red LTE – A.....	59
5.3 Despliegue de los sitios de la red LTE-A:.....	59
5.4 Análisis detallado del área de cobertura y calidad de la red LTE-A.....	62
5.4 Elección del software ATOLL® como herramienta de trabajo. ....	62
5.5 Configuración de la herramienta ATOLL®. ....	63

5.6 Elección del modelo de propagación SPM.....	69
5.7 Características del Modelo de propagación – SPM. ....	69
5.7 Algoritmo de calibración del Modelo de propagación estándar - SPM con el módulo CW Measurement de ATOLL®.....	71
5.8 Calibración del Modelo de propagación estándar – SPM. ....	72
5.6 Optimización de la red LTE – A con la herramienta ATOLL®.....	82
5.7 Predicciones de cobertura por nivel de señal:.....	84
5.8 Predicciones por Overlapping Zone. ....	88
5.9 Predicciones de Calidad de la señal.....	93
5.10 Simulaciones de Monte Carlo.....	93
5.11 Datos obtenidos a partir de las Cargas de Tráfico en las simulaciones de Monte Carlo.....	101
5.12 Predicciones de los parámetros en una red LTE-A con la herramienta ATOLL.....	105
Capítulo VI. Estudio comparativo de una red LTE-A a partir de los resultados obtenidos de las mediciones de campos previas y posteriores versus las simulaciones de Monte Carlo mediante la herramienta ATOLL ®. ....	122
6.1 Introducción del Capítulo IV.....	122
6.2 Análisis de los distintos parámetros en la simulación LTE-A. ....	123
6.3 Análisis comparativo de las mediciones de campo y simulaciones .....	125
7. Conclusiones.....	129
8. Recomendaciones.....	131
9. Referencias bibliográficas .....	132
10. Anexos.....	136

## Índice de Figuras

Figura 1. Arquitectura de LTE. ....	5
Figura 2. Long Terminal Evolution Advanced. ....	7
Figura 3. Carrier Aggregation.....	8
Figura 4. Agregación de portadoras – Alternativas intra e inter-banda [7]. ....	9
Figura 5. MIMO 2X2 y 4X4 (Multiple Input Multiple Output) [8]. ....	9
Figura 6. Relay Node (RN).....	10
Figura 7. Ejemplo de Coordinated Multi-point Transmission [9]. ....	11
Figura 8. Esquemas de reuso de frecuencias en LTE implementados a través de una estrategia ICIC. ....	12
Figura 9. Azimuth. ....	13
Figura 10. Physical Cell Id.....	13
Figura 11. Ruta de mediciones Outdoor. ....	19
Figura 12. Diagrama de flujo. ....	21
Figura 13. Equipos de drive test. ....	25
Figura 14. GPS BU353S4. ....	28
Figura 15. Tems Investigation 22.3.6.....	30
Figura 16. Creación de scripts en Tems Investigation.....	31
Figura 17. Tems Discovery 22.1.3 .....	32
Figura 18. Sitios del clúster. ....	33
Figura 19. Ruta del clúster. ....	33
Figura 20. Bandas de la red LTE. ....	34
Figura 21. Bandas de la red LTE-A.....	34
Figura 22. PDSCH Phy Throughput Pre. ....	35
Figura 23. PDSCH Phy Throughput Post. ....	36
Figura 24. Serving Cell RSRP LTE Pre. ....	37
Figura 25. Serving Cell RSRP Post. ....	38
Figura 26. Serving Cell RSRQ LTE Pre.....	38
Figura 27. Serving Cell RSRQ LTE Post. ....	39
Figura 28. Serving Cell SINR LTE Pre.....	40

Figura 29. Serving Cell SINR LTE Post. ....	41
Figura 30. CQI LTE Pre.....	42
Figura 31. CQI LTE Post. ....	42
Figura 32. Esquema de modulación Pre.....	43
Figura 33. Esquema de modulación Post. ....	44
Figura 34. Drive Test.....	45
Figura 35. RS SINR Carrier LTE-A. ....	46
Figura 36. RS SINR Carrier 1 y 2.....	47
Figura 37. Throughput vs RSRP PRE.....	49
Figura 38. Throughput vs RSRP Post.....	50
Figura 39. Throughput vs RSRQ PRE. ....	51
Figura 40. Throughput vs RSRQ Post. ....	51
Figura 41. Throughput vs SINR PRE.....	52
Figura 42. Throughput vs SINR POST.....	52
Figura 43. Throughput vs RS SINR CARRIER. ....	53
Figura 44. Modulación LTE Pre – Post. ....	56
Figura 45. Ubicación de sitios en Google Earth.....	61
Figura 46. Creación de nuevo proyecto en ATOLL®.....	64
Figura 47. Mapa de Nicaragua.....	64
Figura 48. Ubicación de sitios en ATOLL®.....	65
Figura 49. Asignación de vecinas para sitios.....	68
Figura 50. Filtrado de mediciones.....	73
Figura 51. Creación de mediciones. ....	74
Figura 52. Selección de mediciones a utilizar para la calibración. ....	75
Figura 53. Selección de constantes a calibrar. ....	75
Figura 54. Calibración automática del SPM.....	76
Figura 55. Predicciones por Nivel de señal global: (A) SPM sin calibrar. ....	80
Figura 56. Predicciones por Nivel de señal global: (B) SPM calibrado. ....	80
Figura 57. Histogramas de los niveles de señal: (A) SPM sin calibrar.....	81
Figura 58. Histogramas de los niveles de señal: (B) SPM calibrado.....	81
Figura 59. Computation Zone de la red LTE-A. ....	84

Figura 60. Predicción Cobertura por nivel de señal; (A) Antes de la optimización. .....	85
Figura 61. Predicción Cobertura por nivel de señal; (B) Después de la optimización. ....	85
Figura 62. Histograma de predicción de cobertura por nivel de señal: (A) Antes de la optimización. ....	86
Figura 63. Histograma de predicción de cobertura por nivel de señal (B) Después de la optimización. ....	87
Figura 64. Overlapping Zone: (A) Antes de la optimización. ....	89
Figura 65. Overlapping Zone: (B) Después de la optimización. ....	89
Figura 66. Histograma de predicción Overlapping Zones (DL); (A) Antes de la optimización. ....	90
Figura 67. Histograma de predicción Overlapping Zones (DL); (B) Después de la optimización. ....	90
Figura 68. Predicción por Transmisor (DL): (A) Antes de la optimización.....	92
Figura 69. Predicción por Transmisor (DL): (B) Después de la optimización.	92
Figura 70. Elección del Mapa tráfico.....	94
Figura 71. Propiedades del Sector Traffic Map. ....	95
Figura 72. Mapa del sector de tráfico del área de cobertura en la ciudad de Managua. ....	96
Figura 73. Creación de las simulaciones de Monte Carlos. ....	97
Figura 74. Propiedades de las simulaciones en Monte Carlos – General.....	98
Figura 75. Propiedades de las simulaciones en Monte Carlos – Traffic. ....	99
Figura 76. Propiedades de las simulaciones en Monte Carlos – Advanced. ....	100
Figura 77. Proceso de ejecución de las simulaciones de Monte Carlo. ....	101
Figura 78. Predicciones de niveles RSRP. ....	106
Figura 79. Histograma de niveles de RSRP. ....	106
Figura 80. Predicciones de RSRQ: A) Tráfico 50%.....	108
Figura 81. Predicciones de RSRQ: B) Tráfico 70%. ....	108
Figura 82. Predicciones de RSRQ: C) Tráfico 100%.....	109
Figura 83. Histograma de predicciones de RSRQ: A) Tráfico 50%.....	110

Figura 84. Histograma de predicciones de RSRQ: B) Tráfico 70%.....	110
Figura 85. Histograma de predicciones de RSRQ: C) Tráfico 100%. ....	111
Figura 86. Predicciones de CINR: A) Tráfico 50%.....	112
Figura 87. Predicciones de CINR: B) Tráfico 70%.....	113
Figura 88. Predicciones de CINR: C) Tráfico 100%. ....	113
Figura 89. Histograma de predicciones de CINR: A) Tráfico 50%. ....	114
Figura 90. Histograma de predicciones de CINR: B) Tráfico 70%. ....	115
Figura 91. Histograma de predicciones de CINR: C) Tráfico 100%. ....	115
Figura 92. A) Cobertura de Throughput: 50% de tráfico.....	117
Figura 93. B) Cobertura de Throughput: 70% de tráfico.....	117
Figura 94. C) Cobertura de Throughput: 100% de tráfico. ....	118
Figura 95. Histogramas de predicciones de Throughput DL: A) Tráfico 50%. ... .....	118
Figura 96. Histogramas de predicciones de Throughput DL: B) Tráfico 70%. ... .....	119
Figura 97. Histogramas de predicciones de Throughput DL: C) Tráfico 100%. .. .....	120
Figura 98. Throughput vs RSRP. ....	123
Figura 99. Throughput vs RSRQ.....	124
Figura 100. Throughput vs CINR. ....	124
Figura 101. Tilt Mecánico. ....	136
Figura 102. Tilt Eléctrico.....	136
Figura 103. Mediciones de campos con equipos de medición. ....	137

## Índice de Tablas

Tabla 1. Rango de los principales parámetros de LTE.....	15
Tabla 2. Especificaciones del SPM.....	17
Tabla 3. Especificaciones Note 9 SM-N9600. ....	27
Tabla 4. Especificaciones S9+ SM-G965U1.....	27
Tabla 5. Especificaciones de laptop.....	29
Tabla 6. Datos estadísticos Throughput de mediciones PRE. ....	53
Tabla 7. Datos estadísticos Throughput de mediciones POST.....	54
Tabla 8. Datos de modulación DT PRE – POST. ....	56
Tabla 9. Ejemplo de Site Survey.....	60
Tabla 10. Parámetros de los sitios en las bandas 700, 1900 y 2100 MHZ. ...	61
Tabla 11. Configuración de la tabla sites en ATOLL®.....	65
Tabla 12. Configuración de los parámetros de los transmisores en ATOLL®. ... .....	66
Tabla 13. Configuración de la tabla Cell en ATOLL®.....	67
Tabla 14. Rango de los valores de K.....	71
Tabla 15. Comparación de los valores de “K” con el SPM por default y con el SPM calibrado.....	77
Tabla 16. Comparación antes y después de la calibración para el Mean Error Global y la desviación estándar global. ....	77
Tabla 17. Comparación de las pérdidas del Clutter.....	79
Tabla 18. Comparación de resultados SPM no calibrado y SPM calibrado...	82
Tabla 19. Comparación de resultados de las predicciones de cobertura por nivel de señal: (A) antes de la optimización, (B) después de la optimización.	88
Tabla 20. Comparación de resultados de las predicciones de Overlapping Zone: (A) antes de la optimización, (B) después de la optimización.....	91
Tabla 21. Datos obtenidos de las simulaciones de Monte Carlo con una carga de tráfico del 50% por sitios. ....	102
Tabla 22. Datos obtenidos de las simulaciones de Monte Carlo con una carga de tráfico del 70% por sitios. ....	103

Tabla 23. Datos obtenidos de las simulaciones de Monte Carlo con una carga de tráfico del 100% por sitios.....	104
Tabla 24. Rango de valores de niveles RSRP.....	107
Tabla 25. Rango de valores de RSRQ: A) Tráfico 50% B) Tráfico 70% C) Tráfico 100%.....	112
Tabla 26. Rango de valores de CINR: A) Tráfico 50% B) Tráfico 70% C) Tráfico 100%.....	116
Tabla 27. Rango de valores de Throughput DL: A) Tráfico 50% B) Tráfico 70% C) Tráfico 100%.....	121
Tabla 28. Comparativos niveles RSRP: Mediciones de campo y simulaciones de Monte Carlo en ATOLL®.....	126
Tabla 29. Comparativos niveles RSRQ: Mediciones de campo y simulaciones de Monte Carlo en ATOLL®.....	127
Tabla 30. Comparativos niveles CINR: Mediciones de campo y simulaciones de Monte Carlo en ATOLL®.....	127
Tabla 31. Comparativos niveles Throughput: Mediciones de campo y simulaciones de Monte Carlo en ATOLL®.....	128

## Capítulo I: Datos Generales.

### 1.1 Introducción.

La tecnología móvil avanza rápidamente debido a los requerimientos de los usuarios de la telefonía móvil que demandan mayor velocidad de datos. LTE-Advanced introduce la tecnología de agregación de portadoras, que se está estandarizando en 3GPP como parte de la versión 10 de LTE. LTE-Advanced pueden admitir tasas de datos máximas para usuarios móviles, hasta 1 Gb/s para DL y 500 Mbit/s para UL dentro de un ancho de banda de 100 MHz.

La agregación de portadora es atractiva para los operadores por que les permite desplegar un sistema con un ancho de banda extendido, a través de la agregación varias portadoras de componentes al tiempo que proporciona compatibilidad con versiones anteriores. Actualmente se realiza el despliegue de la tecnología LTE- A en zonas de alto tráfico en Nicaragua para cubrir la demanda de mayor velocidad de datos en la descarga de parte de usuarios existentes en las actuales redes LTE. La presencia de la interferencia en los proyectos de agregación de portadora es el principal obstáculo para alcanzar las velocidades esperadas en la tecnología LTE A. En el presente trabajo monográfico se realizó un estudio comparativo de los niveles de interferencias antes y después de la implementación de la tercera portadora para realizar propuesta de solución a través de simulaciones para mejorar el desempeño del Throughput de DL.

Se realizo la calibración del modelo de propagación estándar (Standard Propagation Model - SPM) mediante la simulación para una red LTE-A de un clúster de la ciudad de Managua la cual se encuentra desplegada en la banda B2, B4 y B28 FDD. La calibración SPM se realizará para análisis de la red LTE-A y poder realizar predicciones para mejorar el desempeño de la red tomando como principal propósito el desempeño de Throughput.

## 1.2 Objetivos.

### Objetivo General

- ❖ Realizar análisis y evaluación de la interferencia entre portadoras de componentes en LTE-A en la ciudad de Managua para proponer estrategias de optimización en las zonas con alto niveles de interferencia para mejorar el Throughput en la descarga de datos.

### Objetivo Específicos

- ❖ Ejecutar mediciones de campo previo y posterior de una red LTE-A Inter frecuencia para evaluar los niveles de interferencia en un clúster de alto tráfico de la ciudad de Managua.
- ❖ Realizar un estudio comparativo de las mediciones de campo de una red LTE y de la red LTE-A para analizar el desempeño de intensidad, calidad e interferencia (RSRP, RSRQ y SINR) y de la velocidad de datos mediante el parámetro de Down link Throughput en un clúster de la ciudad de Managua.
- ❖ Implementar escenarios de simulaciones intra-frecuencia a través de predicciones en ATOLL de una red LTE-A para analizar el desempeño de intensidad, calidad e interferencia (RSRP, RSRQ y SINR) y de la velocidad de datos mediante el parámetro de Downlink Throughput en un clúster de alto tráfico de la ciudad de Managua.
- ❖ Efectuar un estudio comparativo de una red LTE-A Intra frecuencia e Inter frecuencia para analizar el desempeño de intensidad, calidad e interferencia (RSRP, RSRQ y SINR) y de la velocidad de datos mediante el parámetro de Downlink Throughput en un clúster de la ciudad de Managua.

### 1.3 Justificación.

La red LTE se encuentra desplegada por un operador en la ciudad de Managua en la banda de frecuencia 700 MHz y 1900 MHz para satisfacer a la mayor cantidad de usuarios en la parte de tráfico de datos (Throughput). La cantidad de usuarios incrementa poco a poco surgiendo así la necesidad de incrementar otra portadora en la red LTE y calibrar esta red con el modelo SPM. Al optar por una tercera portadora en una banda de frecuencia 2100 MHz (AWS) se puede realizar la combinación de 2 a 3 bandas lo que llamaríamos CA (Carrier Aggregation). El propósito por la cual se calibró el modelo SPM es el uso de predicciones y simulaciones a lo largo del proceso de planificación y optimización de la red en ATOLL. Se realizaron análisis de Throughput en la red LTE-A para obtener predicciones de Throughput con velocidades reales y realizar una comparación con la red actual LTE.

## Capítulo II: Conceptos Generales de LTE y LTE-Advanced.

### 2.1 Marco Teórico.

“La tecnología móvil ha tomado mucho impulso desde la evolución de 1G análogo a GSM digital en 1980, así ha seguido creciendo a un ritmo acelerado GPRS, EDGE, UMTS, HSDPA, LTE Y LTE-A. Estas tecnologías promueven el desarrollo de servicios de ancho de banda móvil otorgando altas tasas de datos, bajas latencias y mayor capacidad”.

#### LTE (Long Term Evolution).

Es el seguimiento y la evolución de la interfaz aérea 3GPP UMTS (UTRA evolucionada) y su red de acceso de radio asociada (UTRAN evolucionada). LTE ofrece velocidades de datos máximas aún más altas con una latencia reducida. LTE es una tecnología de acceso por radio completamente optimizada para paquetes. LTE mejora la eficiencia espectral, lo que permite un gran aumento en la capacidad del sistema y un costo reducido por gigabyte. LTE es una red completamente IP y está diseñada para cumplir los requisitos de datos con tasa de hasta 150 Mbps en el enlace descendente, 75 Mbps en el enlace ascendente, ancho de banda escalable de 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20 MHz, FDD (Frequency Division Duplex) y TDD (Time Division Duplex) [1], su arquitectura la veremos a continuación en la figura 1.

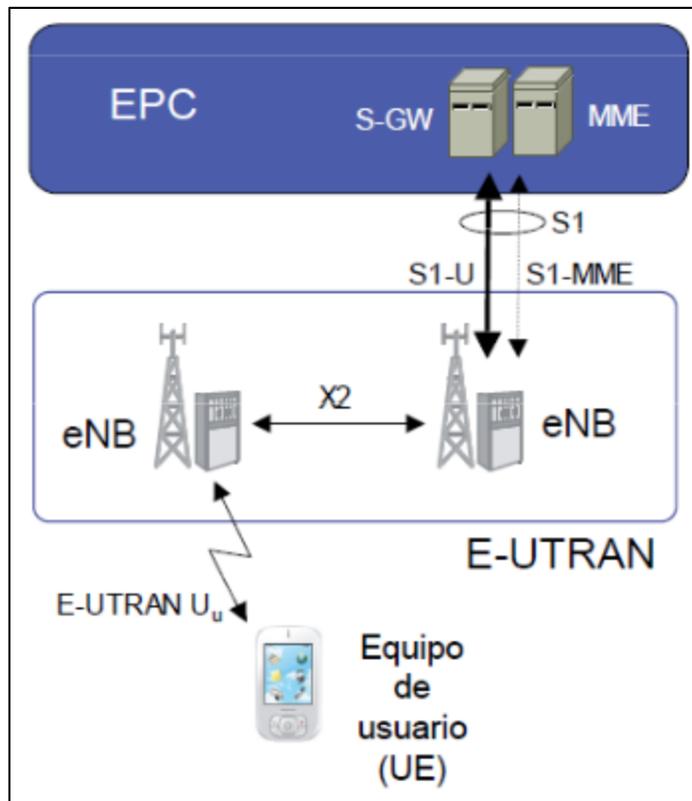


Figura 1. Arquitectura de LTE [2].

#### Componentes de la E-UTRAN (Evolved Terrestrial Radio Access Network):

- **ENode B:** El eNodeB es el componente de la estación base de la red LTE que provee la cobertura para los usuarios de banda ancha móvil [2].
- **Uu:** Permite la transferencia de información por el canal radio entre el eNodeB y los equipos de usuario [3].
- **X2:** Es el interfaz de la interconexión de los eNBs [3].
- **S1 – MME:** Es responsable de entregar protocolos de señalización entre eNodeB y MME [4].

## **Componentes del EPC (Evolved Packet Core):**

**S-GW (Serving Gateway):** Mediante la interfaz S1-U, el eNodeB se comunica con otra entidad de red encargada de procesar el plano de usuario (dicha entidad de red de la EPC se denomina Serving Gateway, S-GW) [2].

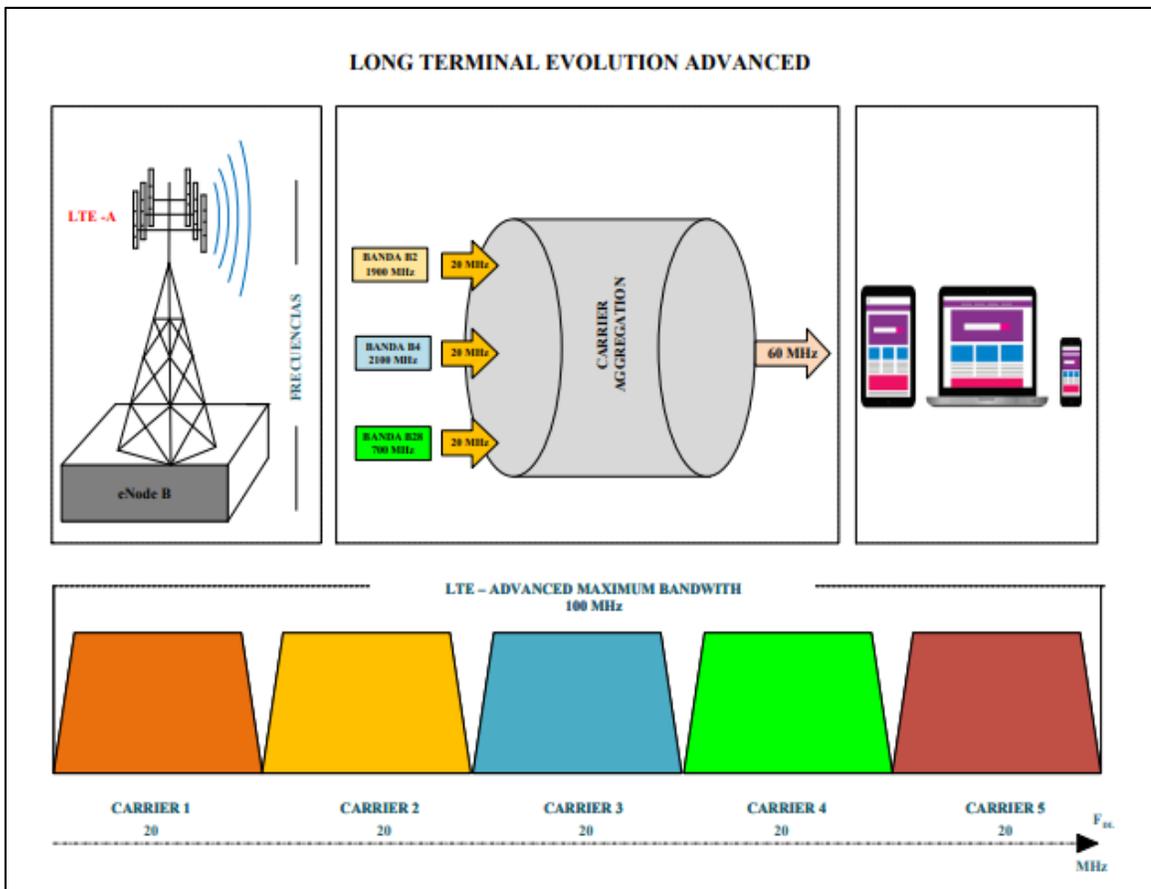
**MME (entidad de gestión de movilidad):** LTE MME es responsable de iniciar la búsqueda y la autenticación del dispositivo móvil. MME retiene la información de ubicación en el nivel del área de seguimiento para cada usuario y luego selecciona la puerta de enlace apropiada durante el proceso de registro inicial. MME se conecta al nodo evolucionado b (eNB) a través de la interfaz S1-MME y se conecta a S-GW a través de la interfaz S11 [5].

**P-GW (Packet Data Network Gateway):** El P-GW actúa como la interfaz entre la red 3GPP2 Evolución de la arquitectura del sistema de evolución a largo plazo (LTE-SAE) y otras redes de paquetes de datos, como Internet, las redes de subsistema multimedia IP (IMS) basadas en SIP y la alta velocidad evolucionada Redes de datos inalámbricas de paquetes de datos (eHRPD) [6].

## **LTE-A (Long Terminal Evolution Advanced).**

En el reléase 10, LTE-A se centra en una mayor capacidad, proporciona tasas de bits más altas para cumplir completamente con los requisitos establecidos por la ITU para IMT Advanced.

Las principales nuevas funcionalidades introducidas en LTE-Advanced son Carrier Aggregation (CA), el uso mejorado de técnicas de antenas múltiples y soporte para nodos de relé (RN).

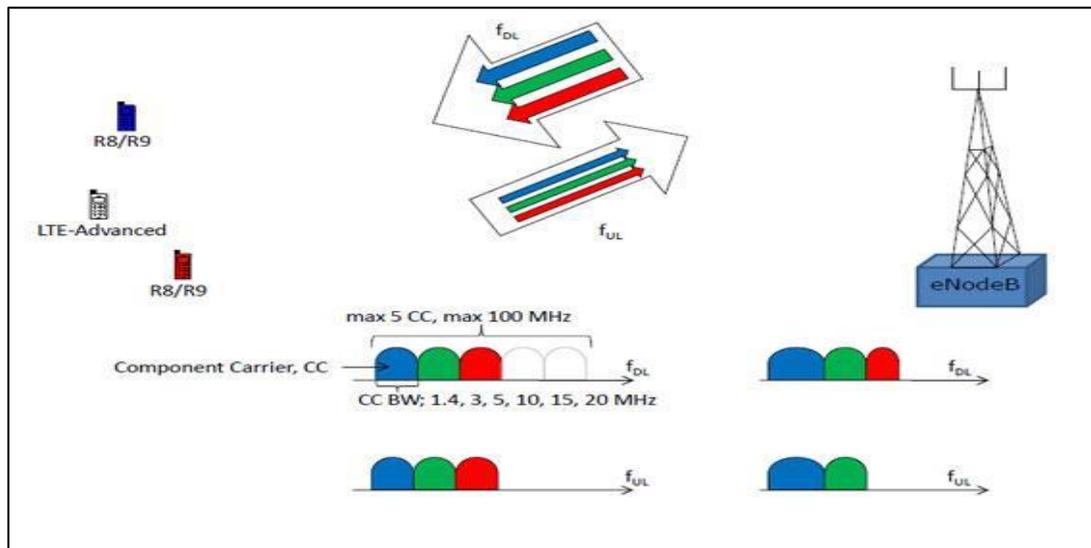


**Figura 2. Long Terminal Evolution Advanced.**

### **Carrier Aggregation.**

Una de las formas más sencilla para aumentar la capacidad es agregar más ancho de banda. Dada la importancia de mantener la compatibilidad de versiones de LTE (R8/R9), el aumento de ancho de banda en LTE-A se proporciona a través de agregación de portadoras. Cada una de las portadoras agregada se conoce como portador de componentes (CC).

Una portadora puede tener un ancho de banda de hasta 20 MHz y se puede agregar hasta cinco portadoras como máximo. Por lo tanto, el ancho de banda máximo es de 100 MHz. A los UE LTE se les pueden asignar recursos de uno de los CC, los CC pueden ser de diferentes anchos de banda, observar en la figura 3.

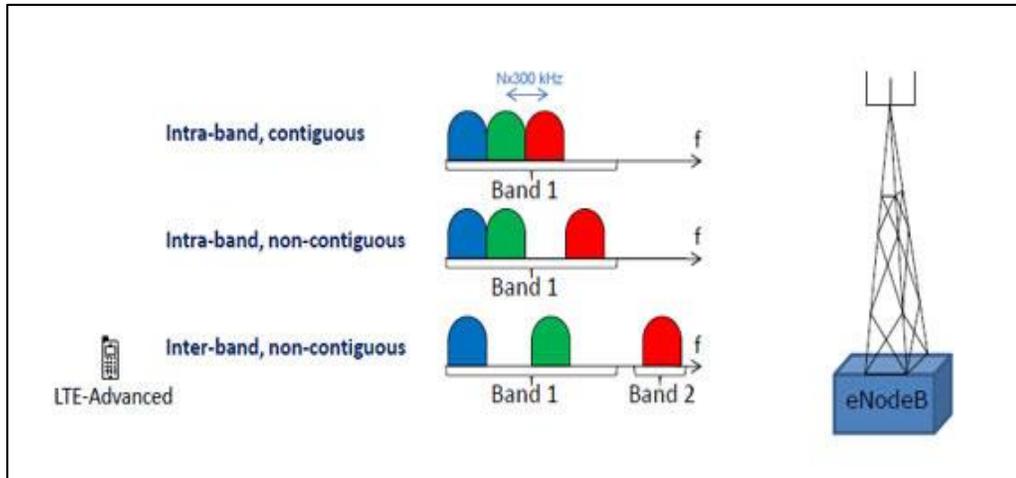


**Figura 3. Carrier Aggregation [7].**

Una de las formas para utilizar la agregación de portadoras es utilizando portadoras continuas dentro de la misma banda de frecuencia, llamada intra-banda contigua. Esto no siempre se cumple, debido a las asignaciones de frecuencias de cada operador [7].

En las asignaciones no contiguas también podrían ser intra-bandas, es decir que las portadoras componentes pertenecen a la misma banda de frecuencia, pero están separadas por una brecha de frecuencias.

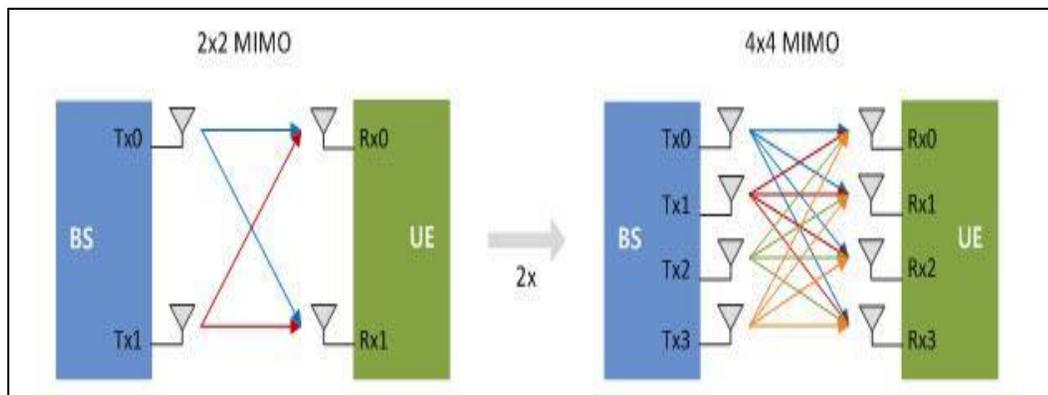
En el caso de las asignaciones entre bandas de frecuencias, las portadoras de componentes pertenecen a diferentes bandas de frecuencias, como se observan en figura 4. El espacio entre las frecuencias centrales de dos portadoras contiguas es  $N \times 300$  kHz. N es un número natural.



**Figura 4. Agregación de portadoras – Alternativas intra e inter-banda [7].**

### **MIMO (Multiple Input Multiple Output).**

MIMO utiliza múltiples antenas en el transmisor y el receptor para mejorar la calidad de señal y aumentar las tasas de bits para los usuarios. Utilizando los mismos recursos tanto en frecuencia como en tiempo, separados solo mediante el uso de diferentes señales de referencia, para ser recibidos por dos o más antenas [7], ver figura 5.



**Figura 5. MIMO 2X2 y 4X4 (Multiple Input Multiple Output) [8].**

## Relay Nodes.

Los nodos de retransmisión (RN) son estaciones bases de baja potencia que mejoran la cobertura y la capacidad en los bordes de celdas. Amplifican y retransmiten las señales de enlaces descendentes y ascendentes.

El nodo de retransmisión está conectado al eNB donante (DeNB) a través de una interfaz radio, Un, que es una modificación de la interfaz aérea E-UTRAN UU. Por lo tanto, en la célula donante los recursos de radio se comparten entre las UE servidas directamente por el DeNB y los nodos de retransmisión. Cuando UU. y un utilizan frecuencias diferentes, el nodo de relé se denomina RN de tipo 1a, para el tipo 1 RN UU. y Un utilizan las mismas frecuencias, ver figura 6.

En este último caso existe un alto riesgo de auto interferencia en el Nodo de Relé, al recibir en UU. y transmitir en Un al mismo tiempo (o viceversa). Esto se puede evitar compartiendo el tiempo entre UU. y Un, o teniendo diferentes ubicaciones del transmisor y el receptor. El RN apoyará en gran medida las mismas funcionalidades que el eNB, sin embargo, el DeNB será responsable de la selección de MME [7].

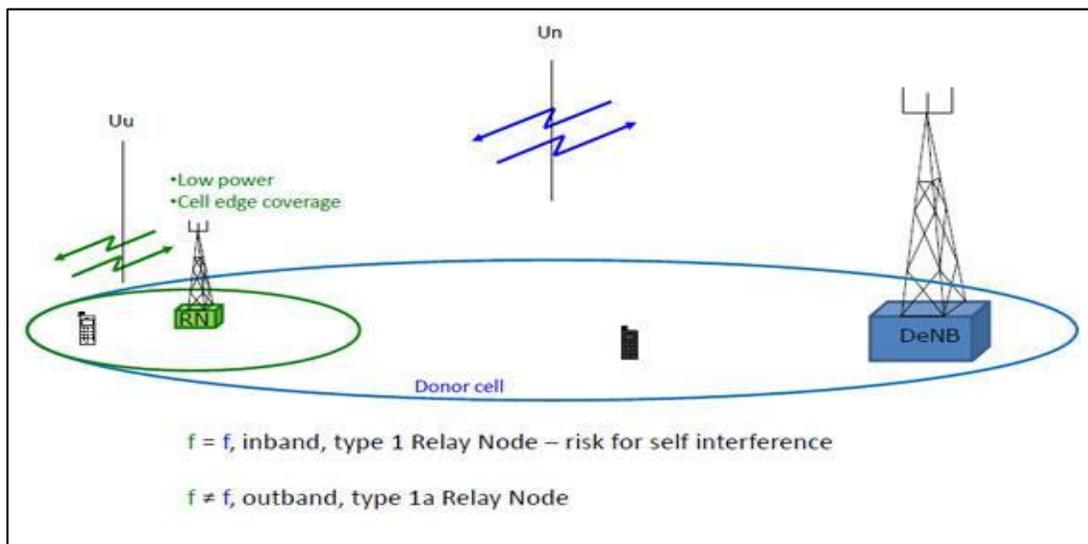


Figura 6. Relay Node (RN) [7].

## Coordinated Multipoint (CoMP).

En LTE-A, la operación multipunto coordina mejora el rendimiento de la red en las celdas bordes, con el procesamiento de banda base situada en un solo nodo, varios puntos Tx. brindan una transmisión coordinada en el DL, y varios puntos RX brindan una recepción coordinada en el UL. Un punto TX/RX consiste en un grupo de antenas TX/RX co-ubicados que brindan cobertura en el mismo sector [7].

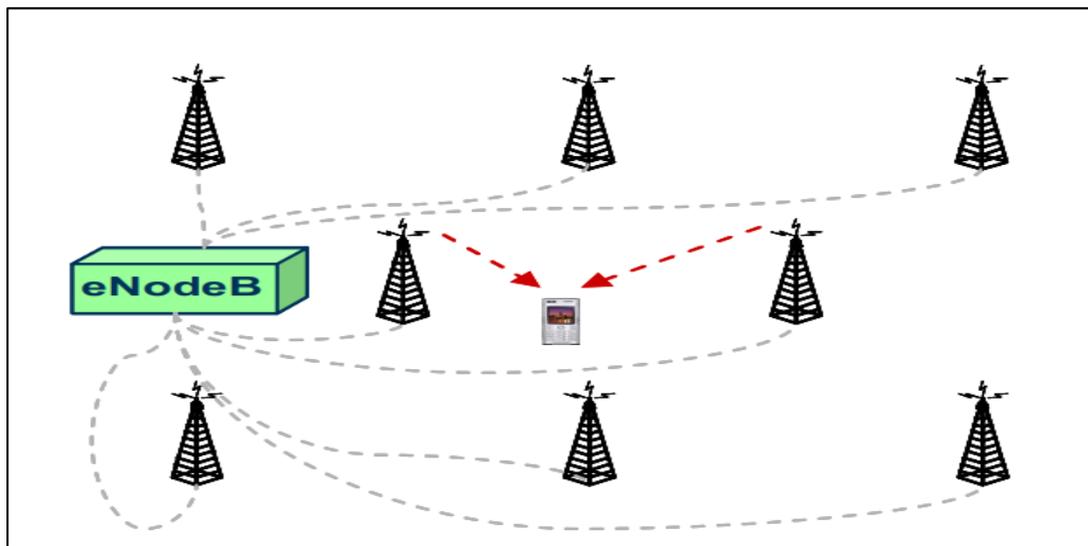
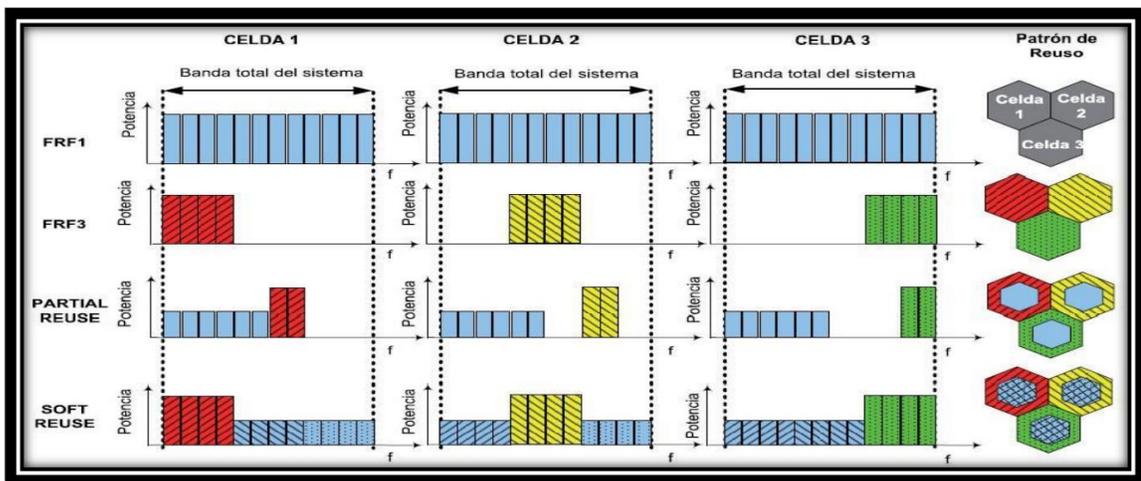


Figura 7. Ejemplo de Coordinated Multi-point Transmission [9].

## Reuso de frecuencia

La técnica de acceso de LTE proporciona ortogonalidad entre los usuarios de una misma celda en el enlace ascendente como descendente. Por este motivo en LTE la eficiencia espectral y tasas de transmisión se encuentran limitadas por las interferencias de celdas vecinas.

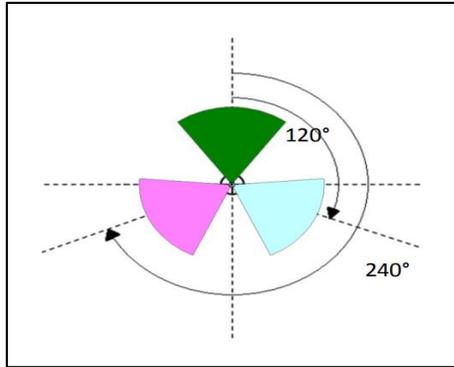
La coordinación de interferencias entre células (ICIC) es una tecnología integrada un grupo de funciones temporales por las cuales el nivel interferencia recibida por los usuarios en los bordes de la celda para corregir parámetros de calidad del servicio, especialmente su velocidad de transmisión. Esta técnica implica la aplicación de ciertas restricciones a las funciones horarias del área especificando la frecuencia, tanto de enlace ascendente como de enlace descendente que corresponden a diferentes sistemas de reutilización de frecuencia para uso interior y exterior de celdas.



**Figura 8. Esquemas de reuso de frecuencias en LTE implementados a través de una estrategia ICIC [10].**

### Azimuth.

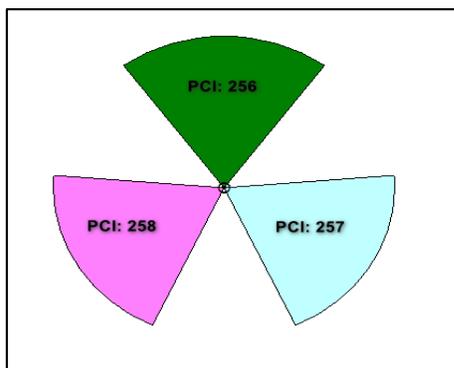
El azimuth es ángulo de orientación de una antena, desde su punto de ubicación hasta su objetivo de cobertura como se observa en la figura 9. Esta se mide en grados y se toma el Norte como punto de referencia para medir el ángulo donde se va a orientar.



**Figura 9. Azimuth.**

### **Physical Cell Id (PCI).**

Es un identificador de celda de forma única para identificar eNodeB. El valor de PCI se crea a partir de señales de sincronización primaria (PSS) y señales de sincronización secundarias (SSS), estas señales ayudan a la identificación de celdas por medio de algoritmos. Existen 504 PCI que van de 0 a 503 y son reutilizados en la red, la planificación de la reutilización, la estrategia de reutilización, las opciones, etc [11].



**Figura 10. Physical Cell Id.**

### **RSSI (received signal strength indicator).**

El RSSI corresponde a los valores de la intensidad de la señal recibida, es decir, es la potencia total obtenida por el UE en toda la banda de frecuencia, esto incluye las potencias principales, las señales no de servicio cocanal, las interferencias de canal adyacentes y ruido térmico en la banda de frecuencia especificada. El valor se mide en dBm.

### **RSRP (reference signal received power).**

El RSRP es la potencia promedio de la señal de referencia recibida en un ancho de banda específico (número de RE) desde una estación base. El valor se mide en dBm. Para la determinación de RSRP se utilizan las señales de referencias específicas de la celda R0 de acuerdo con la 3GPP 36.214. "Si el UE puede detectar de forma fiable que R1 está disponible, puede utilizar R1 además de R0 para determinar RSRP".

### **RSRQ (received reference signal quality).**

El RSRQ es un valor derivado del RSRP y RSSI, este proporciona información acerca la intensidad e interferencia de la señal deseada. La relación de dos valores de potencias diferentes hace que el RSRQ está en dB y el valor siempre es negativo (porque el valor RSSI siempre es mayor que  $N \times \text{RSRP}$ ).

"Como se define en 3GPP 36.214, RSRQ se define como  $(N \times \text{RSRP}) / \text{RSSI}$ , donde N indica el número de RB (bloques de recursos) sobre el ancho de banda medido" [12].

## SINR (signal/interference ratio plus noise).

El SINR puede ser la relación entre el nivel de la señal (señal deseada) y el nivel de ruido no deseado. El valor se mide en dB. Las señales no deseadas incluyen todo el externo y el ruido interno.

**Tabla 1. Rango de los principales parámetros de LTE [13].**

		RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SINR (dBm)
RF CONDITIONS	EXCELLENT	$\geq -80$	$\geq -10$	$\geq 20$
	GOOD	-80 to -90	-10 to -15	13 to -20
	MID CELL	-90 to -100	-15 to -20	0 to -13
	CELL EDGE	$\leq -100$	$< -20$	$\leq 0$

## Comprensión de la relación portadora-ruido e interferencia (CNIR)

CNIR es una medida de la fuerza de una señal deseada (la portadora) en relación con la fuerza combinada de las señales no deseadas (ruido e interferencia). Normalmente se expresa en decibelios (dB) y se puede calcular como la relación entre la potencia de la señal portadora y la potencia de las señales de ruido e interferencia. Un valor CNIR más alto indica una señal de mejor calidad, lo que se traduce en un mejor rendimiento del sistema de comunicación. Esto se debe a que una señal portadora más fuerte en relación con el ruido y la interferencia permite una transmisión de datos más precisa y eficiente, garantiza que los datos transmitidos puedan recibirse y decodificarse con precisión, incluso en presencia de ruido e interferencias de otras fuentes lo que en última instancia conduce a una mejor experiencia del usuario [14].

## **Software ATOLL®.**

Es una herramienta de diseño y optimización de redes inalámbricas para múltiples tecnologías, incluye capacidades avanzadas de diseño de red multi-RAT de una sola RAN para tecnologías de acceso de radio 3GPP y 3GPP2, incluidas 5G NR, LTE, NB-IoT, UMTS, GSM y CDMA.

## **Modelado RAN multi-RAT.**

El Software ATOLL® planifica y optimiza radio de multitecnología que incluye modelos de tráfico multitecnológicos unificados, simulador de Monte Carlo y planificación automática de celdas (ACP) [12]. Monte Carlo es un método número lo cual permite resolver problemas físicos y matemáticos mediante la simulación de variables aleatorias, su técnica cuantitativa hace uso de las estadísticas para imitar el comportamiento aleatorio de los sistemas reales no dinámico. ATOLL® puede modelar los aspectos relacionados con el tráfico de las redes multitecnológicas y distribuir dinámicamente el tráfico a través de capas de red 2G, 3G, 4G y 5G que comprenden macro, micro, celdas pequeñas y puntos calientes Wi-Fi [15].

## **Modelo de propagación estándar (SPM).**

Los modelos de propagación se utilizan para estimar las pérdidas de señal en el medio de propagación que se ven afectadas por múltiples obstáculos, ya sean en zonas urbanas, suburbanas y rural. En la siguiente figura se muestran las especificaciones del SPM.

**Tabla 2. Especificaciones del SPM [16].**

<b>Model</b>	<b>Frequency Range</b>	<b>Geo Data Taken into Account</b>	<b>Recommended Use</b>
Standard Propagation Model  (Automatic calibration available)	150 – 3500 MHz	Terrain profile  Statistical clutter	1 < d < 20 km  GSM, UMTS, CDMA2000, WiMAX, LTE, Wi-Fi

### **Drive Test (Mediciones de campo).**

El Drive Test es la recopilación de datos efectuado en las redes celulares, independientemente su tecnología (GSM, WCDMA, LTE, etc....) mediante un software que tiene la capacidad de grabar todos los parámetros y señalización que un teléfono o más dispositivos estén interactuado con el software, existe dos tipos de Drive Test: Indoor (interiores) y Outdoor (exteriores) [17].

### **Post Proceso**

Esta es la actividad que se realiza después de un Drive Test haciendo uso del Software de Drive Test, con el fin de analizar los datos recolectados en el campo y poder hacer un reporte donde se detalle e identificar eventos que causan las degradaciones de los niveles de cobertura y calidad de la red celular [18].

### **Tems Investigation.**

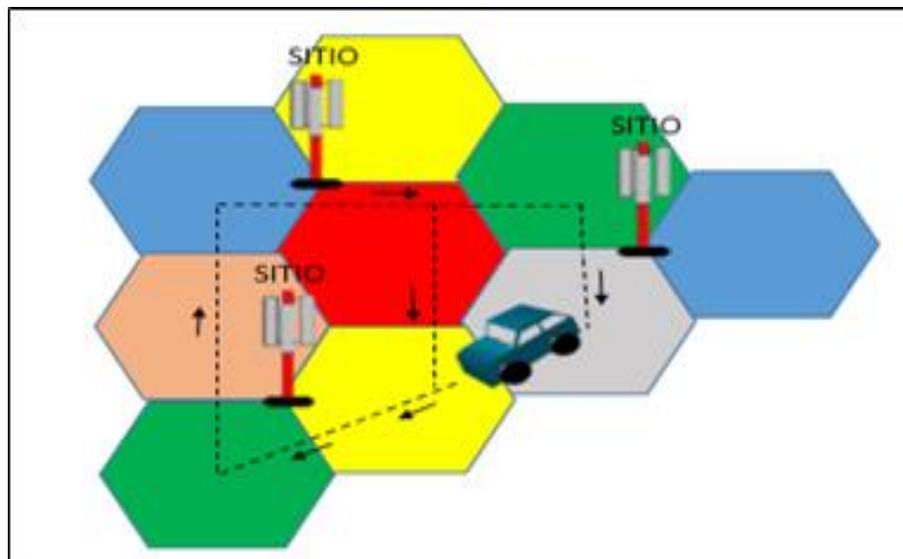
Es un Software que permite comprender mejor la experiencia del cliente y verificar, optimizar y solucionar problemas de la red móvil. Nos brinda la información para optimizar la experiencia del suscriptor en diferentes tecnologías como 2G, 3G y LTE. Tems Investigation ayuda a evaluar en tiempo real el rendimiento de la red realizando mediciones de calidad de llamadas, datos entre otros.

### **Tems Discovery.**

Es un Software que se utiliza para analizar y optimizar la red mediante los datos recolectados del Drive Test. Nos brinda información necesaria para resolver rápidamente los problemas que surgen en la red para mejorar la experiencia del suscriptor en diferentes tecnologías como 2G, 3G y LTE [18].

### **Red Outdoor.**

Outdoor significa literalmente fuera de la puerta, lo que se puede entender como exterior. Este tipo de mediciones se hacen en las calles por las cuales se hace un recorrido siguiendo una ruta recolectando datos de los niveles de cobertura y calidad [19].



**Figura 11. Ruta de mediciones Outdoor [20].**

### **Red Indoor.**

Indoor significa literalmente dentro de la puerta o sobre la puerta, lo que se puede entender como interior. Este tipo de mediciones se hacen dentro de edificios, casas, oficinas, bodegas etc. Con el fin de recolectar los datos de los niveles de cobertura y calidad [19].

## **2.2 Diseño Metodológico.**

Se empleo el procedimiento experimental, ya que el proyecto está conformado por un conjunto de procesos investigativos y mediciones de campos. En cuanto al enfoque que tendrá el presente trabajo monográfico, será de índole cuantitativo ya que se realizará un plan de acción para recolectar y procesar la información de los resultados obtenidos a través de la experimentación y las observaciones en el que se podrá analizar el desempeño del servicio en la red en función del comportamiento de la tecnología LTE - A.

Para el desarrollo de este trabajo monográfico lleva a cabo un conjunto de etapas las cuales permitirán paso a paso alcanzar los objetivos propuesto en el presente trabajo monográfico, siendo estas etapas las siguientes:

### 2.3 Etapas del Diseño Metodológico.

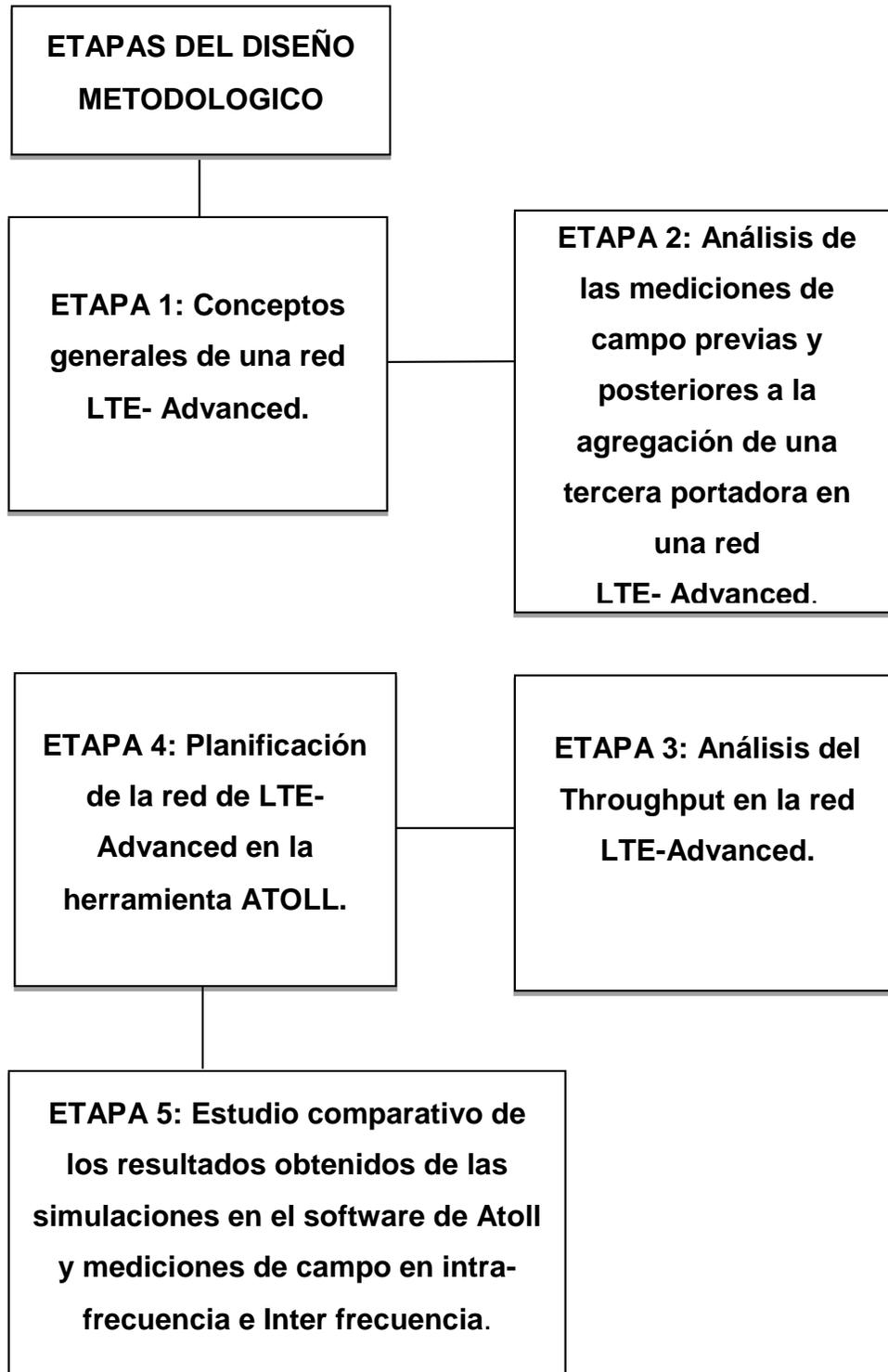


Figura 12. Diagrama de flujo.

## **2.4 Estructura del trabajo monográfico.**

El presente trabajo monográfico estará constituido por la elaboración de 6 capítulos con el propósito de abordar temas relacionados a Datos Generales del tema en estudio como capítulo I, Conceptos generales de LTE y LTE-Advanced como capítulo II, el Análisis de las mediciones de campo Previas y Posteriores a la agregación de la tercera portadora en la red LTE-Advanced, como el capítulo III, el Análisis del Throughput en la red LTE-Advanced desplegada como capítulo VI, la planificación de la red de LTE-A en la herramienta de simulación ATOLL® como capítulo V y el estudio comparativo de inter frecuencia e intra frecuencia de los resultados obtenidos de las simulaciones en ATOLL® y las mediciones de campo como capítulo VI.

En el capítulo 1: Se estará abordando la introducción, objetivos, y justificación de nuestro trabajo monográfico.

En el capítulo 2: Consistirá en explicar la parte teórica de los conceptos generales en una red LTE y LTE-A, que se deben de tomar en cuenta para el desarrollo de este trabajo monográfico tomando como referencias citas bibliográficas de documentos, libros, ensayos, y otras tesis relacionadas a la misma.

En el capítulo 3: Se basará en el Drive Test y el Post Proceso de la red LTE-Advanced en un clúster de 17 sitios en las bandas de frecuencias B2, B4 y B28 FDD, en la ciudad de Managua, realizando visitas a los sitios para realizar auditorías y la recolección de datos como Azimut, frecuencia de operación, alturas de las antenas, tipo de antena, Physical Cell ID entre otros, previo a la agregación de portadoras, analizando el comportamiento de interferencias a partir de los parámetros de SINR y CINR entre componentes de portadoras.

En el capítulo 4: Se introduce al análisis del Throughput en la red LTE-Advanced ya desplegada comparando los resultados obtenidos reales de las mediciones de campo previas y posteriores, evaluando el desempeño del Throughput (Down link), nivel de señal (RSRP), calidad de señal (RSRQ), la relación señal/interferencia y ruido (SINR) y la relación portadora-ruido e interferencia (CNIR), luego los datos serán importados en el Software de simulación ATOLL®.

En el capítulo 5: Posterior al análisis nos enfocamos en la planificación de la red de LTE-A en la herramienta ATOLL, a partir de los diferentes escenarios de simulaciones realizadas, se empleará la calibración del modelo de propagación estándar y la optimización de la red LTE-A evaluando al igual que el capítulo 3 los mismos parámetros mediante los resultados obtenidos.

En el capítulo 6: Se determina el estudio comparativo de Inter frecuencia e Intra-frecuencia de los resultados obtenidos de las simulaciones en ATOLL® y de las mediciones de campo previas y posterior en base a los parámetros de la red LTE-A para determinar cuál es el escenario que demuestra más interferencias en la red.

## Capítulo III. Análisis de las mediciones de campo previas y posteriores a la agregación de la tercera portadora en la red LTE-A.

### 3.1 Introducción del Capítulo III.

La realización de visitas a los sitios de telefonía móvil es muy importante debido a que nos permite conocer los datos tanto físicos como lógicos del sitio. Las visitas se pueden generar ya sea para validar, realizar ajustes físicos o ajustes lógicos. Se realiza una auditoría del sistema radiante que incluye los datos como; tilt eléctrico, tilt mecánico, azimuth, altura de la torre, altura de las antenas, modelo de antena y coordenadas. También se incluyen datos lógicos que se conocen mediante la realización de mediciones de campo mejor conocido como Drive Test; PCI, RSRP, RSRQ, SINR y Downlink Throughput, posterior a esto, se analizan en el post proceso los datos recolectados en las mediciones de campo. Así obteniendo estos datos se pudo realizar un análisis de un previo y de un posterior de la red LTE-A.

En este capítulo se describe el desarrollo que consiste en las visitas de los sitios y las mediciones de campo que nos permitirá conocer el estado de la red en base a si se producen interferencias Inter frecuencia en LTE-A a partir de la agregación de una nueva portadora

El Drive Test se realizó para verificar o valorar la red para realizar algún tipo de optimización ya sea físico o lógico de ser necesario. El Drive Test es un proceso de recolección de datos en tiempo real; datos de señalización y georreferencia mostrando los datos de cobertura de la red móvil mediante el software de Tems Investigation y dispositivos móviles, permite detectar en el campo el estado de la red móvil en una zona o área determinada [21]. Para la agregación de portadora a la red LTE en un clúster, se realiza un Drive Test Pre con el objetivo de tener datos de la red para realizar una comparación con el Drive Test Post.

### 3.2 Los equipos utilizados para realizar un Drive Test son las siguientes:

- Dos móviles con capacidad de soportar LTE-A para la agregación de portadora y realizar las mediciones; un móvil para pruebas downlink y otro para uplink. Se utilizó un GPS BU-353S4 para realizar el DT.
- Laptop con el software licenciado Tera Investigation 22.3.6 para la recolección de datos.
- Laptop con el software licenciado Tera Discovery 22.1.3 para el post procesamiento de los logs.
- Inversor de 5000Watts para convertir la señal DC del vehículo a señal AC para la energía de la laptop.

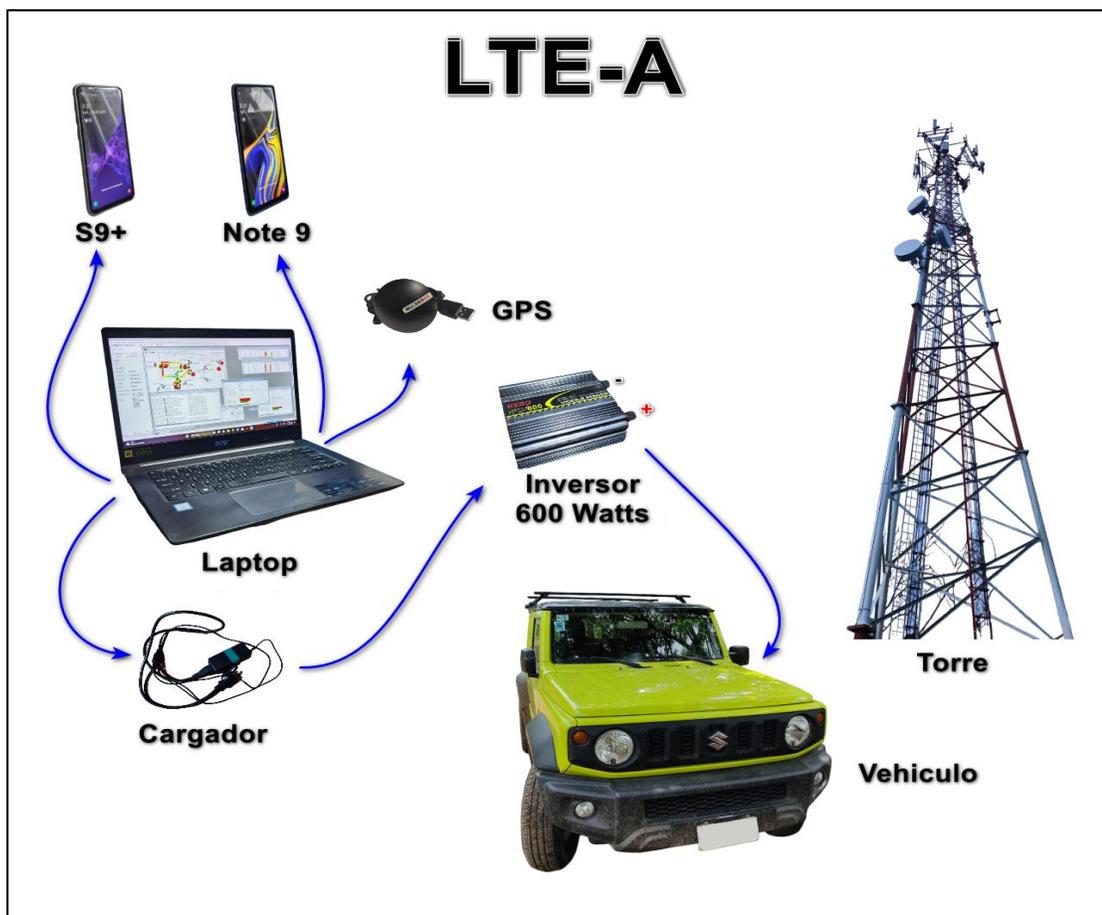


Figura 13. Equipos de drive test.

### **3.3 Mediciones de Campo de los sitios.**

En un clúster de 17 sitios en la ciudad de Managua se realiza una medición LTE con el propósito de recolectar datos de dicha red para luego realizar una comparación de la red LTE-A posterior. El motivo de realizar la comparación es analizar si existen mejoras en los KPI (RSRP, RSRQ, SINR y Throughput) de la nueva red LTE-A.

#### **Pasos por seguir para realizar el Drive Test:**

- Selección de equipos a utilizar
- Ruta del Clúster
- Tipo de medición
- Software RF
- Scripts
- Workspace

## Equipos por utilizar en el Drive Test:

### ❖ Terminales:

**Tabla 3. Especificaciones Note 9 SM-N9600 [22].**

Especificaciones Note 9 SM-N9600			
	Network	4G bands	1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 12, 13, 17, 18, 19, 20, 25, 26, 28, 34, 38, 39, 40, 41, 66
		Speed	HSPA 42.2/5.76 Mbps, LTE-A (5CA) Cat18 1200/200 Mbps
		Release	13

**Tabla 4. Especificaciones S9+ SM-G965U1 [23].**

Especificaciones S9+ SM-G965U1			
	Network	4G bands	1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 12, 13, 14, 17, 18, 19, 20, 25, 26, 28, 29, 30, 38, 39, 40, 41, 46, 66, 71
		Speed	LTE-A (6CA) Cat18 1200/200 Mbps
		Release	13

Los terminales por utilizar tienen que cumplir con los requerimientos para hacer uso de la herramienta de Drive Test y obtener la combinación de bandas de LTE-A. Para realizar la medición de descarga LTE y LTE-A utilizaremos equipos Samsung Note 9 y S9+ que se ubican en la categoría 18 reléase 13. En la tabla 3 y 4 muestra características generales de los dos modelos de Samsung.

## ❖ GPS

El GPS es un sistema de posicionamiento global que nos proporciona el registro de ubicación y además nos proporciona la geolocalización de los distintos datos recopilados del Drive Test [24]. El GPS que utilizamos se muestra en la figura 14.



**Figura 14. GPS BU353S4.**

## ❖ Laptop

Para la realización del drive test LTE y LTE-A se utilizó una laptop con el software de medición de radiofrecuencia Tems Investigation 22.3.6, las especificaciones de la laptop se encuentran en la Tabla 5:

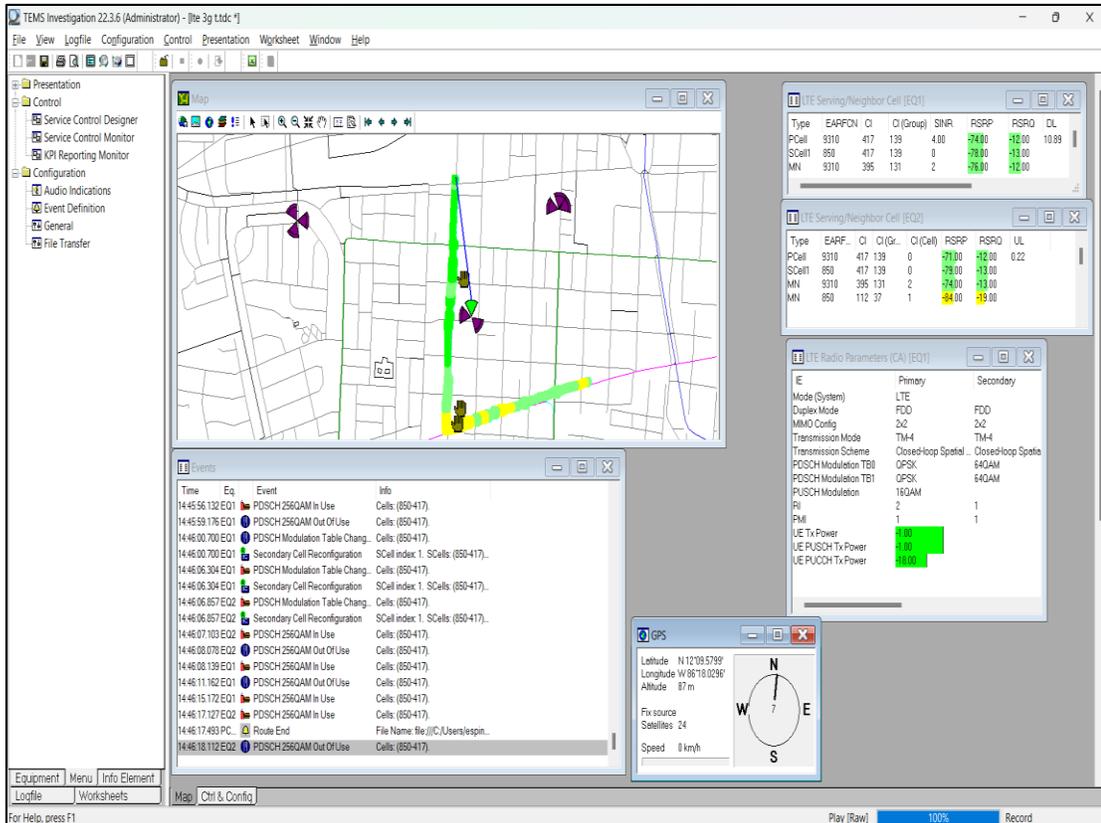
**Tabla 5. Especificaciones de laptop.**

Sistema operativo: Windows 11 Enterprise 64 bits (10.0, compilación 22000)
Idioma: español (configuración regional: español)
Fabricante del sistema: Acer
Modelo del sistema: Aspire A514-52
BIOS: V1.12
Procesador: Intel(R) Core(TM) i7-8565U CPU @ 1.80GHz (8 CPUs), ~2.0GHz
Memoria: 20480MB RAM
Archivo de paginación: 9400MB usados, 17037MB disponibles
Versión de DirectX: DirectX 12

Se utiliza una laptop con altos requerimientos por el tipo de mediciones que se realizan, el uso de scripts, los datos que se reciben de los terminales y por la cantidad de dispositivos que se conectan a la laptop, entre más pruebas realicemos, más recursos se utilizaran.

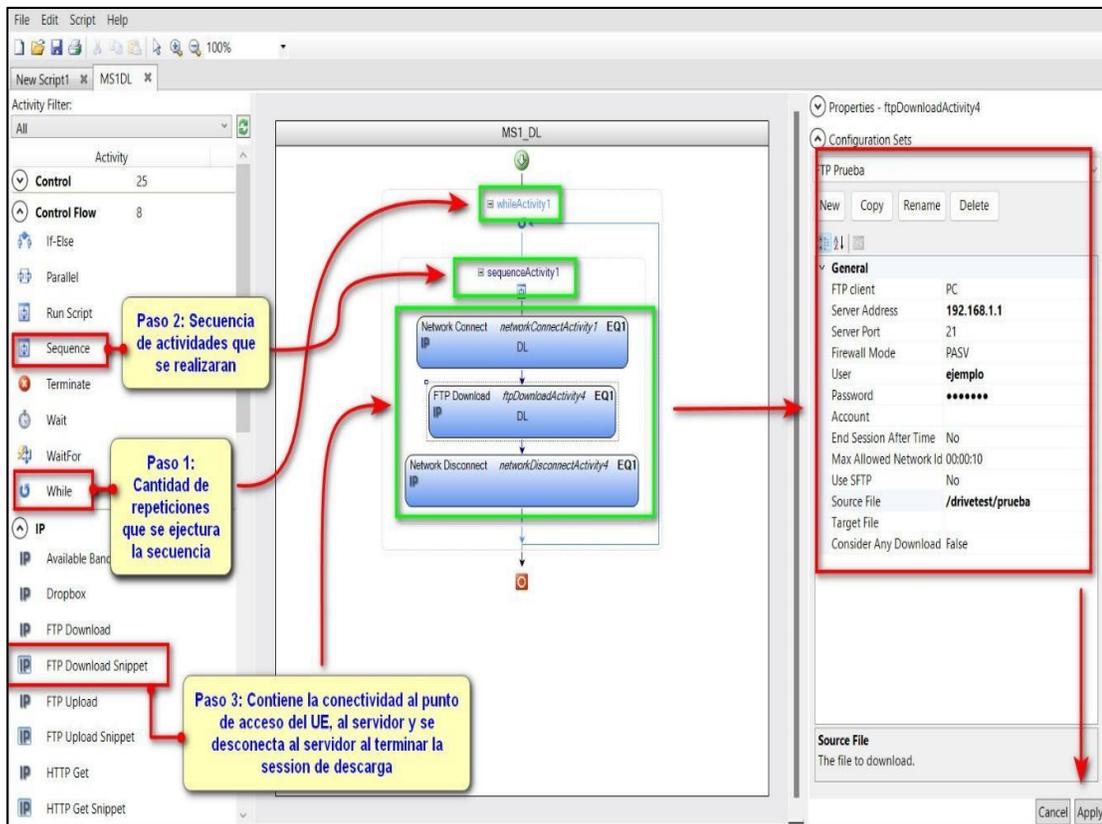
### **3.4 Software de medición. Tams Investigation 22.3.6.**

Se utiliza el software de Tams Investigation 22.3.6 para el drive test, software licenciado por Infovista para realización de mediciones de los diferentes tipos de tecnología de radiofrecuencia como LTE y LTE-A. Las ventajas de utilizar este software que podemos utilizar varios dispositivos y pruebas simultaneas, monitoreando la información deseada en la laptop. Los datos que se van obteniendo en este software se van recolectando en un archivo que llamamos log file, los cuales se pueden cargar en el mismo para observar el drive test realizado. Para tener una mejor georreferencia se utilizan mapas en un formato llamado .TAB o ya sea un Geoset, en este caso se utilizó el mapa de Nicaragua con formato Geoset y un .TAB para la ruta del Clúster.



**Figura 15. Tems Investigation 22.3.6.**

Para realizar las mediciones en LTE y LTE-A, crearemos scripts de descarga de datos utilizando un servidor FTP, la figura 14 se muestran los pasos para la creación del script de descargar.



**Figura 16. Creación de scripts en TMS Investigation.**

En la figura 16 se muestran los pasos a seguir para la creación del script de descarga que se utiliza en el drive test. Utilizamos un archivo de descarga de 10 GB, al terminar la descarga se repite nuevamente el script por la cantidad de repeticiones indicadas. El FTP (protocolo de transferencia de archivos) es un servidor que se utilizó de forma remota brindada por el cliente, el ftp es un servidor que permite la transferencia de archivos básicamente “obtener” y “poner”, FTP son el punto medio entre el destinatario y el remitente [25].

### 3.5 Software de post proceso Tems Discovery 22.3.1.

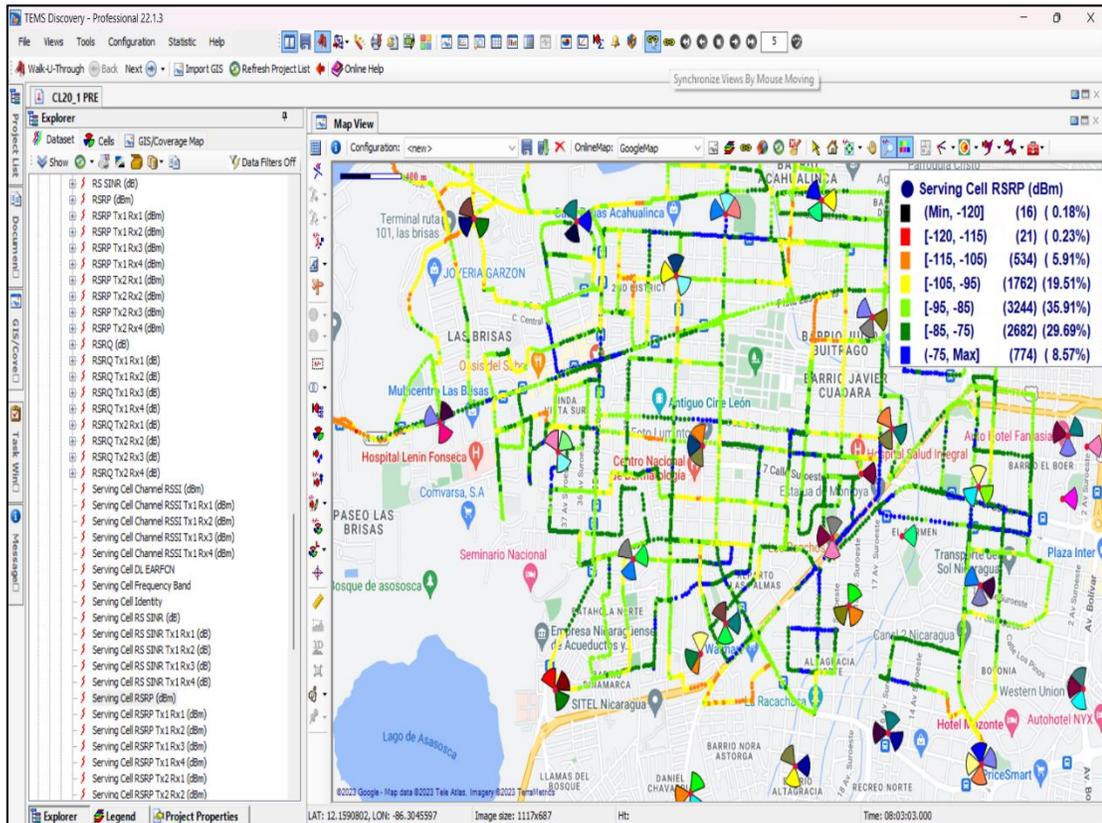


Figura 17. Tems Discovery 22.1.3

Se utilizo Tems Discovery para cargar los datos recolectados del drive test, estos llamados logs. Se realiza un proyecto para cargar estos logs, lo cual nos brindara los datos que queremos obtener del recorrido de cada terminal. En este caso los datos que se realizó plot fueron de los parámetros RSRP, RSRQ, SINR, CQI, CINR, modulation y Throughput.

### 3.6 Drive Test Previo (LTE) – Posterior (LTE-A).

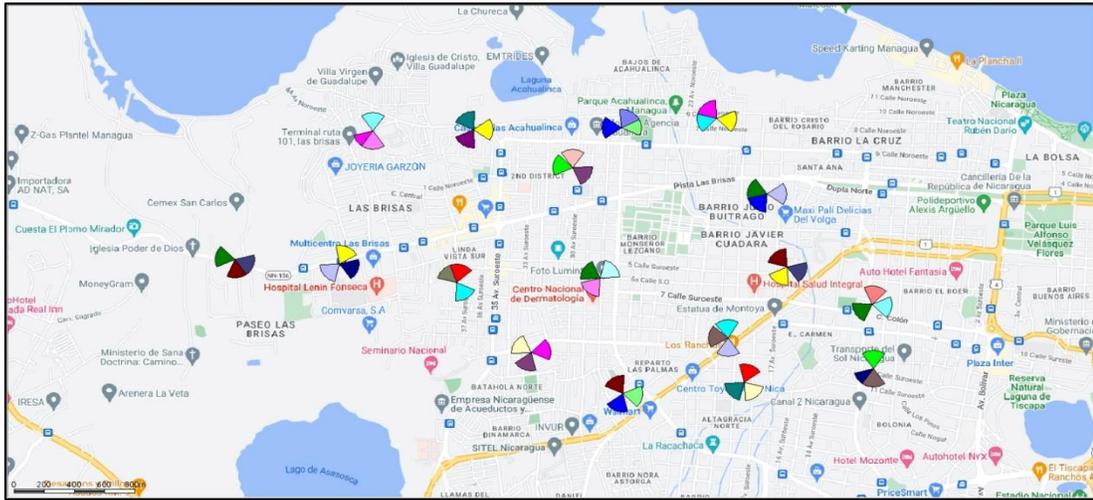


Figura 18. Sitios del clúster.

En la figura 18 representa los sitios del clúster donde se realizó las mediciones de campo (DT) localizados en la ciudad de Managua.

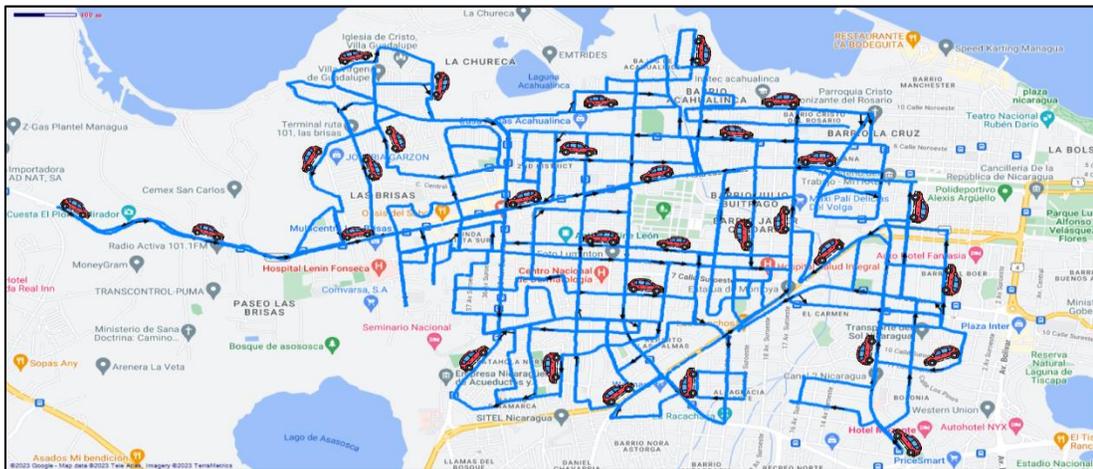
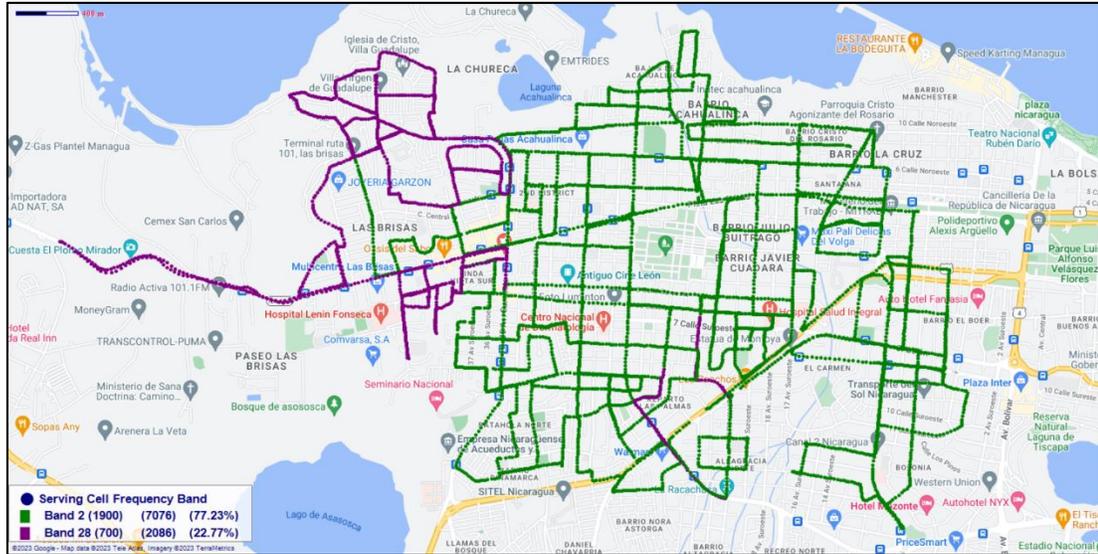


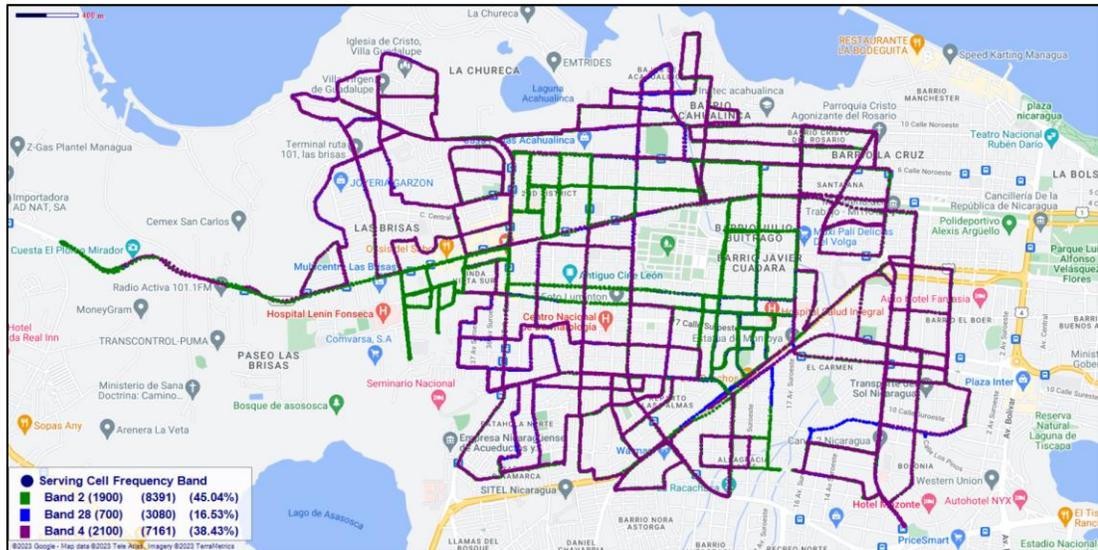
Figura 19. Ruta del clúster.

La ruta de la figura 19 se toma en consideración a la ubicación y cantidad de sitios que existen en el clúster. Todas las rutas de los clústeres en la ciudad de Managua son importantes, debido al alto tráfico de usuarios en la zona urbana, esta ruta fue seleccionada por el acceso a los datos de los sitios y la zona medida.



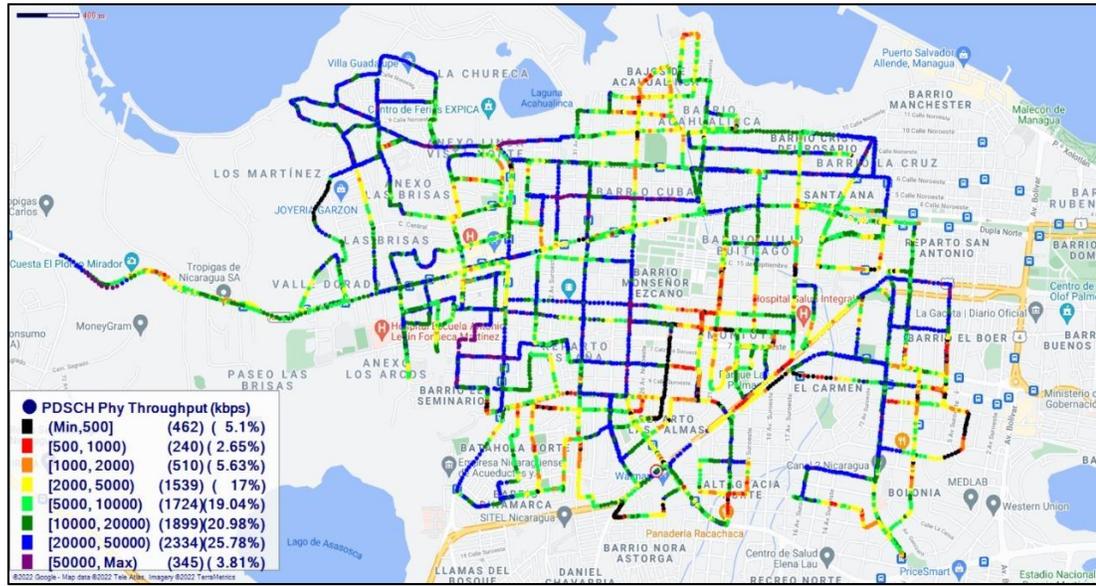
**Figura 20. Bandas de la red LTE.**

En la figura 20 se observa la banda con más dominancia en el recorrido previo en la red LTE, que en este caso sería la banda 1900 y las dos bandas que se operan en la red LTE previa a su modernización a una red LTE-A.



**Figura 21. Bandas de la red LTE-A.**

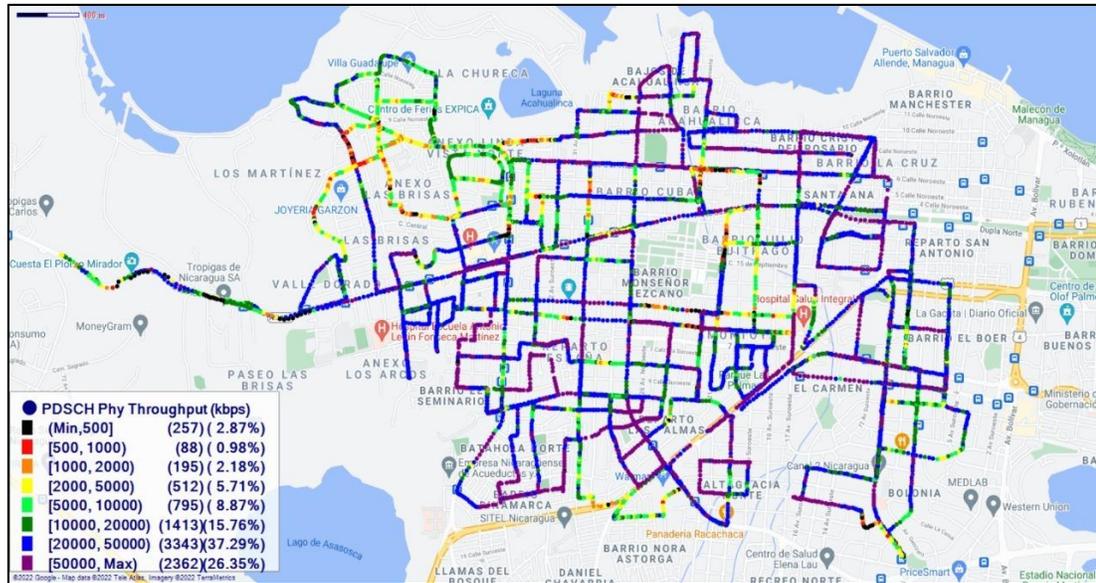
En la figura 21 se observa las bandas de operación de la red LTE-A, que en este caso se añade la banda de operación B4 (2100Mhz) de 20 MHz de ancho de banda. Siempre se va a observar la banda B28 como ultima prioridad, las primeras prioridades con las bandas de alta frecuencia como lo son B2 y B4.



**Figura 22. PDSCH Phy Throughput Pre.**

En la figura 22 se observa las tasas de datos obtenidas en el recorrido previo a una red LTE-A, cada punto vario tomando en cuenta la carga de usuarios de los sitios y también se debe considerar varios factores, como el ancho de banda del canal, el esquema de modulación, la relación señal-ruido (SNR) y otros parámetros que se detallan en las siguientes figuras del capítulo.

Para la red previa de LTE consta de las portadoras B2 (1900 MHz) con 20 MHz de ancho de Banda y B28 (700 MHz) con 15 MHz sin ningún tipo de agregación de portadora, al no tener CA, el terminal móvil solo se conecta a una banda o portadora a la vez.



**Figura 23. PDSCH Phy Throughput Post.**

Para poder mejorar la tasa de transferencia del Throughput, se emplearon diversas técnicas, como el aumento de la cantidad de portadoras, utilizar esquemas de modulación como lo es 256QAM, mejorar la SINR optimizando la calidad de la señal, y utilizar múltiples antenas para admitir la multiplexación espacial (MIMO). En la figura 23 se observa el recorrido de LTE-A, se obtiene mejor Throughput que la red previa de LTE. Se obtuvo un 26.35% con tasas que superan los 50 Mbps comparado en la red LTE con 3.81%, también en buenos valores de Throughput (rango 20 Mbps- 50 Mbps) se muestra con el 37.29%, 11.51% más que en la red previa LTE.

En resumen, la diferencia de Throughput entre LTE y LTE-A radica en la capacidad de ancho de banda y la eficiencia espectral, y LTE-A ofrece una tasa de transferencia más alta gracias a técnicas avanzadas de modulación, agregación de portadoras y múltiples antenas en el dispositivo del usuario.



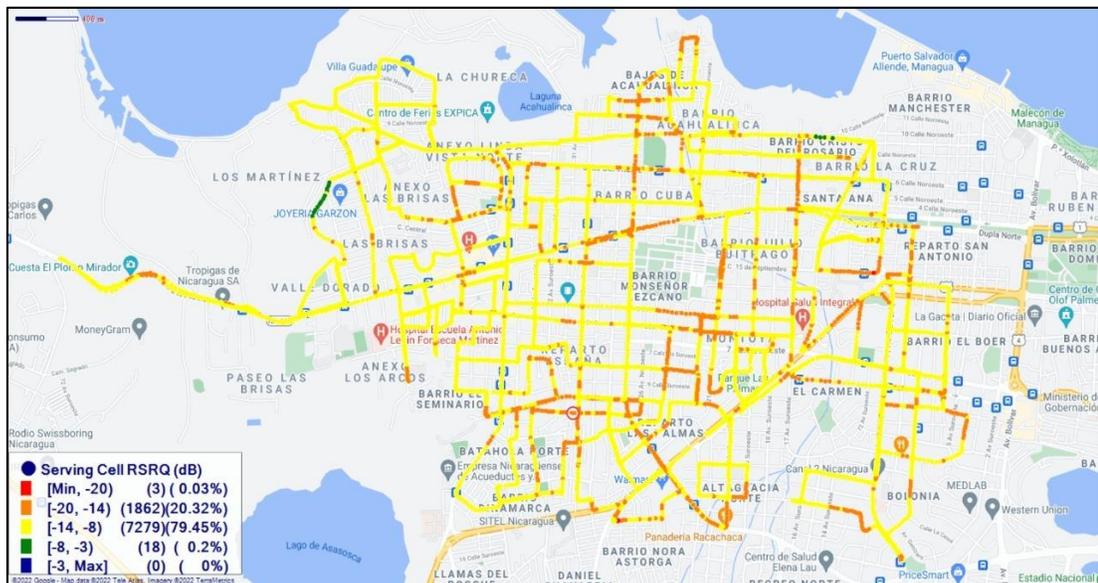
**Figura 24. Serving Cell RSRP LTE Pre.**

Serving Cell RSRP se utilizó para determinar la fuerza de la señal en la celda de servicio actual y para tomar decisiones sobre la gestión del tráfico y la asignación de recursos. Por ejemplo, si la RSRP es baja, puede indicar que el dispositivo móvil se encuentra en una zona con una cobertura de señal débil, lo que puede requerir que se realicen ajustes en la red para mejorar la calidad de la señal, como la asignación de más recursos de transmisión o el cambio de celda de servicio. En la figura 24 se muestran el 80% del recorrido en condiciones óptimas, sin embargo, existen puntos con bajo niveles de RSRP como -105 a -95 dBm (18.8%) y de -115 a -105 dBm (3.8%).



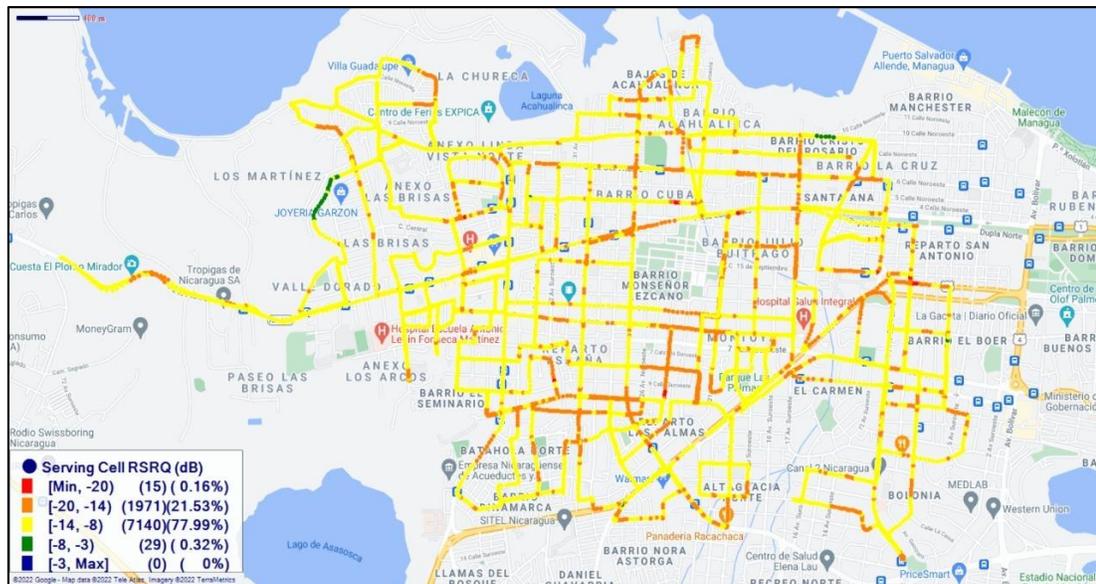
**Figura 25. Serving Cell RSRP Post.**

Serving Cell RSRP se utilizó junto con otras medidas, como la calidad de la señal y la velocidad de transferencia de datos, para tomar decisiones de gestión de red y para garantizar una experiencia de usuario óptima. En la figura 24 es el recorrido posterior lo cual se observa una mejora considerable haciendo una comparativa con el recorrido pre de la figura 25. El recorrido posterior el rango de -115, -105 dBm paso de 3.8% a 0.99%. y -105, -95 dBm de 18.8% a 11.51%.



**Figura 26. Serving Cell RSRQ LTE Pre.**

Serving Cell RSRQ es el dato obtenido de las celdas servidoras al UE en el recorrido, la calidad de señal recibida que varía en dependencia del tráfico de usuarios en la red, también se toma en cuenta la distancia de la celda servidora. En la figura 26 se observa un buen RSRQ tomando de referencia la tabla 1, el 79.45% del clúster está en el rango de -14 a -8 dB.



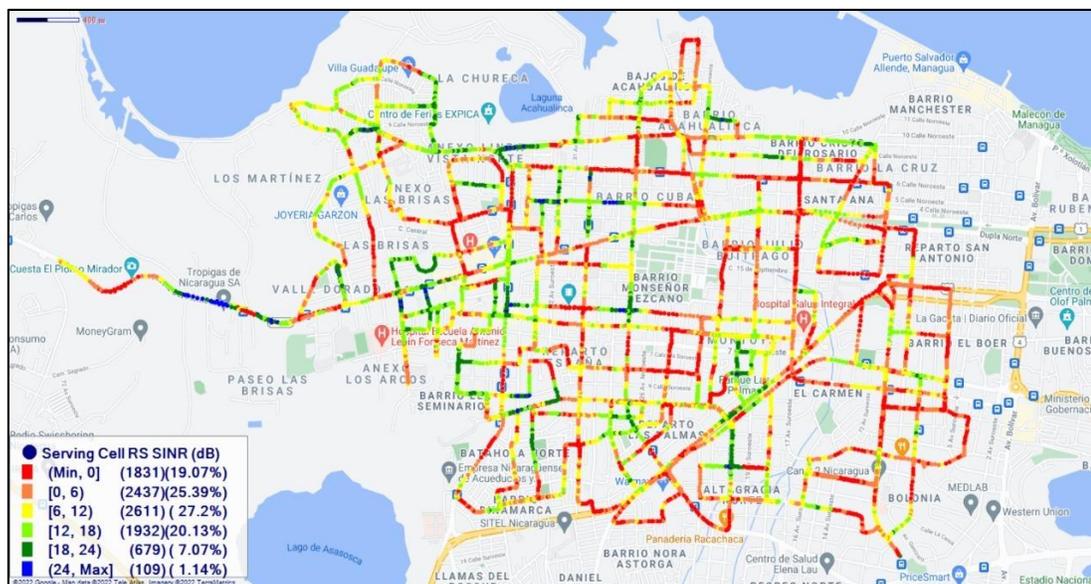
**Figura 27. Serving Cell RSRQ LTE Post.**

Serving Cell RSRQ es importante para garantizar una buena calidad de servicio para los usuarios móviles y para la gestión eficiente de la red. Los valores de RSRQ se miden en dB. La RSRQ se utilizó en conjunto con otras medidas de calidad de la señal, como la RSRP y la SINR, para tomar decisiones de gestión de red y garantizar una experiencia de usuario óptima. Si comparamos la figura 27 con la figura 26 solo se obtuvo una mejora en el rango de -8, -3 dB de 0.2% a 0.32%. De igual forma del rango -14,-8 con 77.9%.



**Figura 28. Serving Cell SINR LTE Pre.**

SINR es muy utilizado por los operadores, y la industria LTE en general, ya que cuantifica mejor la relación entre las condiciones de RF y rendimiento. Se suele utilizar SINR para calcular el CQI (Indicador de calidad del canal) que informan a la red. En la figura 28 se muestra un mayor porcentaje del SINR de 27.59% en el rango de 0-6, referenciándonos de la tabla 1 este rango de SINR está en mid cell, lo cual significa en una condición de radiofrecuencia de calidad media, sin embargo, existe un alto porcentaje del 25.07% de bajo rango Min, 0 que se debe mejorar.



**Figura 29. Serving Cell SINR LTE Post.**

EL SINR en LTE es una medida crítica de la calidad de la señal recibida por un dispositivo móvil desde la estación base de la red LTE y es esencial para garantizar una experiencia de usuario óptima en términos de conectividad y velocidad de datos. Mide la relación entre la señal recibida y la interferencia, lo que indica cuánto de la señal transmitida se puede recuperar de manera confiable. En la figura 29 se observa que el rango de Min, 0 con 19.07 % mejoró un 6% respecto a la medición Pre (figura 27).

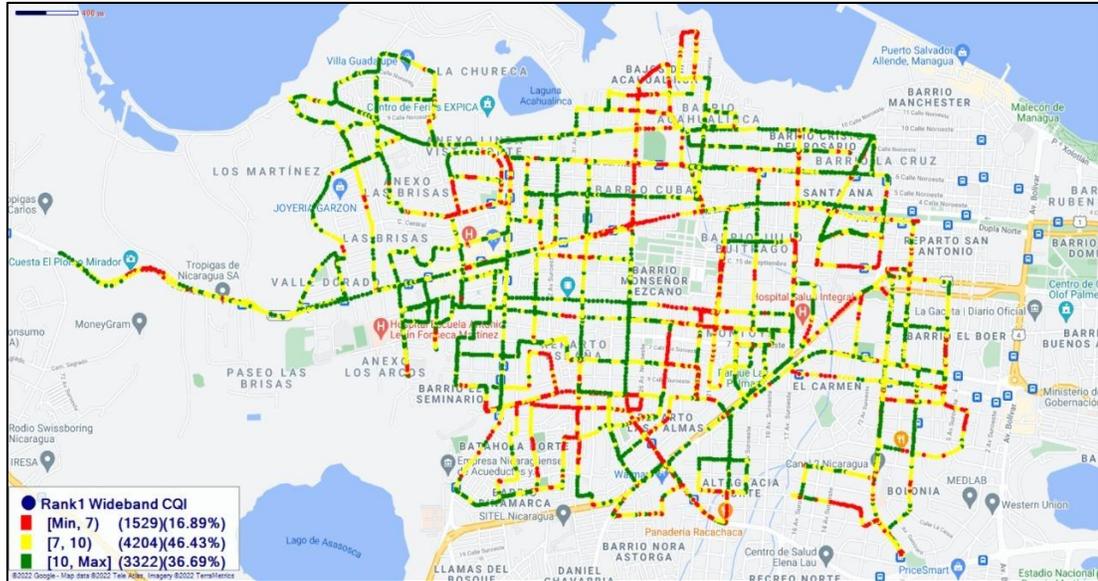


Figura 30. CQI LTE Pre.

CQI significa Channel Quality Indicator. Básicamente, este indicador lleva la información sobre lo bueno o malo que es la calidad del canal de comunicación. LTE también tiene CQI para su propio propósito. CQI contiene la información que se envía desde la UE a eNode-B. Esto es lo que indica una tasa de transmisión de enlace descendente apropiada. CQI que va desde 1 hasta 15 [26].

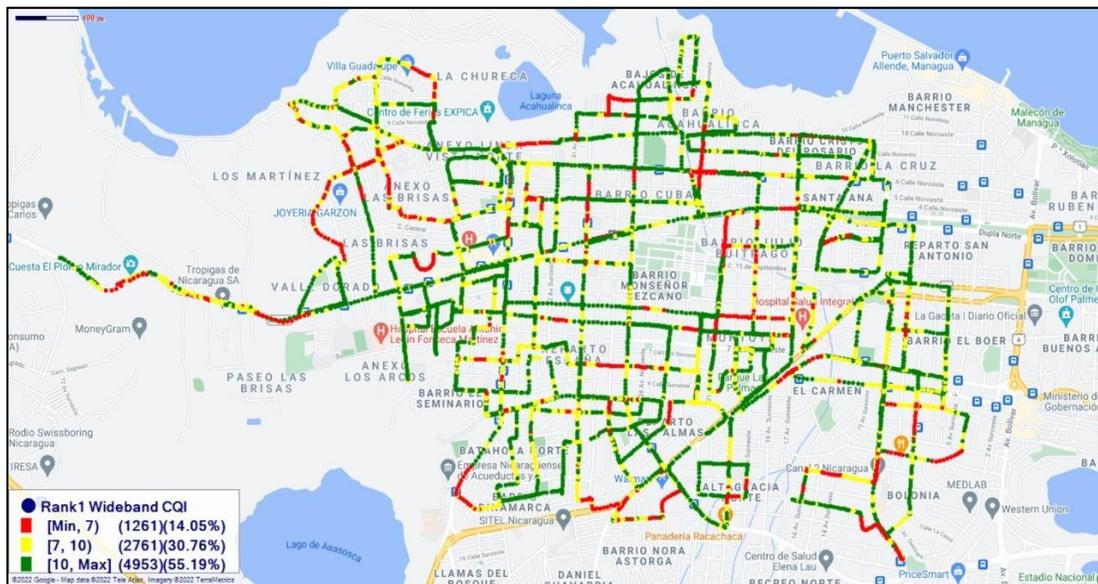
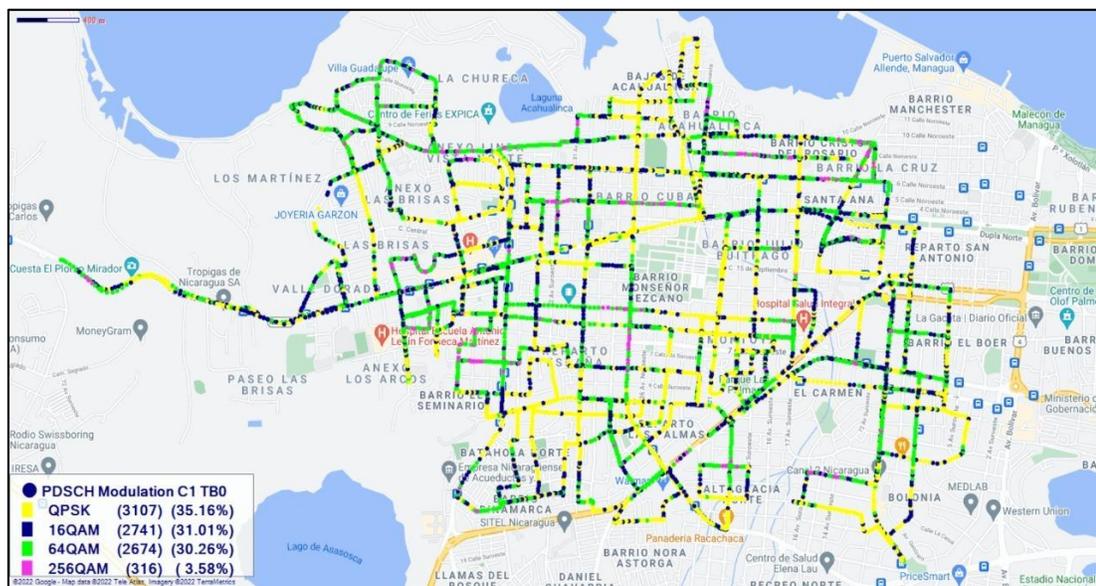


Figura 31. CQI LTE Post.

La calidad del canal se refiere a la cantidad de errores y ruido que pueden ocurrir durante la transmisión de datos, y es importante medirla para que la red pueda ajustar la velocidad de transmisión y la cantidad de recursos asignados a cada dispositivo de manera adecuada, para garantizar una transmisión de datos más eficiente y confiable. En la figura 31 se observa el 55.19% con los mejores valores, realizando una comparativa con las mediciones pre (figura 30) la mejora del rango 10, Max fue de 18.29%, también reduciendo un 2.84% los bajos niveles rango Min,7.



**Figura 32. Esquema de modulación Pre.**

En la figura 32 se muestra que el esquema de modulación 16 QAM es la modulación dominante en la ruta con un 31.01% y por debajo esta 64 QAM con 30.26%. Los esquemas se utilizan en los sistemas de comunicación inalámbrico, el uso de estos esquemas modulación permiten aumentar la velocidad de bit a costa de mayores limitaciones en cuanto a recepción de la señal [27].



**Figura 33. Esquema de modulación Post.**

La selección del esquema de modulación adecuado se basa en la calidad del canal de radio y la cantidad de errores de transmisión esperados. La cantidad de errores de transmisión esperados se refiere a la cantidad de bits de datos que se espera que se transmitan incorrectamente debido a la presencia de ruido o interferencia en el canal de radio. La red LTE ajusta la modulación en tiempo real para optimizar la eficiencia de la transmisión de datos y garantizar una transmisión de datos confiable y eficiente. En la figura 33 se observa como la modulación de 64QAM y 256QAM aumento comparándolo con la medición pre (figura 32), esto demuestra porque el Throughput aumento considerablemente (figura 23).

### 3.7 Interferencia Inter frecuencia

La interferencia es el principal factor que limita el crecimiento del sistema de celdas. La interferencia puede originarse en otros dispositivos móviles en la misma celda. En las zonas urbanas la interferencia es mayor debido a la alta densidad de transmisión de la frecuencia de radio y la gran cantidad de estaciones base y dispositivos móviles.

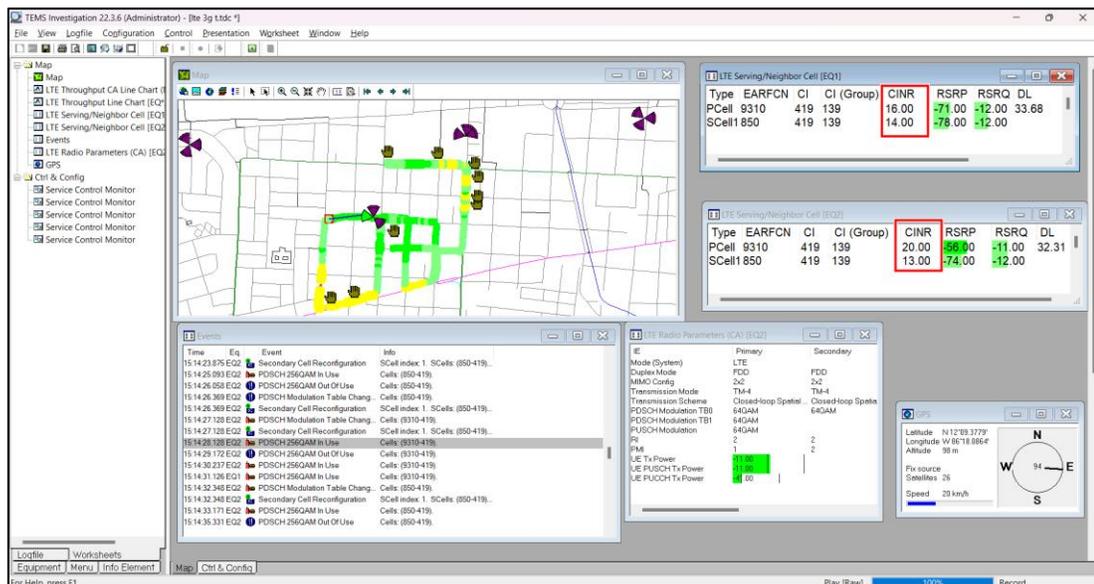
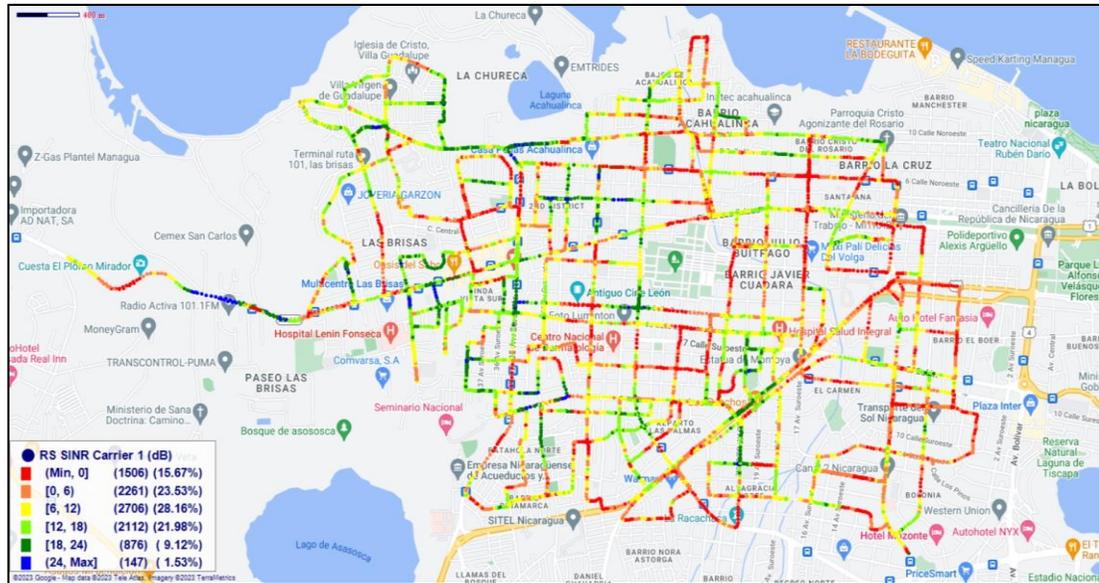


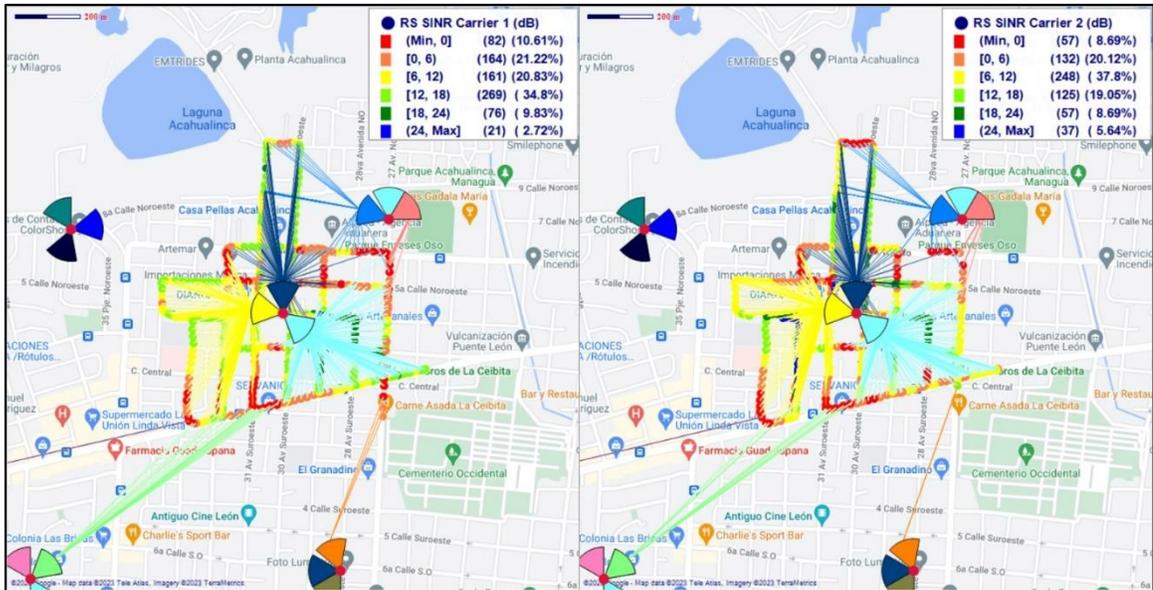
Figura 34. Drive Test

En la figura 34 se observa la realización de un Drive Test, observando los diferentes parámetros que se recolecto. En el cuadro rojo que está en la figura 34 se observa el CINR de EQ1, 16 dB para PCell y 14 dB para SCell. En esta medición se observó la variación de este parámetro.



**Figura 35. RS SINR Carrier LTE-A.**

En la figura 35 representa el RS SINR Carrier. La señal transmitida por una celda se ve afectada por la interferencia de otras señales y por el ruido en el canal de comunicación. Si el CINR es alto, mejor será la calidad de la señal y por lo tanto se tendrá un buen servicio, el CINR alto se refiere que la señal de la portadora es mayor en comparación a la interferencia y el ruido.



**Figura 36. RS SINR Carrier 1 y 2.**

La figura 36 representa el parámetro RS SINR para Carrier 1 y Carrier 2. Se observa como sitios vecinos, cercanos y lejanos en algún momento de la recolección de datos se conectaron al terminal móvil, convirtiéndose esta en la celda servidora que le brinda servicio al móvil. Este tipo de evento genera una degradación en los niveles de SINR, afectando este al downlink Throughput.

El análisis de los resultados de la Inter frecuencia Las bandas 700, 1900, 2100Mhz al tener una banda de guarda o mejor dicho una separación de rangos de frecuencias asegura que los canales de comunicación utilizados de forma simultánea no experimenten interferencias entre ellas de frecuencias en LTE-A. Las interferencias que se observaron en las mediciones son por sobre propagación de celdas.

## Capítulo IV. Análisis del Throughput en la red LTE-Advanced desplegada.

### 4.1 Introducción del Capítulo IV.

El Throughput LTE se refiere a la cantidad de datos que se pueden transmitir a través de una red LTE en un período de tiempo determinado. El Throughput se mide en bits por segundo (bps), kilobits por segundo (Kbps), megabits por segundo (Mbps) o gigabits por segundo (Gbps). Cuanto mayor sea el Throughput, más rápida será la conexión y más rápido se podrán descargar y cargar datos, depende de varios factores, como la calidad de la señal, la congestión de la red, la distancia entre el dispositivo y la estación base, el ancho de banda disponible y la tecnología de modulación utilizada. Las redes LTE más nuevas, como LTE-A (LTE-Advanced) y LTE-A Pro, utilizan tecnologías de modulación más avanzadas y técnicas de agregación de portadoras para aumentar el Throughput y mejorar la eficiencia de la red.

El Throughput LTE también puede verse afectado por la cantidad de usuarios que están utilizando la red simultáneamente. Si hay muchos usuarios conectados a la misma estación base, la velocidad de conexión puede disminuir debido a la congestión de la red. En este caso, es posible que los proveedores de servicios de red utilicen técnicas de gestión de congestión para equilibrar la carga en la red y mejorar el Throughput.

En general, el Throughput LTE es una medida importante de la capacidad de una red inalámbrica para transmitir datos de manera eficiente y rápida. Los usuarios de dispositivos móviles y los proveedores de servicios de red monitorean el Throughput de la red para asegurarse de que se mantenga dentro de los límites aceptables y para identificar áreas en las que se pueda mejorar la calidad y la velocidad de la conexión.

El análisis del Throughput se realizará con los datos recolectados previo y posterior al despliegue de la red LTE-A. En este capítulo se realizará análisis comparativo del Throughput y 4 parámetros como intensidad de la señal (RSRP), calidad de señal (RSRQ), la relación señal/interferencia y ruido (SINR) y la relación portadora-ruido e interferencia (CNIR), que son utilizados para medir la calidad de la red LTE. Los resultados del estudio comparativo se pueden observar en las gráficas con su debida explicación.

#### 4.2 Análisis de los distintos parámetros en LTE y LTE-A.

En la figura 33 hemos puesto en el eje de la Y el Throughput y el RSRP en el eje X. En la figura se observa que cuando el RSRP del usuario baja significa que tiene una mala cobertura y el Throughput baja. Por lo general el RSRP es bueno cuando está cerca del sitio, pero no es una regla que debe cumplir siempre debido a que las antenas pueden estar levantadas y apuntan a usuarios ubicados más distantes del sitio.

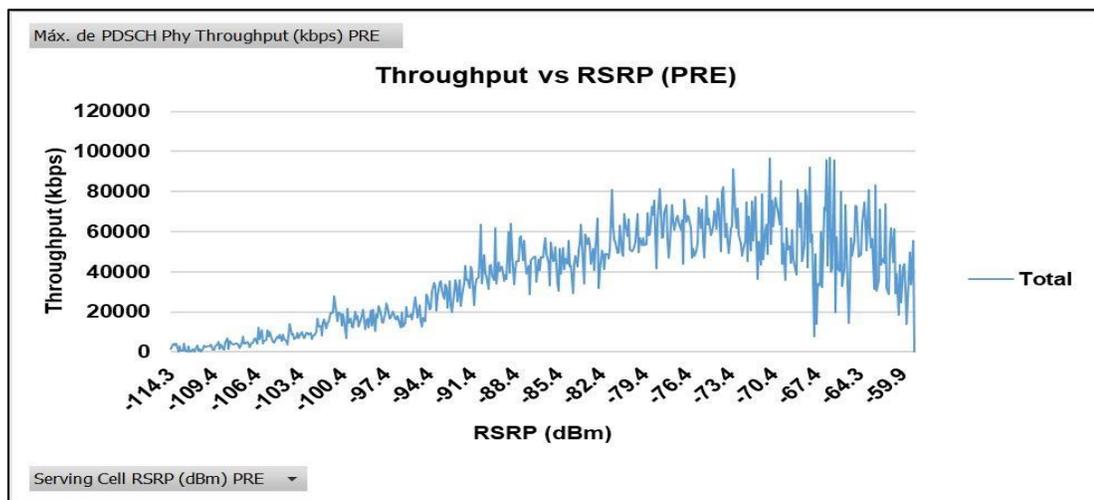
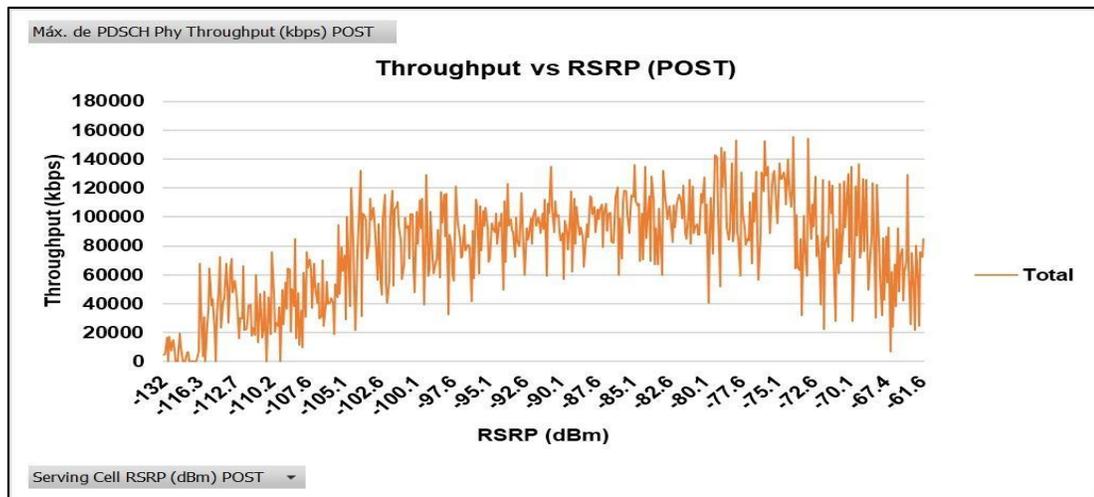


Figura 37. Throughput vs RSRP PRE.

El Throughput se relaciona a los valores de RSRP. Si observa el gráfico de la derecha, puede ver que a medida que se reduce el RSRP, también se reduce el rendimiento. En la figura 37 se observan que el Throughput alcanza velocidad

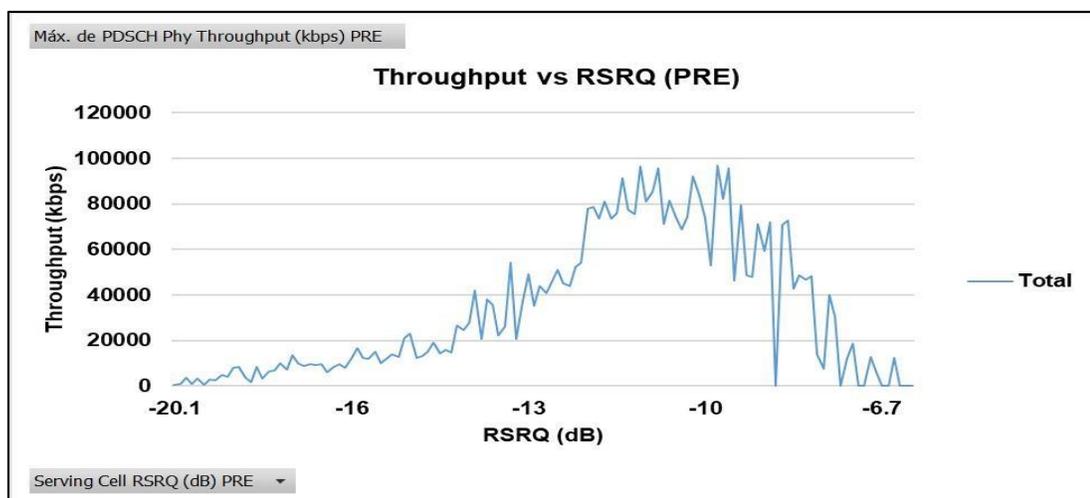
de hasta 100000 kbps en el intervalo de valores de RSRP entre -70 dBm hasta -64 dBm.

Los valores de Throughput como se había mencionado anteriormente se relacionan a los valores de RSRP, pero no es una regla general lo cual asume de que siempre los valores de Throughput van a ser bajos cuando los niveles de RSRP son bajos y viceversa, también se toma en cuenta otros parámetros y el tráfico de usuarios que puede llegar a tener un sector. Como se observa en la figura 33, hay muestras de altas tasas de Throughput con bajos niveles de RSRP.



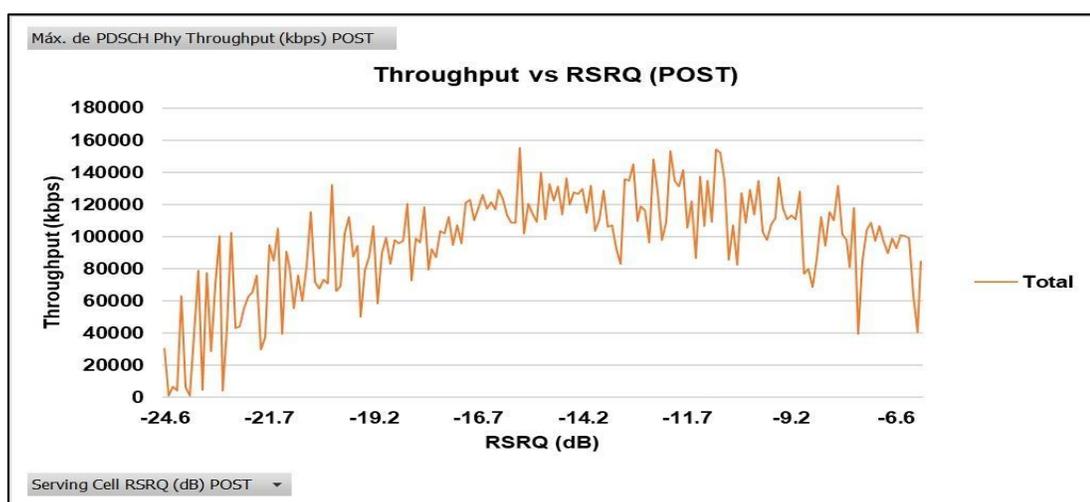
**Figura 38. Throughput vs RSRP Post.**

Como se explicaba en la figura 38, los valores de Throughput van a variar en dependiendo de los buenos o malos niveles de RSRP, para en este caso se observa mejores valores de Throughput superando los 100000 kbps en la tasa de datos Down link.



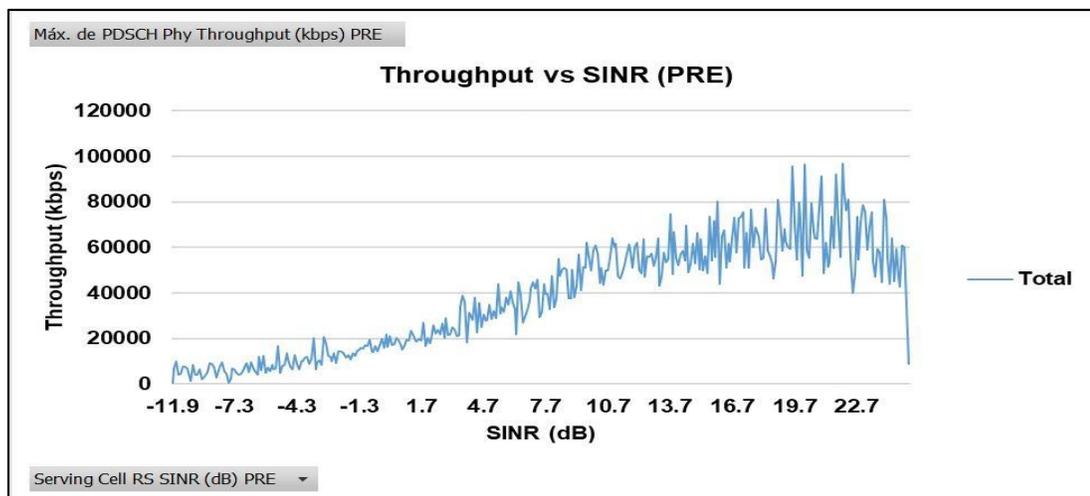
**Figura 39. Throughput vs RSRQ PRE.**

El RSRQ en dependencia del tráfico de usuarios en la red, también se toma en cuenta la distancia de la celda servidora o alguna obstrucción como edificios o algún otro tipo de elevación por lo cual afecta al Throughput.



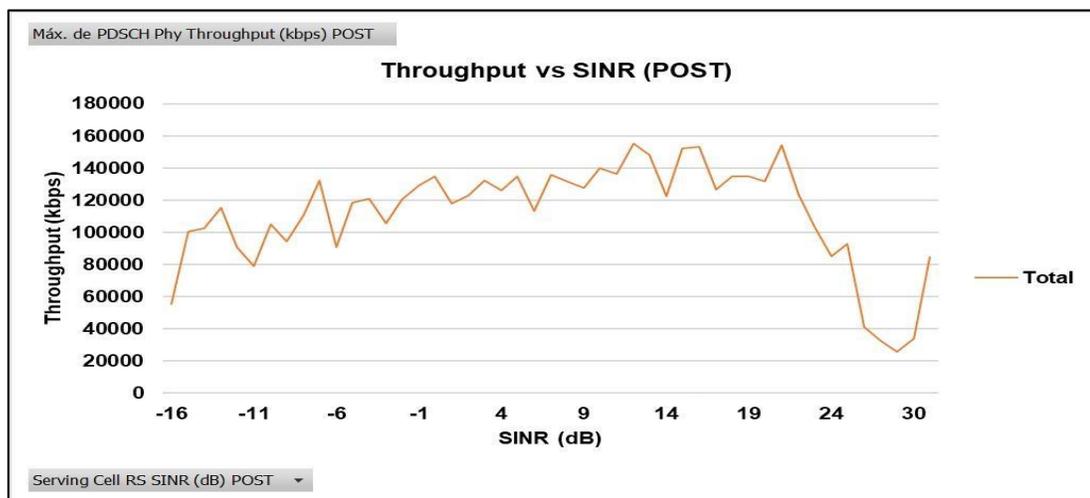
**Figura 40. Throughput vs RSRQ Post.**

En la figura 40 se muestra que los valores de Throughput cambian en dependencia de la calidad de cobertura que se presente. Los valores de RSRQ cambiara tomando en cuenta los valores de RSRP.



**Figura 41. Throughput vs SINR PRE.**

El SINR puede causar una caída en el Throughput en el caso de que este baje, ya que un bajo SINR conduce a un CQI más bajo, lo que a su vez produce un cambio de modulación más bajo. El SINR es bajo cuando obtiene altos niveles de interferencia.

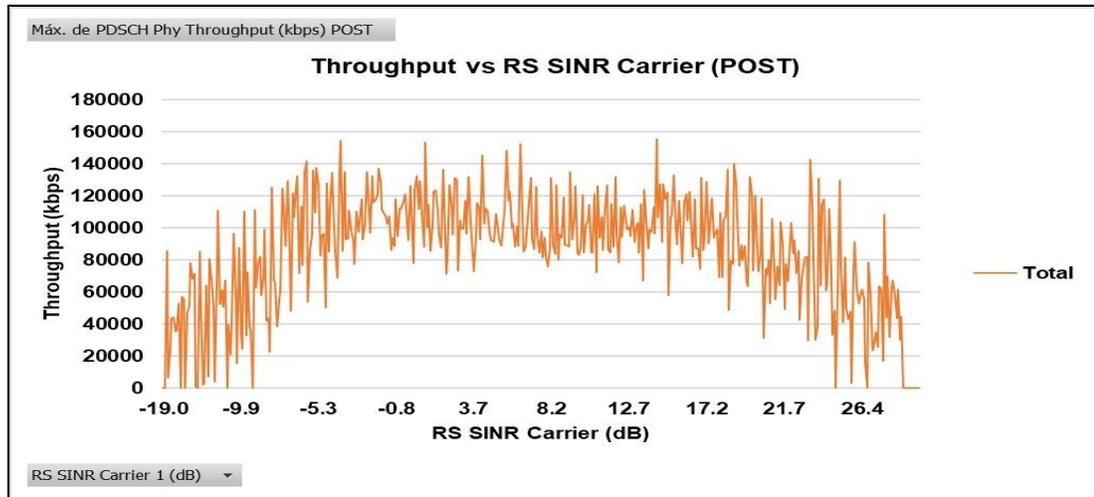


**Figura 42. Throughput vs SINR POST.**

Por lo general, una SINR más baja provoca un rendimiento más bajo, ya que una SINR más baja conduce a un indicador de calidad del canal (channel quality indicator – CQI) más bajo, lo que a su vez conduce a un esquema del código de modulación (modulation code scheme - MCS) más bajo. La SINR puede

ser baja debido a un RSRP deficiente, es decir, una cobertura baja puede dar como resultado una SINR baja. O bien, la SINR también puede ser menor en caso de una interferencia mayor. Si observamos las figuras 41 y la figura 42, la interferencia es mayor en la figura 41.

Las diferentes mediciones que, analizados de los logs obtenidos en los Drive Test, observaremos la diferencia en los plots como varían los diferentes valores del SINR antes de la agregación de portadoras y después de la agregación de portadoras.



**Figura 43. Throughput vs RS SINR CARRIER.**

La figura 43 representa SINR Carrier con respecto al Throughput. En la mayoría de las mediciones se observó un alto SINR, esto quiere decir que la potencia de la señal deseada es mayor que la señal no deseada. En esta estadística también se encontró muestras con bajos niveles de este parámetro, lo que puede ocasionar una mala experiencia al usuario por señales no deseadas.

**Tabla 6. Datos estadísticos Throughput de mediciones PRE.**

Métrica	Conteo	Promedio	Min.	Max.	Desv. Est.	Varianza
Throughput	9053	15774.4917	0	96902	15484.68054	239775331.551663

**Tabla 7. Datos estadísticos Throughput de mediciones POST.**

<b>Métrica</b>	<b>Conteo</b>	<b>Promedio</b>	<b>Min.</b>	<b>Max.</b>	<b>Desv. Est.</b>	<b>Varianza</b>
Throughput	8965	35094.6805	0	155332	27765.672	770932542.388127

En la tabla 6 y 7 se muestra el Max. Throughput obtenido en las mediciones pre y post el promedio que se obtuvo en estas dichas mediciones. Queda demostrado las mejoras de Throughput con estos valores mostrados.

Los datos obtenidos de la tabla 6 y 7 se explica en lo siguiente:

- **Conteo:** Cantidad de muestras obtenidas en las mediciones de campo realizadas.
- **Varianza:** Es la medida de dispersión que representa la variabilidad de los valores de Throughput respecto a su promedio [28].

$$\text{Var}(X) = \frac{\sum_1^n (x_i - \bar{X})^2}{n}$$

**Formula de la Varianza (1) [28].**

- **Promedio:** Es el resultado de la suma del Throughput y dividido entre la cantidad de muestras obtenidas [29].
- **Desviación estándar:** Es la información sobre la dispersión del promedio de la cantidad de muestras obtenidas en las mediciones de campo (DT) [30].

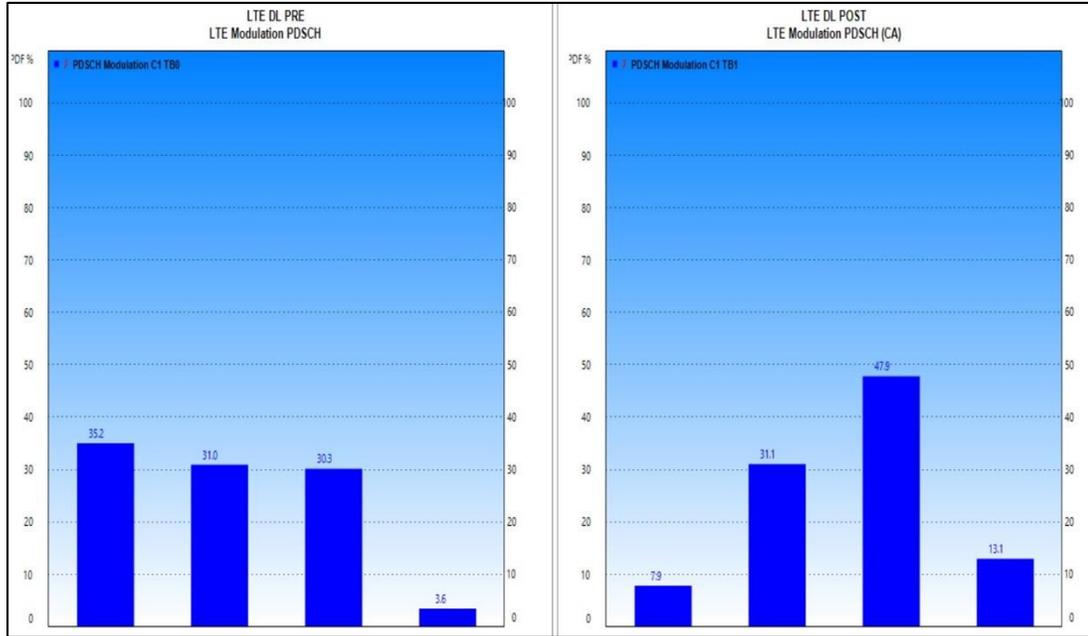
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^N (x_i - \bar{X})^2}{N}}$$

- **$\sigma$ : Desviación estándar**
- **X: Variable**
- **$x_i$ : Observación número i de la variable X**
- **N: Numero de observaciones**
- **$\bar{X}$ : Es la medida de la variable X**

### **Formula de la desviación estándar (2) [30].**

La varianza y desviación estándar sus diferencias son su unidad de medición, la varianza se expresa siempre al cuadrado, mientras que la desviación estándar en un valor entero, es decir la desviación estándar es la raíz cuadrada positiva de la varianza. En resumen, la varianza o desviación estándar es la dispersión en la que se encuentra una cantidad de Throughput de la otra.

- **Mínimo:** Es el mínimo Throughput obtenido en las mediciones.
- **Máximo:** Es el máximo Throughput obtenidos en las mediciones.



**Figura 44. Modulación LTE Pre – Post.**

En la figura 44 se muestra la probabilidad de la modulación de la LTE Pre Y LTE Post, esta va variando durante el recorrido por distancia, tráfico y otros parámetros.

**Tabla 8. Datos de modulación DT PRE – POST.**

DT PRE				
<b>Conteo</b>	3107	2741	2674	316
<b>PDF%</b>	35.16	31.01	30.26	3.58
<b>Modulación</b>	QPSK	16 QAM	64 QAM	256 QAM
DT POST				
<b>Conteo</b>	1402	2656	3817	984
<b>PDF%</b>	15.83	29.98	43.09	11.11
<b>Modulación</b>	QPSK	16 QAM	64 QAM	256 QAM

La tabla 8 representa las muestras obtenidas del DT PRE y DT POST referente a la modulación. Se detalla en lo siguiente lo que significan estas muestras.

El PDF: Es la probabilidad de que una variable aleatoria tome un valor, en este caso como se define en la tabla los PDF% define la probabilidad de cada modulación concorde a la cantidad máxima de muestras obtenidas en el recorrida.

La degradación de la señal, así como la velocidad de transmisión de datos en la tecnología LTE y LTE-A son factores a tener en cuenta en las diferentes modulaciones. El uso de esquemas de modulación como QPSK, 16 QAM, 64 QAM y 256 QAM se utilizan para conseguir aumentar la velocidad de transmisión de los datos. Modulaciones de más alto nivel proporcionan mayor número de bits eficaces por símbolo y por lo tanto mayor tasa binaria [27].

La modulación transporta la información sobre una onda portadora, estas técnicas aprovechan el canal de comunicación para transmitir la información de una forma simultánea. Según la American Estándar For Telecommunications, (ANSI), la modulación es el proceso, o el resultado, de varia una característica de una onda portadora de acuerdo con una señal que transporta información [31].

## Capítulo V. Planificación de la red de LTE-A en la herramienta de simulación ATOLL.

### 5.1 Introducción del Capítulo V.

En este capítulo se abordará el proceso mediante etapas del despliegue de los sitios, el análisis detallado del área de cobertura, calidad y la optimización de una red LTE - A en la herramienta ATOLL, en un clúster de alto tráfico en la ciudad de managua, la importancia de realizar una correcto desarrollo de cada una de estas etapa nos proporcionará obtener un eficiente desempeño de la misma red y un futuro despliegue de nuevas tecnologías, además se estimara el número de sitios y celdas requeridos para proveer la cobertura deseada en el clúster basadas en las necesidades actuales y futuras proyectadas, esto evitara tener problemas físicos, técnicos y lógicos de la red.

El desarrollo de este capítulo se basará en las etapas obtenidas del libro que lleva como título: ***THE LTE-ADVANCED DEPLOYMENT HANDBOOK THE PLANNING GUIDELINES FOR THE FOURTH GENERATION NETWORKS***, etapas más utilizadas por cualquier operador para planificar, diseñar y optimizar redes LTE [32].

Etapa 1: **Despliegue de los sitios de la red LTE-A:** Basada en especificar el dimensionamiento de la red LTE-A, site survey y la ubicación de los sitios.

Etapa 2: **Análisis detallado del área de cobertura y calidad de la red LTE-A:** Incluye la selección y uso de herramientas de planificación de radio, en este trabajo monográfico se optó por ATOLL, como se ha mencionado. Este paso implica la selección del modelo de propagación, se utilizará el modelo de propagación estándar (Standar Propagation Model – SPM), y los pasos para la configuración de la red con la herramienta ATOLL, las cuales incluyen: mapas digitales, configuración de los sitios, transmisores y la declaración de vecinas.

Etapa 3: **Optimización de la red LTE-A:** como etapa final se abordará específicamente solo los escenarios de simulación y parámetros que se emplearan para las simulaciones de intra-frecuencias obtenidas de las predicciones en ATOLL, analizando el desempeño de intensidad, calidad e interferencia (RSRP, RSRQ y SINR) y de la velocidad de datos mediante el parámetro de Down link Throughput.

## **5.2 Método para la planificación de la red LTE – A**

Una adecuada planificación de LTE-A, implica el análisis tanto de la cobertura de la red como de la capacidad del sistema ante la demanda de tráfico de los usuarios. La presencia de una mayor carga de tráfico limita el comportamiento del sistema ya que los recursos de radio para atender la demanda son limitados. De igual modo se genera un mayor nivel de interferencia entre las celdas a medida que aumenta la carga de las mismas [33].

## **5.3 Despliegue de los sitios de la red LTE-A:**

En esta parte de proceso de planificación se estima el número de sitios requeridos para proveer la cobertura deseada en el área urbana de la ciudad de Managua, Nicaragua. La planeación de cobertura es el elemento más importante de la planificación de redes inalámbricas [34].

### **➤ Site Survey**

El Site Survey no es más que un análisis minucioso del entorno de red. En la práctica, esta es una metodología que identifica la capacidad de transmisión de datos que la infraestructura de red soporta y lo que está obstaculizando u obstruyendo el perfecto funcionamiento de la conexión inalámbrica [35].

La importancia del site survey dentro de una planificación o diseño de una red LTE -A nos permitirá realizar cambios físicos que impliquen añadir más sitios o equipos a la red, mediante el uso del site survey a través de software como Google Maps o Google Earth podemos obtener la recopilación de datos como: latitud, longitud de los sitios, azimuth de los sectores y la altura de las antenas.

**Tabla 9. Ejemplo de Site Survey.**

REPORTE DE DISEÑO DE SITIO LTE-A 700 - 1900 - 2100 MHz							
ID DEL SITIO:		SITE 1		NOMBRE		LINDA VISTA	
COORDENADAS DEL SITIO NOMINAL		LATITUD		1211490252			
		LONGITUD		-86.3070385			
		FRECUENCIA		700 - 1900 - 2100 MHZ			
		CONFIGURACION DEL SITIO NOMINAL					
SITIO POR :		CAPACIDAD					
ID DEL SITIO	NOMBRE		AZIMUTH(°)	TILT ELECTRICO(°)	TILT MECANICO(°)	ALTURA	ANTENA
SITE 1	LINDA VISTA	SECTOR A	45	NO VISIBLE	4	27	QUAD BAND
		SECTOR B	150	8	2	27	QUAD BAND
		SECTOR C	315	7	3	27	QUAD BAND

Los datos recolectados de la red LTE-A, mediante el site survey a como se indica en la tabla 9. incluyen latitud, longitud de los sitios ubicados en la zona de trabajo, azimuth de los sectores, tilt eléctrico, tilt mecánico, el tipo y la altura de las antenas. Cada estación base contiene 3 sectores respectivamente de los cuales son nombrados según el sitio ejemplo site: SITE 1 - sector: S1, S2 y S3, donde se operó en las bandas de frecuencias de 700, 1900 y 2100 MHz.



**Figura 45. Ubicación de sitios en Google Earth.**

Luego del site survey se localizaron 17 sitios en un área representativa de la ciudad de Managua a como se muestra en la figura 45.

**Tabla 10. Parámetros de los sitios en las bandas 700, 1900 y 2100 MHZ.**

Site 1	
Site ID	Site 1
Cell Name	Linda Vista
Latitud	12.1490252
Longitud	-85.3070385
Sector	S1
Antenna Height M	27
Azimuth	15
TM	5
TE	8
EARFCN	9310
Frequency	700
Technology	LTE
PCI	234

Site 1	
Site ID	Site 1
Cell Name	Linda Vista
Latitud	12.1490252
Longitud	-85.3070385
Sector	S1
Antenna Height M	27
Azimuth	15
TM	5
TE	8
EARFCN	850
Frequency	1900
Technology	LTE
PCI	234

Site 1	
Site ID	Site 1
Cell Name	Linda Vista
Latitud	12.1490252
Longitud	-85.3070385
Sector	S1
Antenna Height M	27
Azimuth	15
TM	5
TE	8
EARFCN	2250
Frequency	2100
Technology	LTE
PCI	234

La tabla 10 representa la operabilidad en las 3 bandas de frecuencia 700, 1900 y 2100.

#### **5.4 Análisis detallado del área de cobertura y calidad de la red LTE-A.**

El análisis detallado consiste en brindar una valoración más específica del área de cobertura y la calidad que se le atribuye al despliegue real, por ende, este análisis se realiza sobre los 17 sitios de en un área de alto tráfico de la ciudad de Managua, mediante la utilización de la herramienta de planificación de Atoll y la elección del modelo de propagación, en este caso, es el modelo de propagación estándar que se estará abordando en este mismo capítulo.

#### **5.4 Elección del software ATOLL® como herramienta de trabajo.**

Atoll fue el primer software de planificación de red LTE en el mercado. Hoy en día, Atoll ofrece una potente plataforma para que los operadores planifiquen y optimicen las redes LTE-A Pro y 5G NR, admite la planificación integrada de redes para redes multi-RAT. Cuenta con una base de datos de red de multitecnología, que permite una integración completa de la planificación combinada de la red 4G / 5G [15].

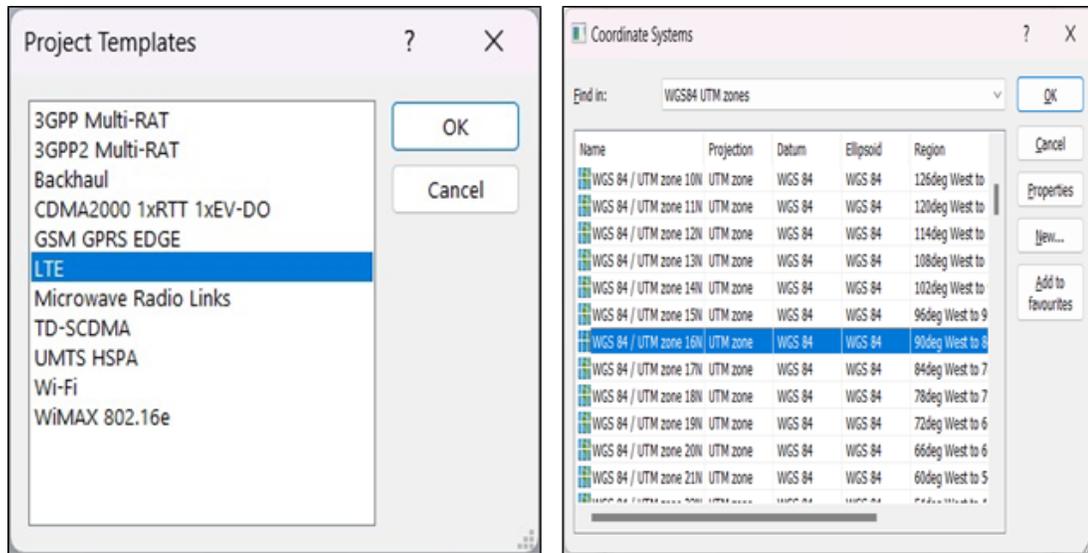
**Razones por las cuales se eligió la herramienta ATOLL® como interés del análisis de nuestro estudio:**

1. Soporta para todas las bandas de frecuencia 4G LTE y configuraciones de operador.
2. Soporte completo para-FD y TD-LTE
3. Compatibilidad con escenarios de implementación de red multicapa
4. Compatibilidad con la agregación de portadoras dentro y entre bandas
5. Soporte para transmisión y recepción multipunto coordinada (CoMP)

6. Planifica, diseña y optimiza redes de telefonía móvil brindándole un continuo monitoreo desde su etapa de inicio hasta su etapa final de la red.
7. Múltiples antenas inteligentes: MIMO masivo, SU-MIMO, MU-MIMO y diversidad de transmisión/recepción en el caso de LTE-A y agregación de portadoras intra e inter-banda.
8. Se pueden reajustar parámetros lógicos que vienen por defecto como son los modelos de propagación con el objetivo de lograr adaptarlos al entorno en que se está trabajando y con ello obtener mejores niveles de señal y estimar las perdidas por trayectoria entre el transmisor y el receptor.
9. Atoll incluye funciones automáticas para la planificación LTE-A que permiten la definición de los parámetros del transmisor durante la fase de planificación inicial, así como una mayor optimización de parámetros dentro de las redes, así como: Planificación automática de frecuencias – AFP, Planificación automática de celdas – ACP y Posicionamiento automático del sitio – ASP.

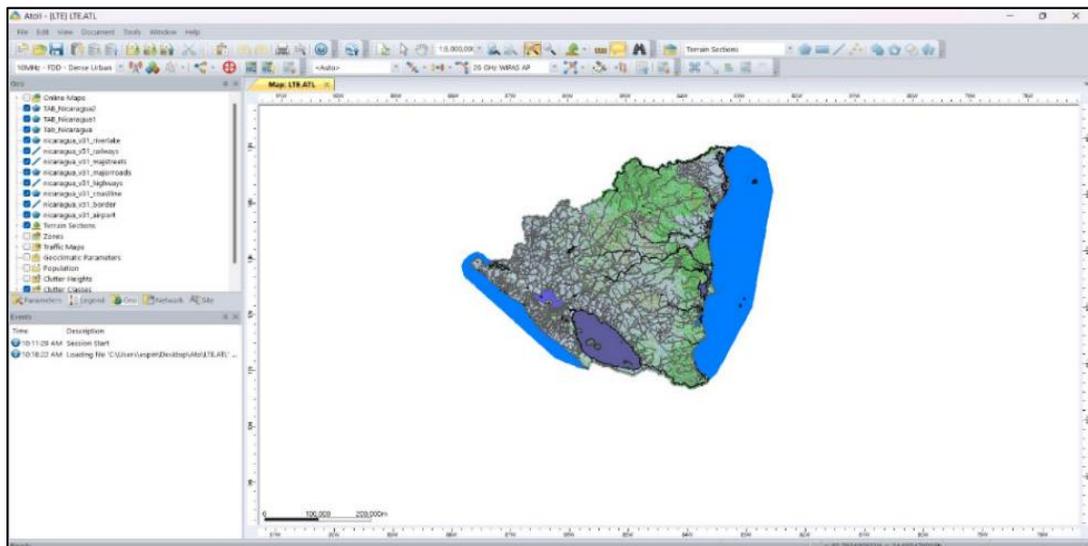
### **5.5 Configuración de la herramienta ATOLL®.**

Inicialmente empezamos creando un nuevo proyecto de tipo LTE a cómo podemos visualizar en la figura 40, luego, se escoge el sistema de coordenadas de acuerdo con el país en el que vamos a trabajar en este caso sería Nicaragua (WGS84 UTM Zone 16N).

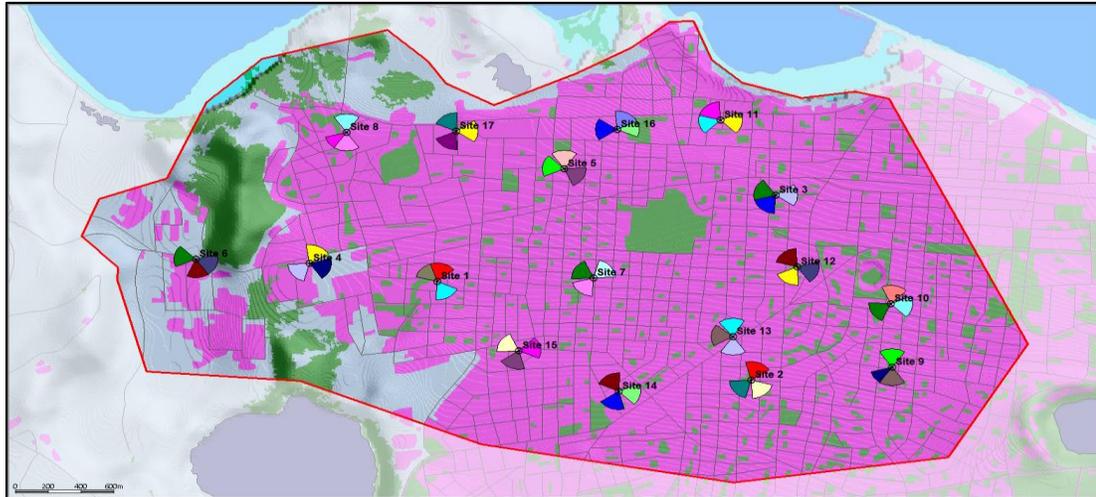


**Figura 46. Creación de nuevo proyecto en ATOLL®.**

A continuación, mostramos la implementación del mapa digital como se muestra en la figura 46 correspondiente a la zona de estudio en el mapa de Nicaragua. La información de este nos ayudará a los procesos de predicción y simulación que realiza ATOLL® y genera resultados más exactos ya que considera las variaciones del terreno sobre el que está situado el análisis.



**Figura 47. Mapa de Nicaragua.**



**Figura 48. Ubicación de sitios en ATOLL®.**

Ya obtenidos los diferentes mapas digitales, Clutter Clases, Clutter Heights, altitudes y vectores como se muestra en la figura 47, se procederá a ejecutar las especificaciones técnicas del sistema LTE-A en cuanto a los sitios, parámetros de los transmisores, parámetros de celdas y la asignación de vecinas para cada sitio correspondiente.

**Tabla 11. Configuración de la tabla sites en ATOLL®.**

Name	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Support Height (m)	Max S1 interface throughput (DL) (kbps)	Max S1 interface throughput (UL) (kbps)
Site 1	86.3070385W	12.1490252N	[79]	27	950,000	950,000
Site 10	86.2818445W	12.1475438N	[74]	24	950,000	950,000
Site 11	86.2912639W	12.1594844N	[40]	24	950,000	950,000
Site 12	86.287031W	12.1499591N	[72]	24	950,000	950,000
Site 13	86.2906W	12.1454N	[87]	30	950,000	950,000
Site 14	86.2969832W	12.1418885N	[102]	24	950,000	950,000
Site 15	86.3025371W	12.1445137N	[93]	24	950,000	950,000
Site 16	86.297002W	12.1589096N	[52]	24	950,000	950,000
Site 17	86.305973W	12.158793N	[61]	21	950,000	950,000
Site 2	86.2896284W	12.1425923N	[95]	33	950,000	950,000
Site 3	86.2882251W	12.1546275N	[62]	30	950,000	950,000
Site 4	86.3141458W	12.1502349N	[84]	30	950,000	950,000
Site 5	86.2999749W	12.1563427N	[62]	27	950,000	950,000
Site 6	86.3204767W	12.1505281N	[60]	30	950,000	950,000
Site 7	86.2983632W	12.1492632N	[75]	31	950,000	950,000
Site 8	86.3120676W	12.1587418N	[60]	25	950,000	950,000
Site 9	86.281789W	12.1434222N	[85]	24	950,000	950,000

Seguimos con la configuración e importación de los sitios según como muestra la tabla 11. Para la configuración de esta tabla basta con llenar los campos de nombre, longitud y latitud de los sitios en el que se verán reflejados en el mapa o zona del diseño de la red a como se mostró en la figura 48.

**Tabla 12. Configuración de los parámetros de los transmisores en ATOLL®.**

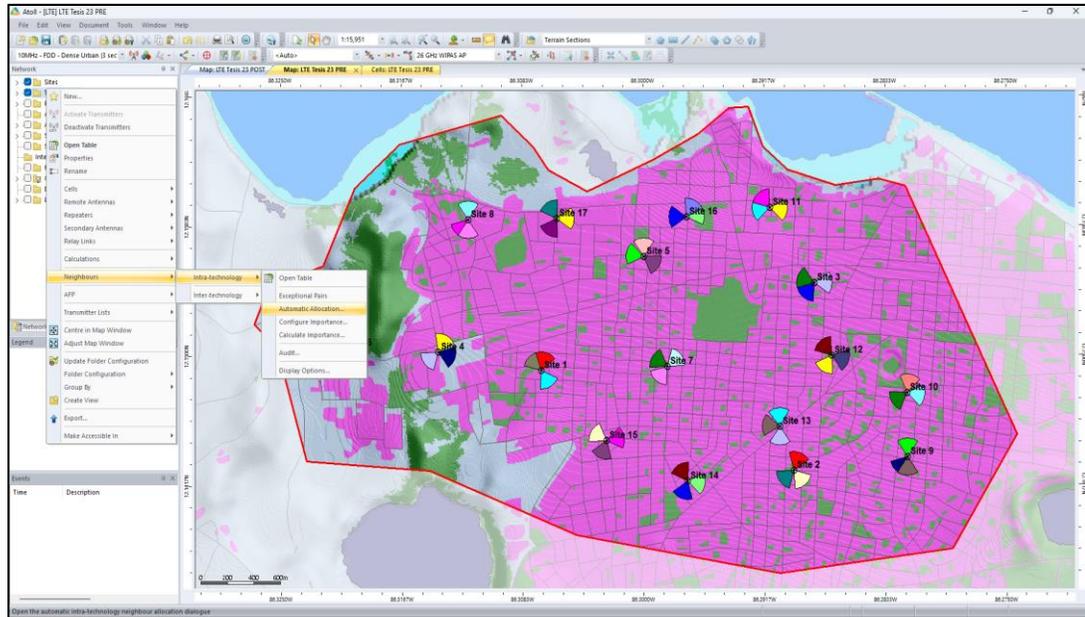
Site	Transmitter	Active	Transmitter Type	Antenna	Height (m)	Azimuth (°)	Mechanical Down tilt
Site 1	Site 1_71	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	27	15	5
Site 1	Site 1_72	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	27	150	5
Site 1	Site 1_73	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	27	320	5
Site 10	Site 10_21	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	24	10	2
Site 10	Site 10_22	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	24	100	2
Site 10	Site 10_23	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	24	240	2
Site 11	Site 11_21	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	24	320	0
Site 11	Site 11_22	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	24	100	0
Site 11	Site 11_23	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	24	260	0
Site 12	Site 12_21	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	24	320	3
Site 12	Site 12_22	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	24	110	-4
Site 12	Site 12_23	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	24	210	3
Site 13	Site 13_71	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	30	355	8
Site 13	Site 13_72	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	30	180	6
Site 13	Site 13_73	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	30	275	6
Site 14	Site 14_21	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	24	330	0
Site 14	Site 14_22	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	24	100	0
Site 14	Site 14_23	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	24	200	0
Site 15	Site 15_71	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	24	300	0
Site 15	Site 15_72	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	24	80	0
Site 15	Site 15_73	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	24	200	0
Site 16	Site 16_71	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	24	28	0
Site 16	Site 16_72	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	24	80	1
Site 16	Site 16_73	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	24	270	0
Site 17	Site 17_21	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	21	210	0
Site 17	Site 17_22	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	21	330	0
Site 17	Site 17_23	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	21	90	0
Site 2	Site 2_21	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	33	20	3
Site 2	Site 2_22	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	33	140	3
Site 2	Site 2_23	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	33	230	3
Site 3	Site 3_21	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	30	290	0
Site 3	Site 3_22	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	30	90	0
Site 3	Site 3_23	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	30	220	0
Site 4	Site 4_21	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	30	25	2
Site 4	Site 4_22	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	30	110	0
Site 4	Site 4_23	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	30	230	0
Site 5	Site 5_21	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	27	0	0
Site 5	Site 5_22	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	27	120	0
Site 5	Site 5_23	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	27	280	0
Site 6	Site 6_21	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	30	280	0
Site 6	Site 6_22	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	30	110	0
Site 6	Site 6_23	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	30	170	3
Site 7	Site 7_21	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	31	50	1
Site 7	Site 7_22	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	31	220	0
Site 7	Site 7_23	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	31	300	2
Site 8	Site 8_71	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	25	0	0
Site 8	Site 8_72	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	25	180	0
Site 8	Site 8_73	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	25	220	0
Site 9	Site 9_21	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	24	0	0
Site 9	Site 9_22	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	24	180	0
Site 9	Site 9_23	✓	Intra-network (Server and Interferer)	JL +45 Port_1920_CO_2T	24	220	0

La configuración de los transmisores permitirá la transmisión a los equipos de los usuarios que estén recibiendo señal de cada transmisor de la red según la zona en la que se encuentren, Los valores de altura (m), Azimut y Tilt Mecánico son relativos debido a que cada transmisor de cada sector varía su valor según el tráfico de usuarios de la red y la propagación de la señal, cabe destacar que estos valores son parte esencial de la optimización.

**Tabla 13. Configuración de la tabla Cell en ATOLL®**

	1	2	3
Name	Site 1_71(0)	Site 1_21(1)	Site 1_41(2)
Active	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Cell Type	LTE;LTE-A PCell;LTE-A SCell DL	LTE;LTE-A PCell;LTE-A SCell DL	LTE;LTE-A PCell;LTE-A SCell DL
Frequency Band	E-UTRA Band 2 - 20MHz	E-UTRA Band 2 - 20MHz	E-UTRA Band 2 - 20MHz
Channel Number	700	900	1,100
Channel Allocation Status	Allocated	Allocated	Allocated
Physical Cell ID	3	3	3
PSS ID	0	0	0
SSS ID	1	1	1
PSS ID status	Allocated	Allocated	Allocated
SSS ID status	Allocated	Allocated	Allocated
Max Power (dBm)	53	53	53
Min RSRP (dBm)	-114	-114	-114
Max Noise Rise (UL) (dB)	6	6	6
Max PUSCH C/(I+N) (dB)	20	20	20
Frame configuration	Default 100 RB	Default 100 RB	Default 100 RB
TDD subframe configuration	0 - DSUUU-DSUUU	0 - DSUUU-DSUUU	0 - DSUUU-DSUUU
Scheduler	Proportional Fair	Proportional Fair	Proportional Fair
Diversity Support (DL)	Transmit Diversity;SU-MIMO;AAS;MU-MIMO	Transmit Diversity;SU-MIMO;AAS;MU-MIMO	Transmit Diversity;SU-MIMO;AAS;MU-MIMO
Diversity Support (UL)	Receive Diversity;SU-MIMO	Receive Diversity;SU-MIMO	Receive Diversity;SU-MIMO
Number of co-scheduled MU-MIMO users (DL)	2	2	2
Number of co-scheduled MU-MIMO users (UL)	2	2	2
Max Traffic Load (DL) (%)	100	100	100
Max Traffic Load (UL) (%)	100	100	100
Max number of inter-technology neighbours	32	32	32
Neighbours	...	...	...

Para la configuración de parámetros de la plantilla Cells en ATOLL® se debe de tomar en consideración lo siguiente: el PCI, el tipo de la celda, números de canales, layer, máxima potencia y la banda de frecuencia, el tipo de antena especificada según las características apropiadas para la tecnología de radio en este caso es la del modelo QUAD BAND.



**Figura 49. Asignación de vecinas para sitios.**

La asignación de vecinas para cada sitio (ver figura 49), se puede realizar mediante una tabla en Excel luego que tenemos declaradas las posibles vecinas nombradas por sector y plasmadas en un archivo txt. pasamos a hacer los siguientes pasos:

1. Click en network
2. Clic derecho en transmitters, ahí mismo seleccionamos Neighbours.
3. Seleccionamos el intra-technology y después en Automatic Allocation.
4. Luego nos aparecerá la ventana Automatic Neighbour Allocation.
5. Por último, clic en calcúlate.

## 5.6 Elección del modelo de propagación SPM.

Como ya se ha dicho, un modelo de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas y algoritmos usados para representar las características radio de propagación de un ambiente dado. Observando las características de los modelos de propagación que nos proporciona ATOLL®, se ha optado por la elección del Modelo de propagación estándar (**Standar Propagation Model – SPM**). El SPM es un modelo (deducido a partir de la fórmula de Hata) especialmente indicado para las predicciones en frecuencias que oscilan entre 150 MHz y 3500 MHz y para largas distancias ( $1 \text{ Km} < d < 20 \text{ Km}$ ). Además, diversos estudios corroboran que es muy adecuado para GSM900/1800, UMTS, CDMA2000, WiMAX y LTE [16].

Este modelo utiliza el perfil del terreno, los mecanismos de difracción (calculados de varias maneras) y tiene en cuenta las clases de ocupación del suelo (Clutter) y las alturas efectivas de las antenas con el fin de calcular la pérdida de trayectoria (path loss). Por lo tanto, suele ser el modelo idóneo para la realización de este trabajo monográfico.

## 5.7 Características del Modelo de propagación – SPM.

El modelo de propagación estándar (SPM) considera para calcular la pérdida por trayectoria, los siguientes elementos: frecuencia de operación, tipo de área (urbana, suburbana, rural etc.), geografía del terreno (relieve, vegetación, clima etc.) y la altura de la antena del Tx y Rx. El SPM se basa en la siguiente fórmula:

$$PR = PTX - PLOSS$$

$$PLOSS = [ K1 + K2 * \text{Log}(d) + K3 * \text{Log}(HT_{\text{xeff}}) + K4 * \text{DiffractionLoss} + K5 * \text{Log}(d) * \text{Log}(HT_{\text{xeff}}) + K6 * HR_{\text{xeff}} + K7 * \text{Log}(HR_{\text{xeff}}) + K_{\text{clutter}} * F(\text{clutter}) + K_{\text{hill, LOS}} ]$$

Formula del modelo de propagación estándar (3) [16].

**Dónde:**

- **PR:** potencia recibida (dBm)
- **PTx:** potencia transmitida (EIRP) (dBm)
- **K1:** constante de desplazamiento (dB)
- **K2:** factor múltiplo de log(d)
- **d:** distancia entre el transmisor y el receptor (m)
- **K3:** factor múltiplo de log (HT<sub>xeff</sub>)
- **HT<sub>xeff</sub>:** altura efectiva de la antena transmisora (m)
- **K4:** factor múltiplo de la difracción calculada. K4 debe ser un número positivo.
- **DIFRACCIÓN:** pérdida debido a la difracción de más de una trayectoria obstruida (dB)
- **K5:** factor múltiplo para log (HT<sub>xeff</sub>)log(d)
- **K6:** factor múltiplo de HR<sub>xeff</sub>
- **K7:** factor de múltiplo de log (HR<sub>xeff</sub>)
- **HR<sub>xeff</sub>:** altura de antena receptora (m)
- **K<sub>clutter</sub>:** factor múltiplo de f(clutter)
- **F (clutter):** promedio de las pérdidas ponderadas en el clutter
- **K<sub>hill,LOS</sub>:** factor correctivo para zonas montañosas (=0 en caso de NLOS)

Como podemos observar la fórmula del SPM define la variación entre la potencia de transmisión y la potencia de recepción considerando todas las

pérdidas como elemento de radiación y geografía del terreno durante el desplazamiento de la onda.

Los elementos considerados por el modelo SPM para la propagación son:

- Frecuencia de operación.
- Distancia entre Tx y el Rx.
- Tipo de área (Urbana, Suburbana, Rural).
- Geografía del terreno (Relieve, Vegetación, Clima).
- Altura efectiva de la antena Tx y Rx.

**Tabla 14. Rango de los valores de K [16].**

<b>Constantes</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
K1	0	100
K2	20	70
K3	-20	20
K4	0	1
K5	-10	0
K7	-10	0

### **5.7 Algoritmo de calibración del Modelo de propagación estándar - SPM con el módulo CW Measurement de ATOLL®.**

ATOLL®, contempla el módulo CW (Continuos Wave) Measurement que consiste en permitir al usuario importar valores de medición recolectadas mediante un (DT) por un único transmisor a una frecuencia dada de onda continua (CW) y utilizarlos para calibrar el SPM de forma automática.

El algoritmo que emplea el módulo CW Measurement se basa en la resolución de un problema de mínimos cuadrados calculando en término de la media cuadrática como lo expresa la ecuación:

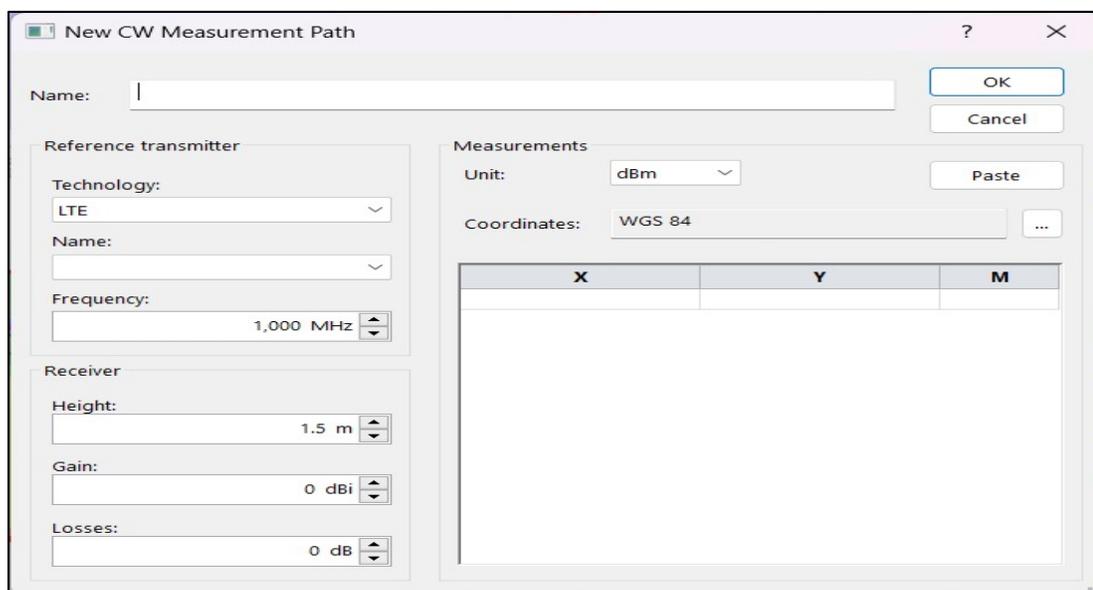
$$\mathbf{RMS} = \sqrt{\delta^2 + M^2}$$

- ❖ **RMS**= Media Cuadrática (dB).
- ❖ **M**= Mediciones CW (dBm).
- ❖ **δ** = Desviación estándar en (dB).

**Formula del modelo de propagación estándar (4) [16].**

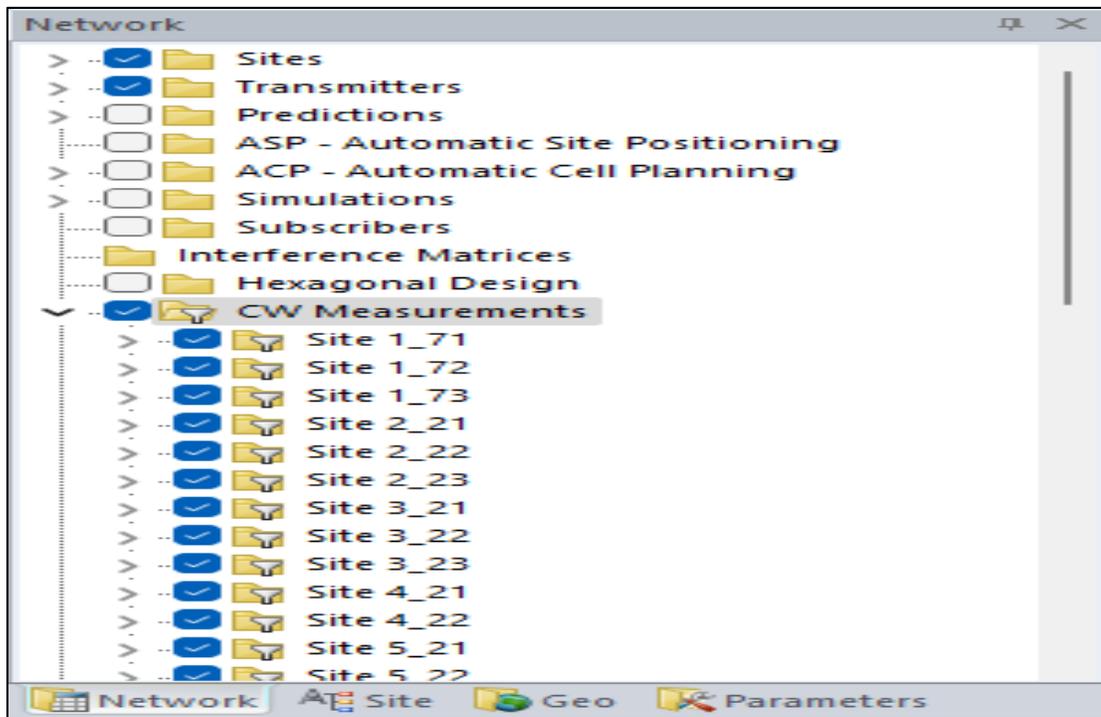
### **5.8 Calibración del Modelo de propagación estándar – SPM.**

Para la calibración de SPM se requieren mediciones de campo, luego se transforman los valores recolectados de la medición tales como Latitud, longitud, PCI y niveles de RSRP al formato TXT para ser importados en el módulo CW Measurement de ATOLL ver figura. Para la calibración del modelo de propagación estándar se diseñó la red LTE en ATOLL®, con parámetros iniciales.



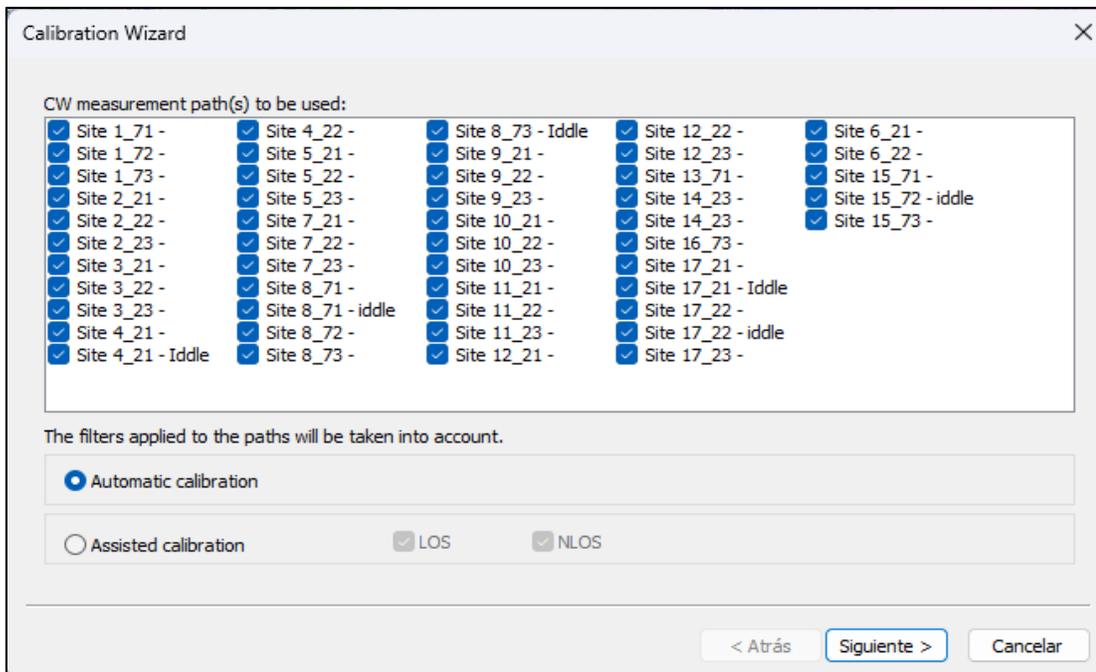
**Figura 50. Filtrado de mediciones.**

Una vez importado los niveles de la señal recolectados en el Drive test en la ventana CW Measurements se crean carpeta que contiene las mediciones que asociamos a cada transmisor como lo muestra la figura 50, además aparecen los niveles de señal de las mediciones introducidas en la ventana de trabajo de ATOLL®



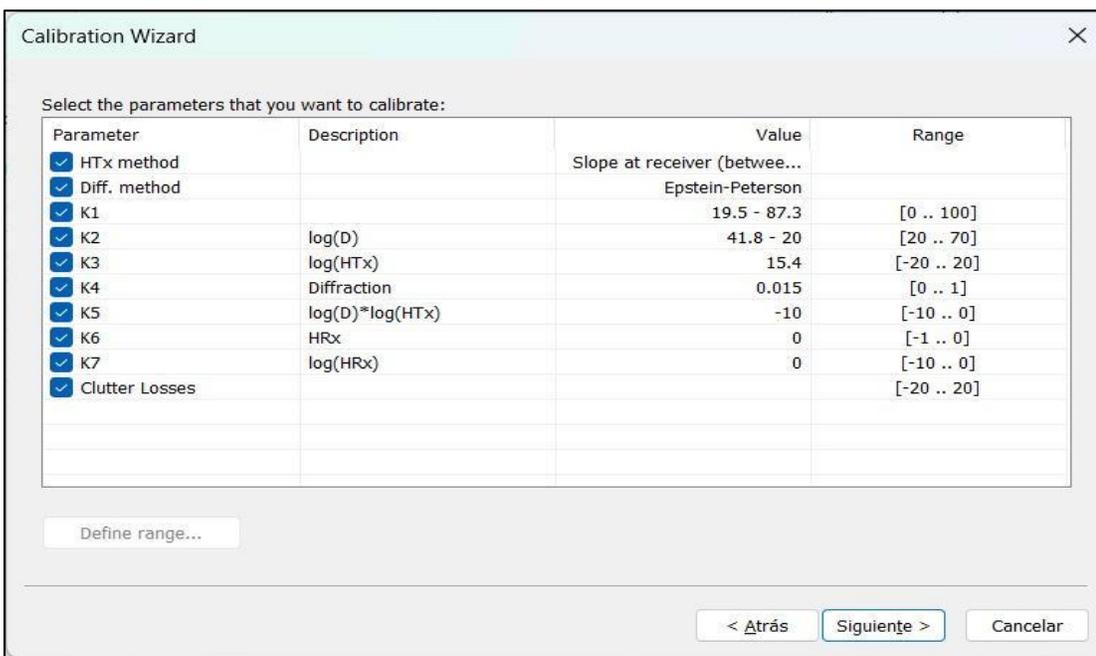
**Figura 51. Creación de mediciones.**

Después de haber importado los valores de la medición procedemos a seleccionar las mediciones con que queremos calibrar el modelo como lo muestra la figura 51, luego seleccionamos las constantes K que decíamos calibrar, para este caso las seleccionamos todas desde K1 hasta K7 como lo muestra la figura y luego ATOLL® comienza a realizar la calibración automática haciendo una relación entre los niveles de la señal de la predicción con los niveles de la señal del DT y calcula el error medio como lo muestra la figura, luego seleccionamos el modelo de propagación estándar y le damos calibrar y automáticamente ATOLL® realiza la calibración.



**Figura 52. Selección de mediciones a utilizar para la calibración.**

La figura 52 representa la selección de las mediciones de cada sitio que se realizaron en el DT previo.



**Figura 53. Selección de constantes a calibrar.**

La figura 53 nos permite visualizar como ATOLL toma los diferentes parámetros como: la constante de desplazamiento (dB), factor múltiplo de  $\log(d)$ , factor múltiplo de  $\log(HT_{\text{eff}})$ , factor múltiplo de la difracción calculada. K4 debe ser un número positivo, factor múltiplo para  $\log(HT_{\text{eff}}) \log(d)$ , factor múltiplo de  $HR_{\text{eff}}$  y factor de múltiplo de  $\log(HR_{\text{eff}})$  para poder calibrarlos.

The screenshot shows a 'Calibration Wizard' dialog box with two main sections: 'Results' and 'Statistics'.

**Results:**

Parameter	Description	Before	After
K1 (LoS)		19.5	29.1
K1 (NLoS)		87.3	100
K2 (LoS)	$\log(D)$	41.8	45.4
K2 (NLoS)	$\log(D)$	20	21.7
K3	$\log(HTx)$	15.4	19.6
K4	Diffraction	0.015	0
K5	$\log(D)*\log(HTx)$	-10	-10
K6	HRx	0	0
K7	$\log(HRx)$	0	0

**Statistics:**

	Before	After
Root mean square	8.213	7.971
Mean error	1.319	0.004
Standard deviation	8.107	7.971

Buttons: Commit, Cancelar

**Figura 54. Calibración automática del SPM.**

Una vez calibrado cada uno de los parámetros como se muestra en la figura 54, ATOLL ® nos brinda los diferentes valores antes de calibrar y una vez ya calibrado a partir de los cuales se obtienen mejores valores en el Mean Error Global y la Desviación Estándar Global posterior a la calibración.

**Tabla 15. Comparación de los valores de “K” con el SPM por default y con el SPM calibrado.**

PARAMETROS	DESCRIPCION	VALORES DE K CON SPM POR DEFAULT	VALORES DE K CON SPM CALIBRADO
K1 LoS		19.5	29.1
K1 NLos		87.3	100
K2 LoS	Log (D)	41.8	45.4
K2 NLos	Log (D)	20	21.7
K3	Log (HTx)	15.4	19.6
K4	Diffraction	0.015	0
K5	Log (D)* Log (HTx)	-10	-10
K6	HRx	0	0
K7	Log (HRx)	0	0

**Tabla 16. Comparación antes y después de la calibración para el Mean Error Global y la desviación estándar global.**

	Antes	Después
<b>Mean Error Global</b>	1.319	0.004
<b>Desviación Estándar Global</b>	8.107	7.971

Al contar con dos conjuntos de datos, uno el conjunto de datos del drive test y el otro el conjunto de las predicciones de nivel de señal, ATOLL® calcula muestra a muestra el error y genera una nueva columna de datos con la diferencia existente en ambos conjuntos y extrae el mean error de todas las muestras calculadas, posteriormente al conocer la ubicación exacta del TX y RX comienza

a calcular la distancia entre ambos bajo la siguiente condición, Si la distancia Tx-Rx es mayor que la distancia máxima que es igual a cero, el receptor se considera lejos del transmisor y asigna valores en el rango aceptable para las constantes K1 y K2 NLOS y si la distancia Tx-Rx es menor que la distancia máxima definida por el usuario se considera cerca del Tx y asigna valores para las constantes K1 y K2 LOS, finalmente que se han considerados todos los elementos de propagación ATOLL busca los valores más adecuado para cada constante K.

La calibración global de los 17 sitios permitió obtener un error medio global menor a 1 dB que fue de 0.004 dB y una desviación estándar menor a 8 dB la cual fue de 7.971 dB a como se muestra en la tabla 16. Una vez que el modelo se ajustó los niveles de la señal de referencia proporcionados en la predicción son muy similares a los niveles de la señal recolectados en el DT.

### **Comparación de las pérdidas por clúster con el modelo de propagación estándar SPM sin calibrar y calibrado**

Como podemos ver en la tabla 17 donde después de la calibración ya existe una pérdida calculada la cual hace que al utilizar el modelo calibrado en las predicciones sean muy aproximadas a la realidad pues ya han sido calculadas las pérdidas de propagación del entorno donde trabajaremos. Cuando se realiza la calibración del SPM son calculadas las pérdidas del clutter.

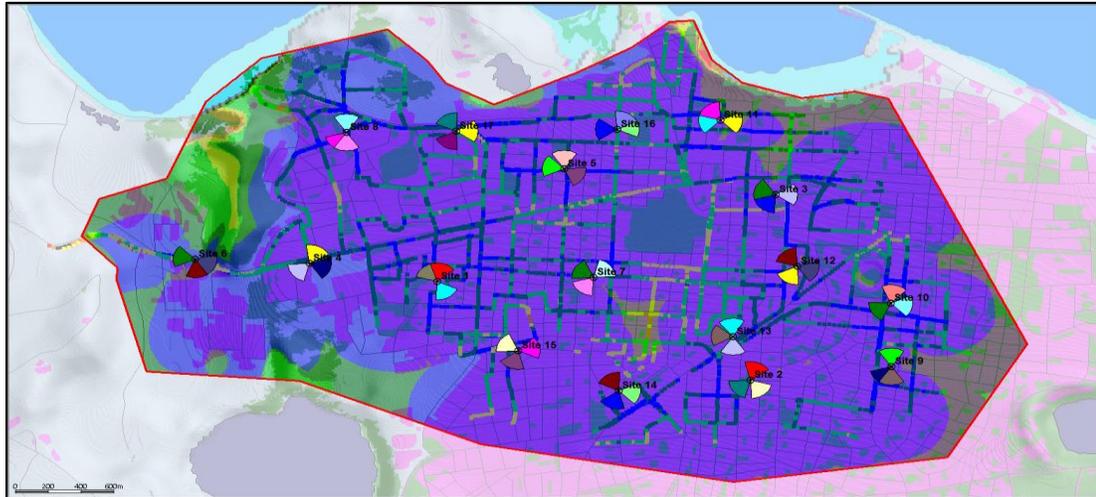
**Tabla 17. Comparación de las pérdidas del Clutter**

**(A) SPM Calibrado**

**(B) SPM por Default**

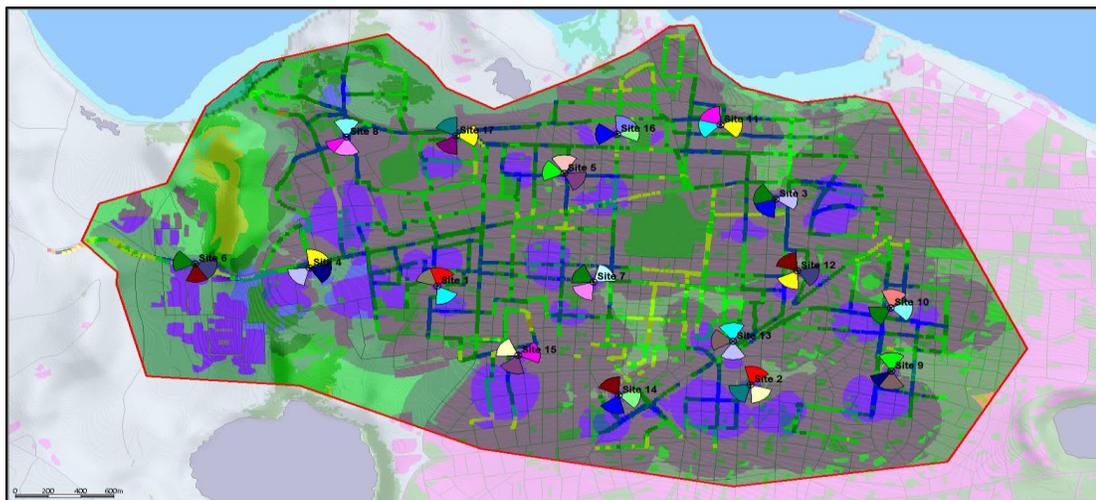
	Losses (dB)	Clearance (m)	RX height (m)		Losses (dB)	Clearance (m)	RX height (m)
0 - unclassified (0m)	0	10	(default)	0 - unclassified (0m)	0	10	(default)
1 - open (0m)	0	10	(default)	1 - open (0m)	-9.89	10	(default)
2 - sea (0m)	0	10	(default)	2 - sea (0m)	0	10	(default)
3 - inlandwater (0m)	0	10	(default)	3 - inlandwater (0m)	0	10	(default)
4 - residential (0m)	0	10	(default)	4 - residential (0m)	-8.1	10	(default)
5 - meanurban (0m)	0	10	(default)	5 - meanurban (0m)	0	10	(default)
6 - denseurban (0m)	0	10	(default)	6 - denseurban (0m)	0	10	(default)
7 - buildings (0m)	0	10	(default)	7 - buildings (0m)	0	10	(default)
8 - village (0m)	0	10	(default)	8 - village (0m)	0	10	(default)
9 - industrial (0m)	0	10	(default)	9 - industrial (0m)	-20	10	(default)
10 - openinurban (0m)	0	10	(default)	10 - openinurban (0m)	-8.64	10	(default)
11 - forest (0m)	0	10	(default)	11 - forest (0m)	-5.31	10	(default)
12 - parks (0m)	0	10	(default)	12 - parks (0m)	-6.2	10	(default)
26 - denseurbanhigh (0m)	0	10	(default)	26 - denseurbanhigh (0m)	0	10	(default)
27 - blockbuildings (0m)	0	10	(default)	27 - blockbuildings (0m)	-10.13	10	(default)
28 - denseblockbuild (0m)	0	10	(default)	28 - denseblockbuild (0m)	0	10	(default)
29 - rural (0m)	0	10	(default)	29 - rural (0m)	0	10	(default)
30 - residhigh (0m)	0	10	(default)	30 - residhigh (0m)	-9.38	10	(default)
31 - dbbhigh (0m)	0	10	(default)	31 - dbbhigh (0m)	0	10	(default)
32 - bbhigh (0m)	0	10	(default)	32 - bbhigh (0m)	0	10	(default)
33 - denseurbanlow (0m)	0	10	(default)	33 - denseurbanlow (0m)	0	10	(default)
34 - semiopenarea (0m)	0	10	(default)	34 - semiopenarea (0m)	0	10	(default)
35 - openwetarea (0m)	0	10	(default)	35 - openwetarea (0m)	0	10	(default)
36 - forestsparse (0m)	0	10	(default)	36 - forestsparse (0m)	0	10	(default)

La calibración global de los 17 sitios, se le aplico un computation zone como podemos observar en la figura 59 que es un filtro que nos permite recortar el área de predicción esto para proporcionar resultados únicamente en el área de interés e igualar el área de predicción al área donde se realizó el drive test y poder comparar los resultados de la predicción con el post-proceso debido a que ATOLL®, no proporciona resultados de predicción únicamente en el área del DT.



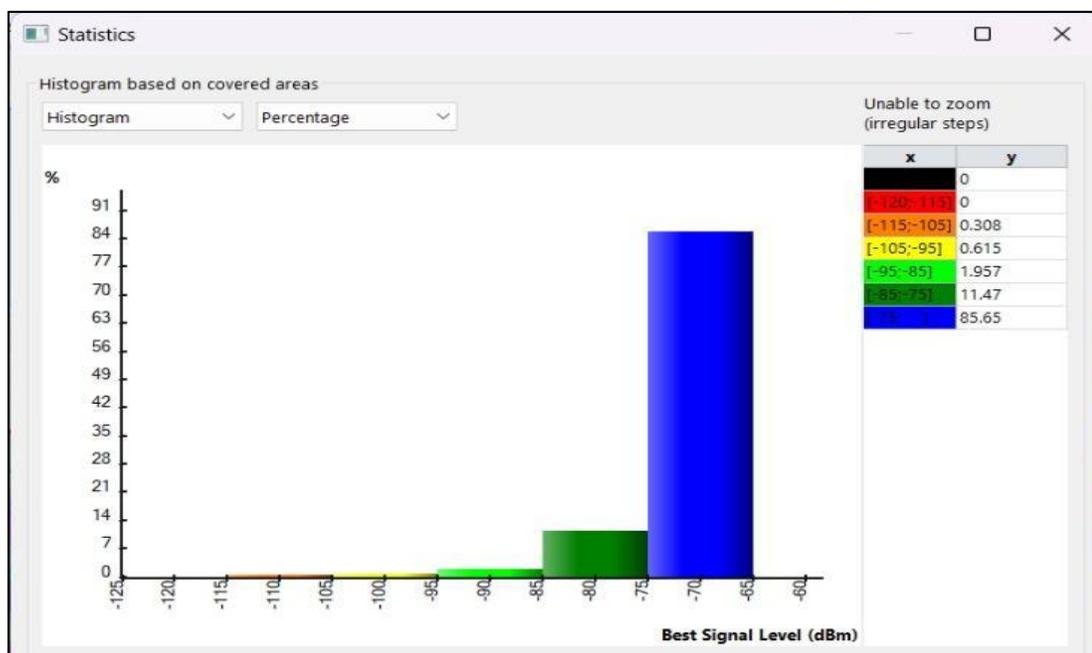
**Figura 55. Predicciones por Nivel de señal global: (A) SPM sin calibrar.**

La figura 55 representa las predicciones de los niveles de señal sin calibrar el modelo de propagación.



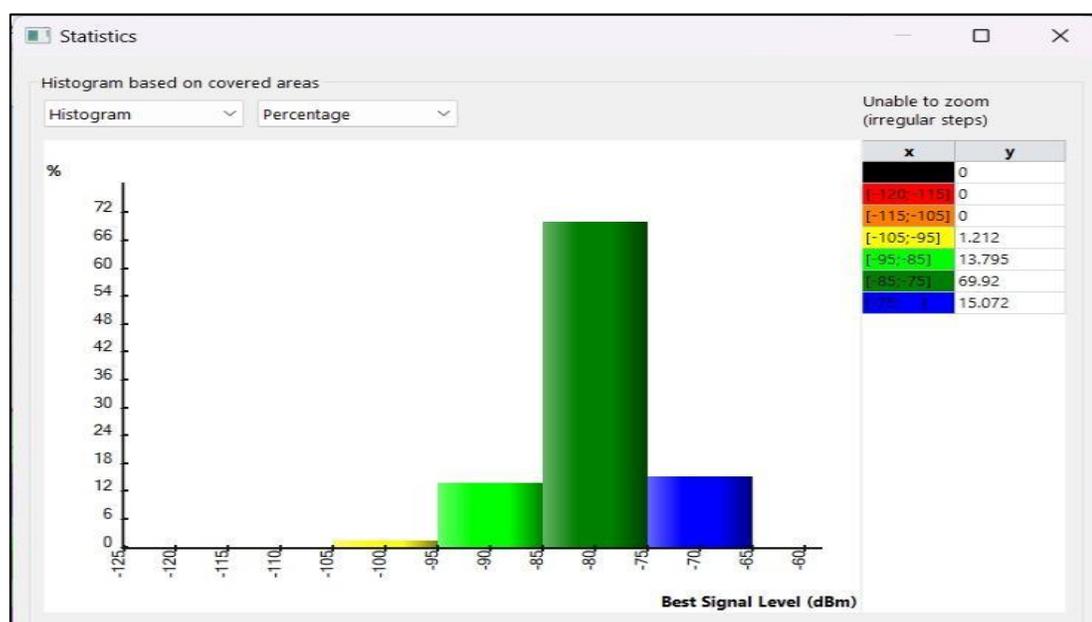
**Figura 56. Predicciones por Nivel de señal global: (B) SPM calibrado.**

La figura 56 representa las predicciones de los niveles de señal con un modelo de propagación calibrado.



**Figura 57. Histogramas de los niveles de señal: (A) SPM sin calibrar.**

La figura 57 representa las predicciones con el modelo SPM no calibrado los resultados son muy diferente a los niveles de la realidad obtenidos en el drive test, ya que con el modelo SPM no calibrado el porcentaje de nivel de señal  $\geq -75$  dBm es de 85.65 % del área de cobertura de la red de 17 sitios.



**Figura 58. Histogramas de los niveles de señal: (B) SPM calibrado.**

La figura 58 representa el modelo SPM calibrado. El porcentaje de nivel de señal  $\geq -75$  dBm es de 15.07 % del área de cobertura de la red de 17 sitios.

**Tabla 18. Comparación de resultados SPM no calibrado y SPM calibrado.**

	RANGOS	SPM NO CALIBRADO	SPM CALIBRADO
	-75, Max	85.65%	15.07%
	-85, -75	11.47%	69.92%
	-95, -85	1.95%	13.79%
	-105, -95	0.61%	1.21%
	-115, -105	0.30%	0%
	-120 -115	0%	0%
	Min, -120	0%	0%

La tabla 18 representa los rangos de las áreas de cobertura con el SPM no calibrado y el SPM calibrado con el porcentaje de cada uno.

El modelo de propagación estándar calibrado fue utilizado para las distintas predicciones ya que a partir de los resultados se optimizará la red LTE-A con el propósito de analizar el rendimiento del Throughput posteriormente.

### 5.6 Optimización de la red LTE – A con la herramienta ATOLL®.

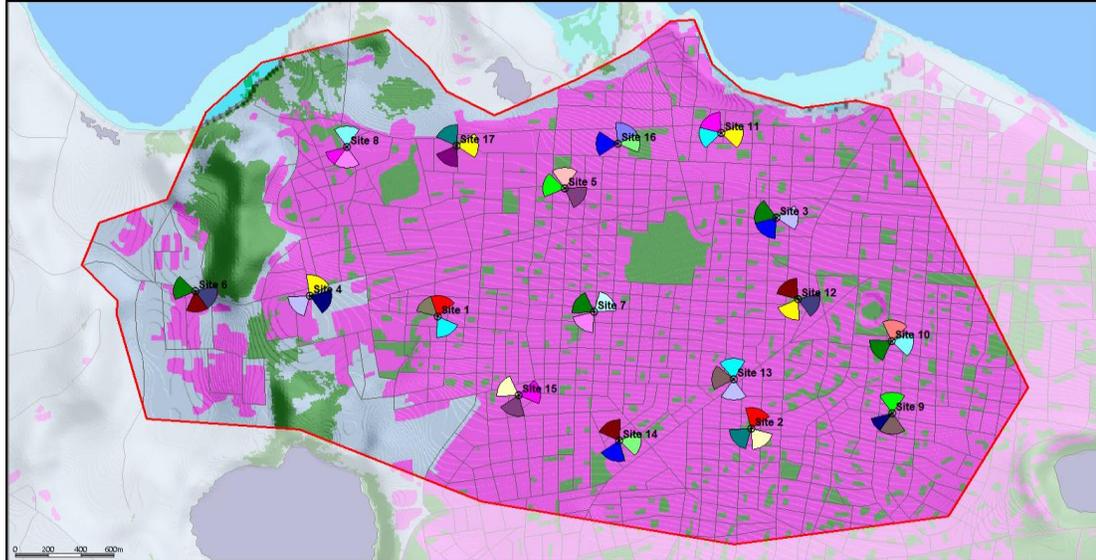
El proceso de optimización en redes móviles permite lograr mayores capacidades en las mismas y brindar servicios de mejor calidad a los suscriptores móviles. La optimización de redes móviles LTE-A consiste en reconfigurar parámetros de la red existente para lograr un mejor desempeño de esta. También,

en la optimización de redes LTE-A, es válido la ubicación de nuevos emplazamientos en los lugares donde se requieran [36].

En esta etapa el propósito de optimizar la red LTE-A en ATOLL®, es ejecutar distintas acciones de optimización mediante escenarios de simulaciones de inter-frecuencia e intra-frecuencia y las configuraciones de los parámetros obtenidos a partir de las predicciones en ATOLL®, analizando el desempeño de intensidad, calidad e interferencia (RSRP, RSRQ, SINR, CINR) y de la velocidad de datos mediante el parámetro de Down link Throughput.

Para realizar las predicciones y simulaciones se define el área de cálculo mediante computation zone. Esta opción permite realizar el análisis solo en la zona de interés y permite reducir el tiempo de cálculo. La figura 55 muestra la distribución de las estaciones base dentro del polígono correspondiente al área de estudio.

Para la optimización de la red LTE-A se realizaron tres tipos de predicciones que permiten analizar los niveles de la señal y la calidad de la señal. Cabe mencionar que todas las predicciones fueron realizadas con el modelo de propagación estándar calibrado anteriormente.



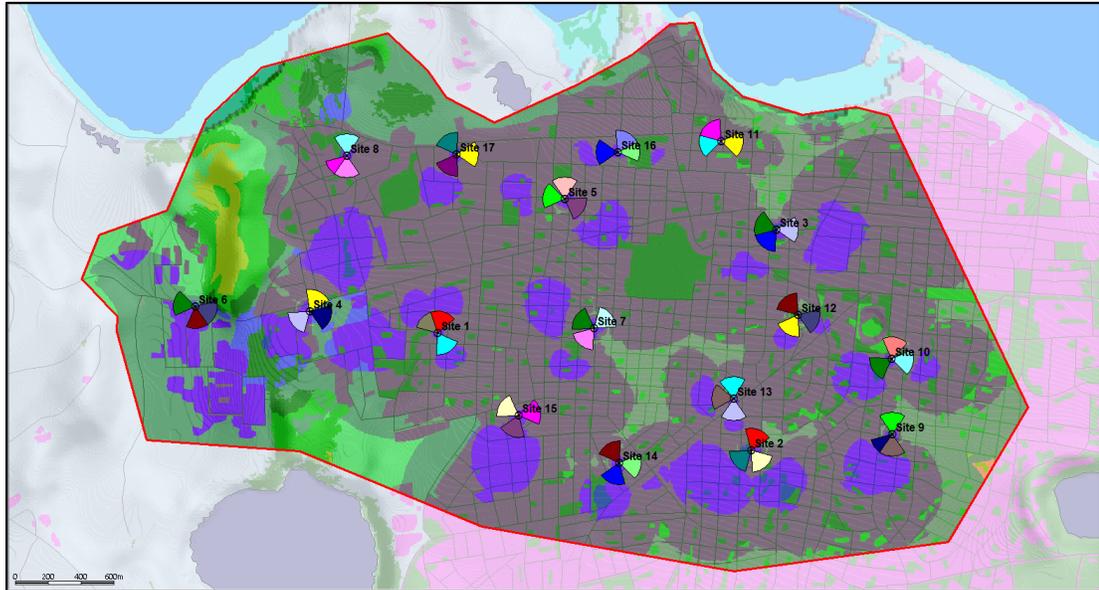
**Figura 59. Computation Zone de la red LTE-A.**

Para verificar la cobertura en la zona de análisis realizamos tres tipos de predicciones:

- ❖ Predicciones por niveles de señal.
- ❖ Predicciones por Overlapping Zone (DL).
- ❖ Predicciones por transmisores (DL).

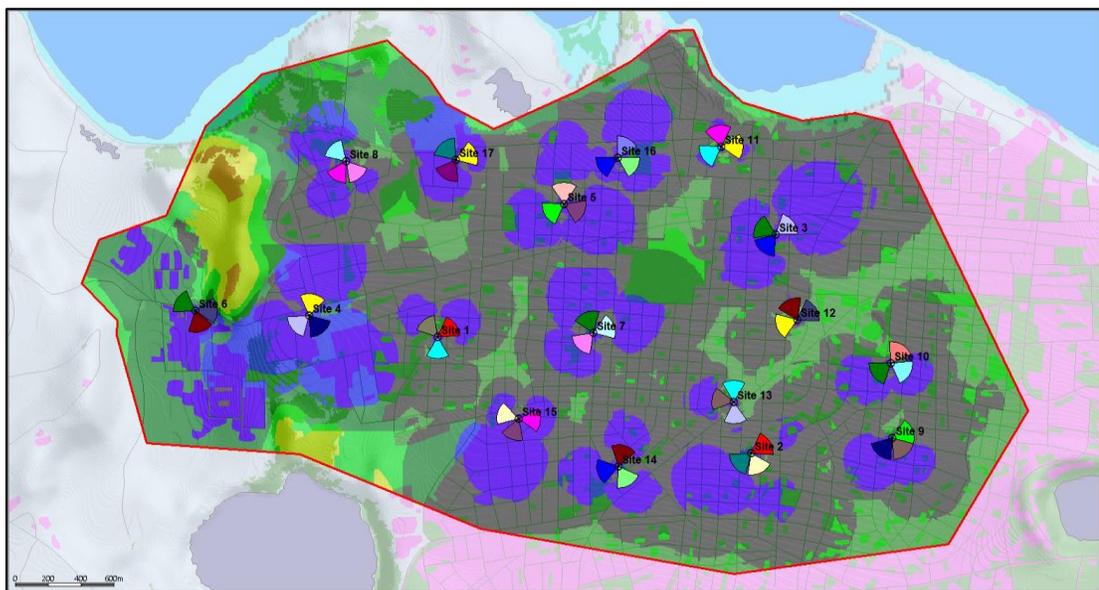
### **5.7 Predicciones de cobertura por nivel de señal:**

Permite predecir las zonas de cobertura según los niveles de señal del transmisor en cada píxel del mapa [36].



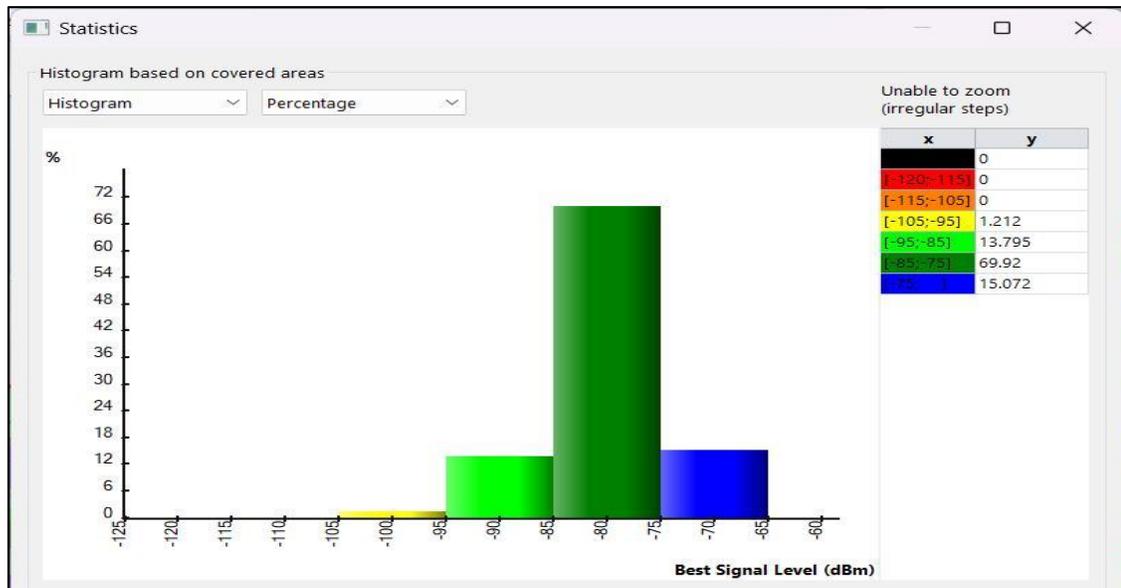
**Figura 60. Predicción Cobertura por nivel de señal; (A) Antes de la optimización.**

La figura 60 representa los niveles de señal antes de la optimización de la red LTE-A.



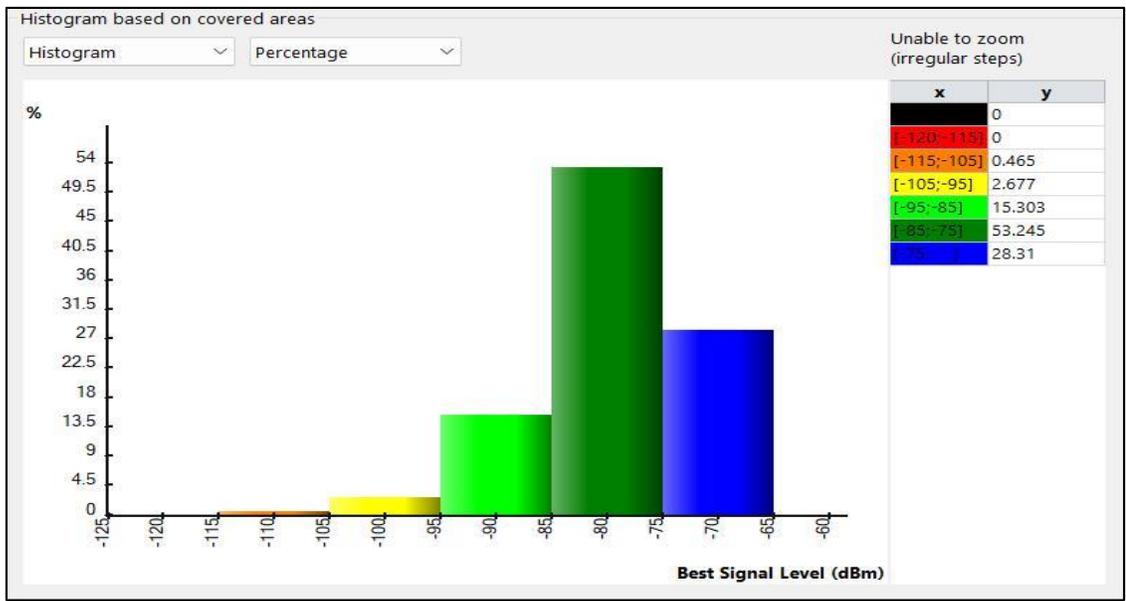
**Figura 61. Predicción Cobertura por nivel de señal; (B) Después de la optimización.**

La figura 61 representa los niveles de cobertura después de la optimización en la red LTE-A.



**Figura 62. Histograma de predicción de cobertura por nivel de señal: (A) Antes de la optimización.**

La figura 62 representa los niveles de señal antes de la optimización en forma de histograma con sus respectivas leyendas en el eje X.



**Figura 63. Histograma de predicción de cobertura por nivel de señal (B) Después de la optimización.**

Después de la optimización en la predicción de cobertura por nivel de señal como se muestra en la figura 63, los niveles de señal entre [-75; -85] se disminuyeron en un 16.675% en comparación con los obtenidos en la predicción antes de la optimización y los niveles entre [Max, -75] dBm aumentaron en un 13.27% esto permitirá tener mayor área de cobertura con mejores niveles de señal.

**Tabla 19. Comparación de resultados de las predicciones de cobertura por nivel de señal: (A) antes de la optimización, (B) después de la optimización.**

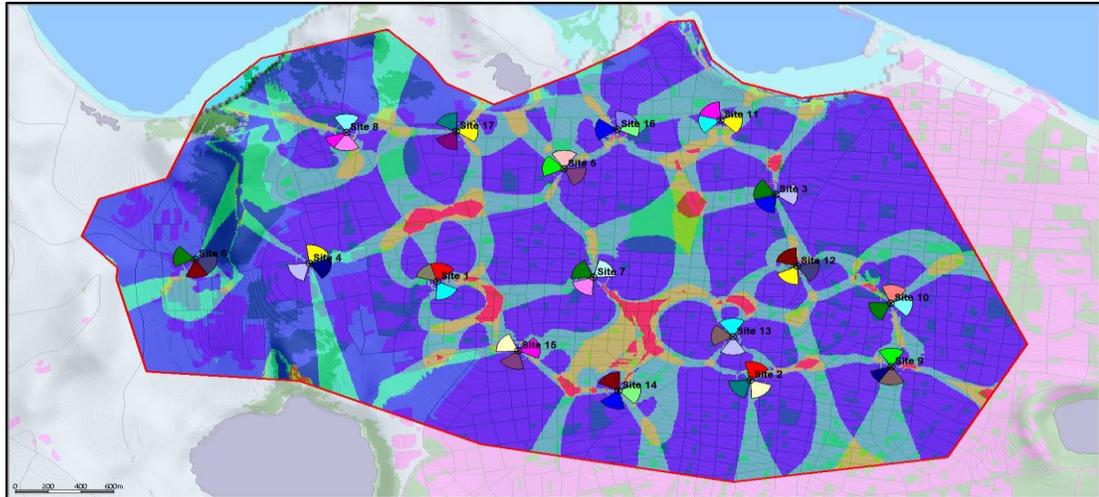
	<b>RANGOS</b>	<b>Coverage by Signal Level: (A)</b>	<b>Coverage by Signal Level: (B)</b>
	-75, Max	15.07%	28.31%
	-85, -75	69.92%	53.245%
	-95, -85	13.79%	15.303%
	-105, -95	1.21%	2.677%
	-115, -105	0%	0.465%
	-120 -115	0%	0%
	Min, -120	0%	0%

La tabla 19 representa los rangos de cobertura de los niveles de señal antes de la optimización (A) y después de la optimización (B).

### **5.8 Predicciones por Overlapping Zone.**

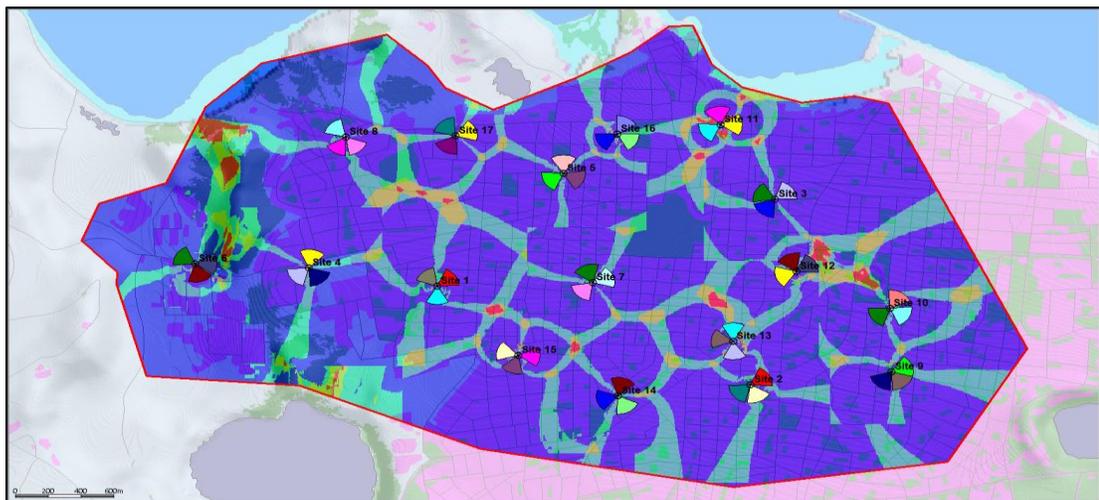
Permite calcular las áreas donde existe cobertura de dos o más transmisores [36]. Las predicciones de solapamiento deben cumplir con las siguientes condiciones:

- % del área con 4 o más servidores debe ser < 2%
- % del área con 2 o más servidores debe ser < 30%



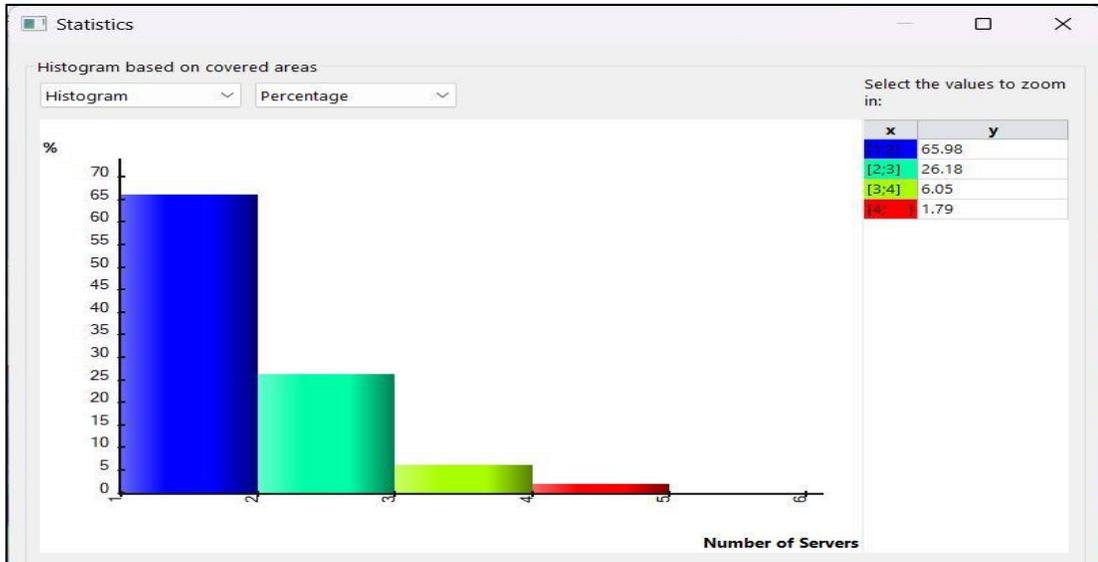
**Figura 64. Overlapping Zone: (A) Antes de la optimización.**

La figura 64 representa las predicciones overlapping zone antes de la optimización.



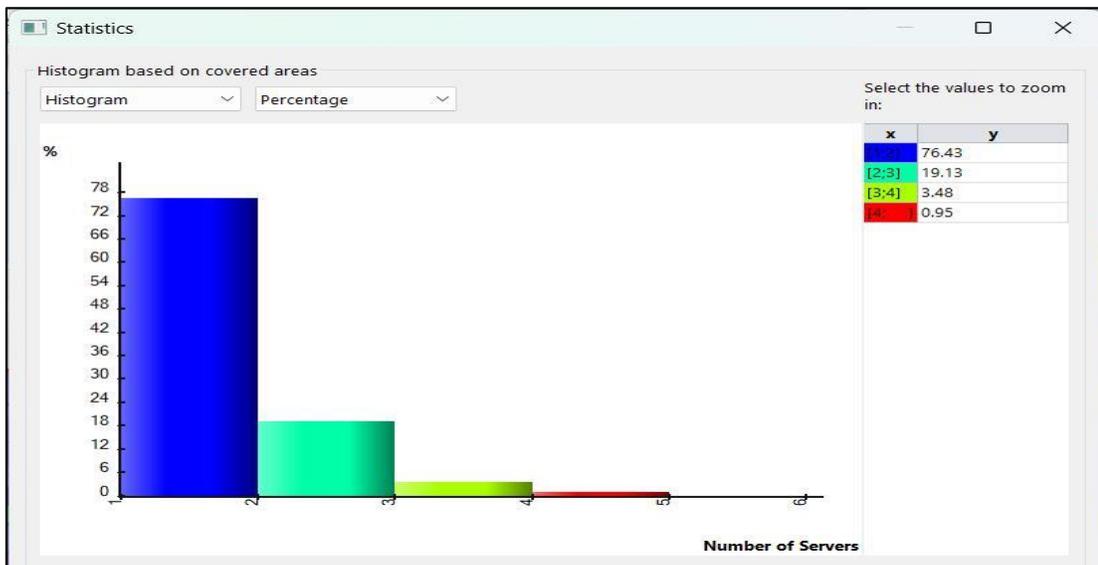
**Figura 65. Overlapping Zone: (B) Después de la optimización.**

La figura 65 representa las predicciones overlapping zone despues de la optimización.



**Figura 66. Histograma de predicción Overlapping Zones (DL); (A) Antes de la optimización.**

La figura 66 las predicciones de overlapping antes de la optimización en forma de histograma con sus respectivas leyendas en el eje X.



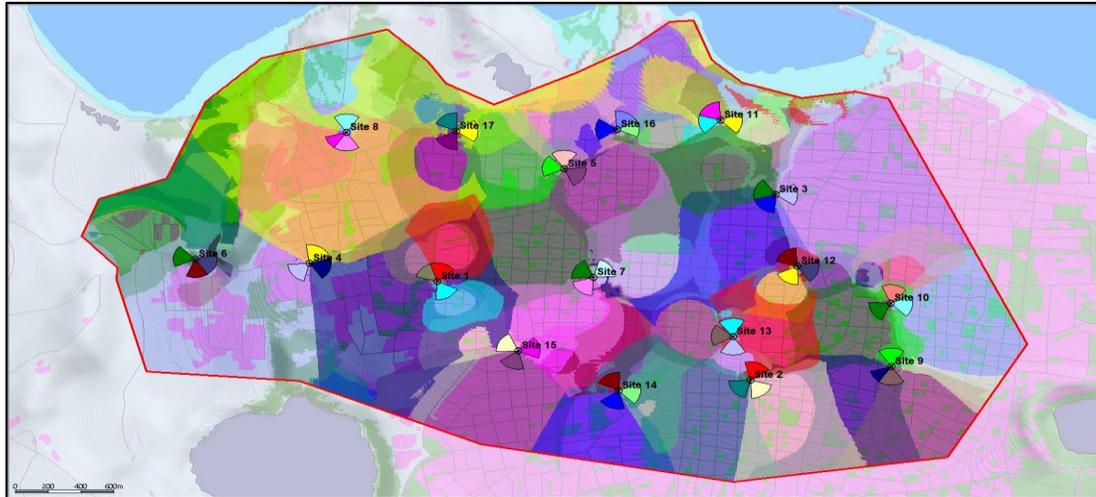
**Figura 67. Histograma de predicción Overlapping Zones (DL); (B) Después de la optimización.**

Las interferencias causadas por la presencia de cuatro o más transmisores en una zona dada pueden afectar significativamente el desempeño de una red, para este escenario no resulto ser así, esto debido a que los niveles del área de cobertura a como lo muestra la figura 67.

**Tabla 20. Comparación de resultados de las predicciones de Overlapping Zone: (A) antes de la optimización, (B) después de la optimización.**

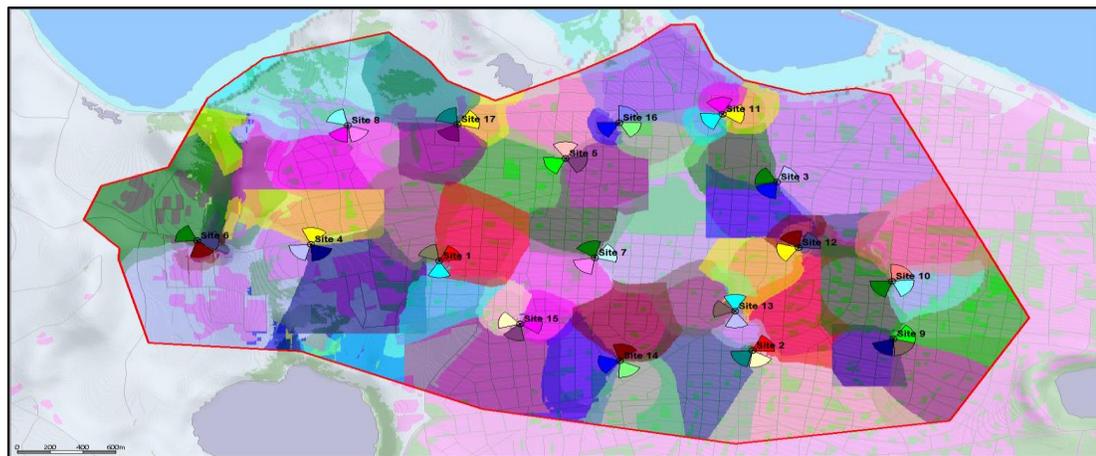
	Number of servers	Overlapping Zone: (A)	Overlapping Zone: (B)
	[1;2]	65.98%	76.43%
	[2;3]	26.18%	19.13%
	[3;4]	6.05%	3.48%
	[4;]	1.79%	0.95%

La tabla 20 muestra antes y después de la optimización cumple con la regla de que la zona con más de 4 transmisores debe de ser menor al 2% con un 1.79% antes de optimizarse y después de la optimización el porcentaje se redujo a un 0.95% tal y como se puede observar en el histograma de la figura 62 (B). El área de cobertura con 2 o más transmisores cumplió con la condición de ser menor del 30%, antes de optimizarse con un 26.18% y después de la optimización con un 19.13% respectivamente.



**Figura 68. Predicción por Transmisor (DL): (A) Antes de la optimización.**

La figura 68 representa las predicciones por transmisores antes de la optimización en Atoll.



**Figura 69. Predicción por Transmisor (DL): (B) Después de la optimización.**

En las predicciones por transmisores verificamos si el área de cobertura es la correspondiente a cada sector. Como podemos observar en la figura 69 (B) después de la optimización se eliminó la sobre propagación que existía antes de la optimización como podemos observar en la figura 68 (A) logrando así el correcto funcionamiento de cada sitio.

## **5.9 Predicciones de Calidad de la señal.**

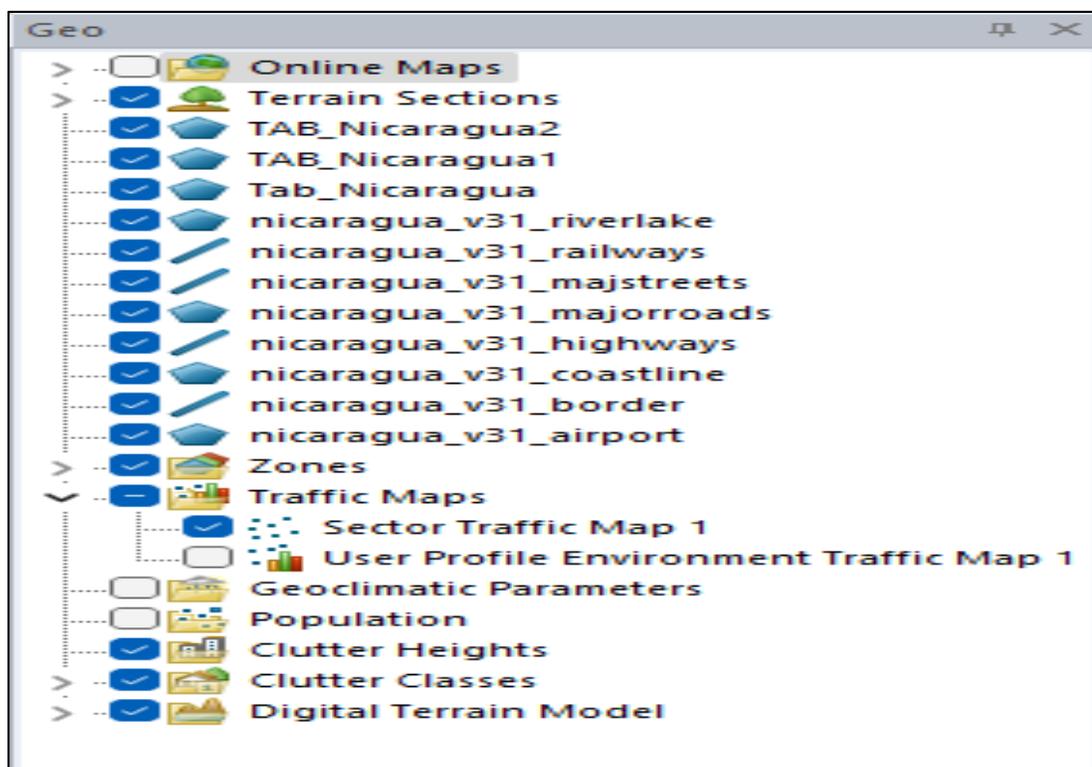
Para las predicciones de calidad es necesario establecer una carga de tráfico, los valores elegidos permiten a todos los usuarios tener servicio y acceso a la red. Cabe recalcar que mientras mayor sea la demanda menor son los usuarios que acceden a la red.

## **5.10 Simulaciones de Monte Carlo.**

Las simulaciones de ATOLL®, corresponden a una foto instantánea de la red para una distribución de usuarios dada. Los principales outputs de las simulaciones son la distribución geográfica de los usuarios con sus respectivas demandas de tráfico, la asignación de los recursos a cada uno de los usuarios simulados y las cargas de tráfico de las celdas. Para las predicciones de calidad de la señal además de crear mapa de tráfico se realizaron 100 simulaciones como se mostrarán posteriormente con el 50, 70 y 100 % de carga de tráfico en la red LTE-A.

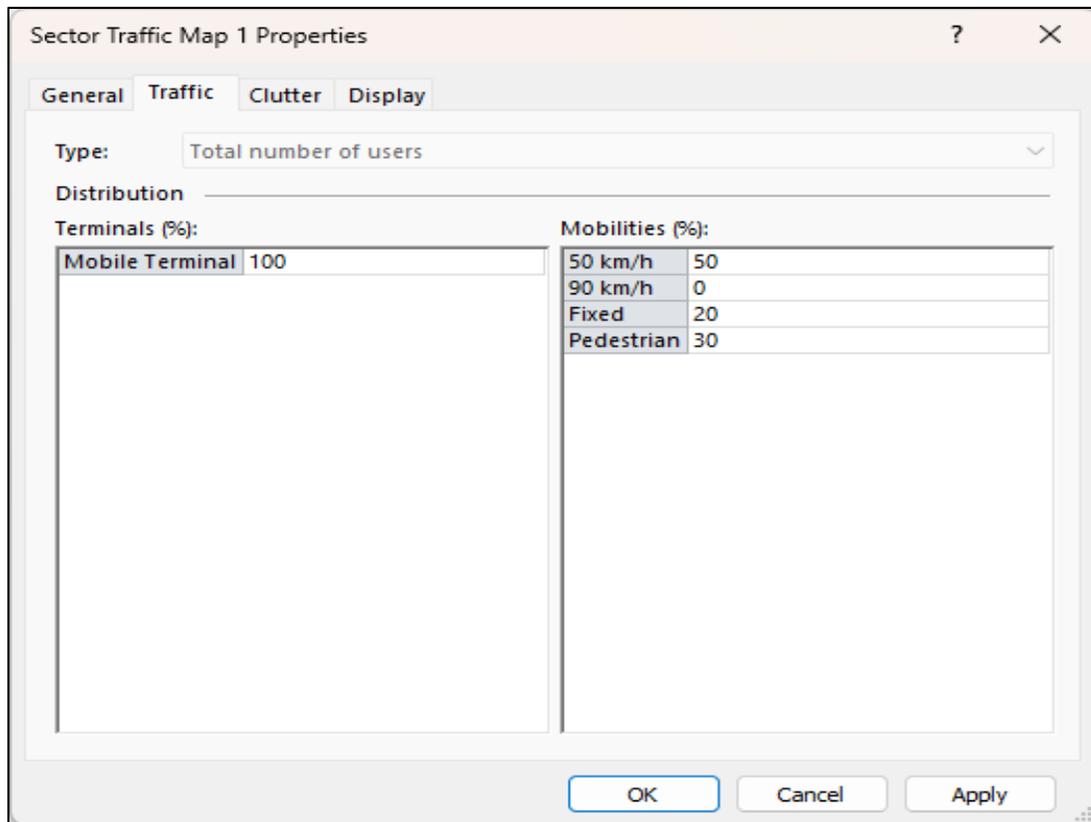
### **Procedimientos para realizar las simulaciones de Monte Carlo en una red LTE-A con la herramienta ATOLL®.**

Para realizar las simulaciones de Monte Carlo se necesita crear diferentes escenarios de tráfico (100 escenarios de simulaciones), para evaluar el desempeño de la red LTE-A; a continuación, se detallan los diferentes pasos a seguir para poder realizar dichas simulaciones.



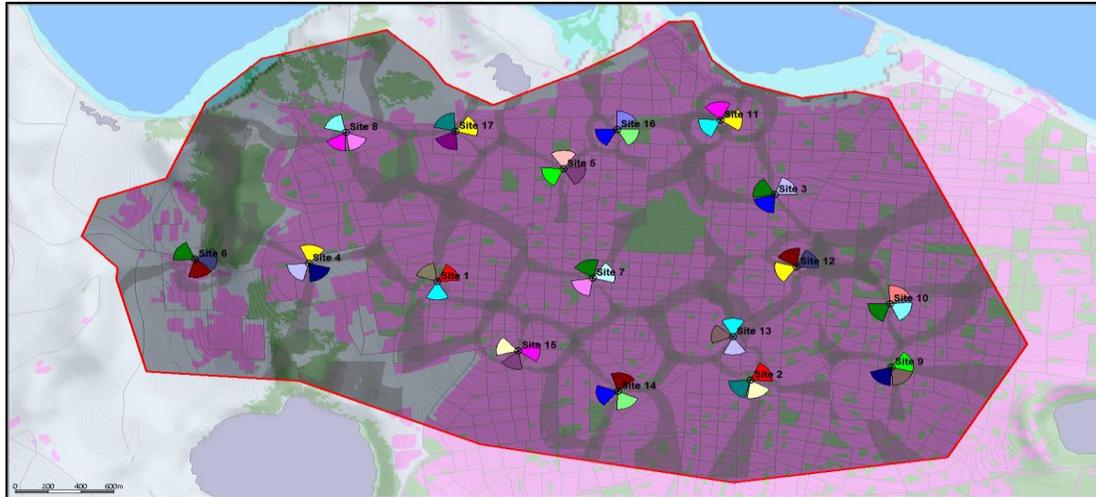
**Figura 70. Elección del Mapa tráfico.**

- **Paso 1:** elección del mapa de tráfico, para la creación del mapa de tráfico en ATOLL, seleccionamos la pestaña Geo de la ventana del explorador, crear un nuevo mapa de tráfico y vamos marcando sobre Sector Traffic Map 1 a como se muestra en la figura 70.



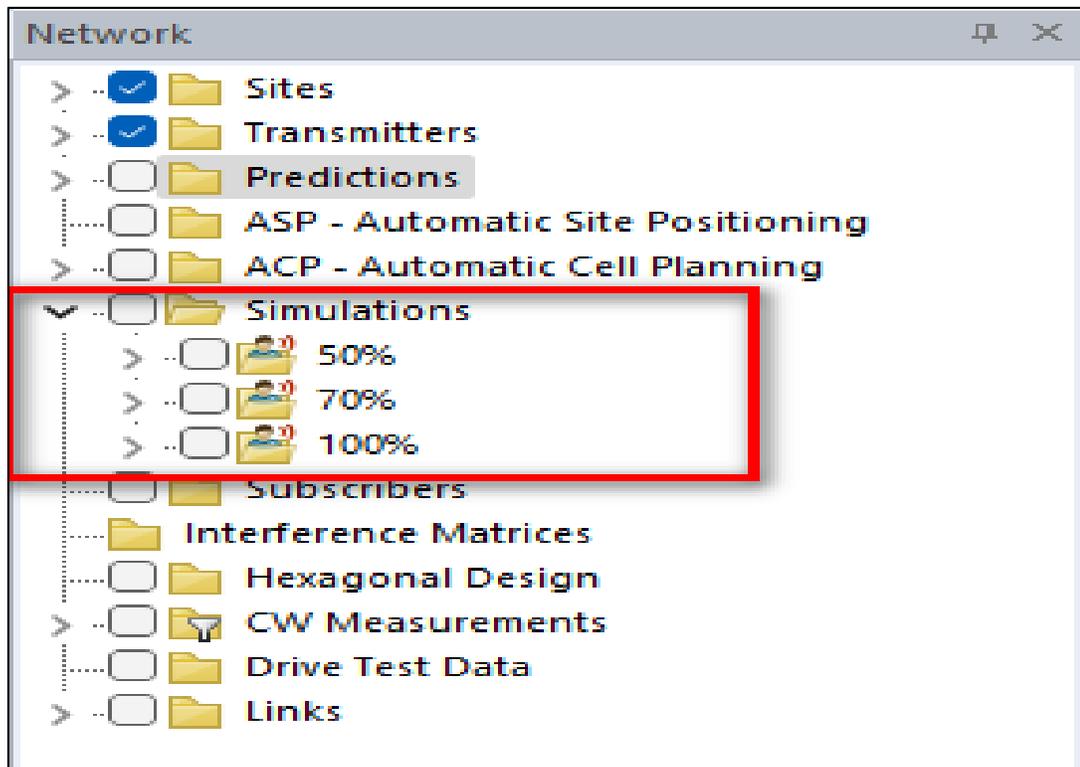
**Figura 71. Propiedades del Sector Traffic Map.**

- **Paso 2:** Estas son las propiedades del mapa de tráfico, seleccionamos Sector Traffic Map, aquí determinamos la movilidad de los usuarios o terminales, lo cual se observa el porcentaje de movilidad que se va a utilizar para los diferentes usuarios a como se muestra en la figura 71.



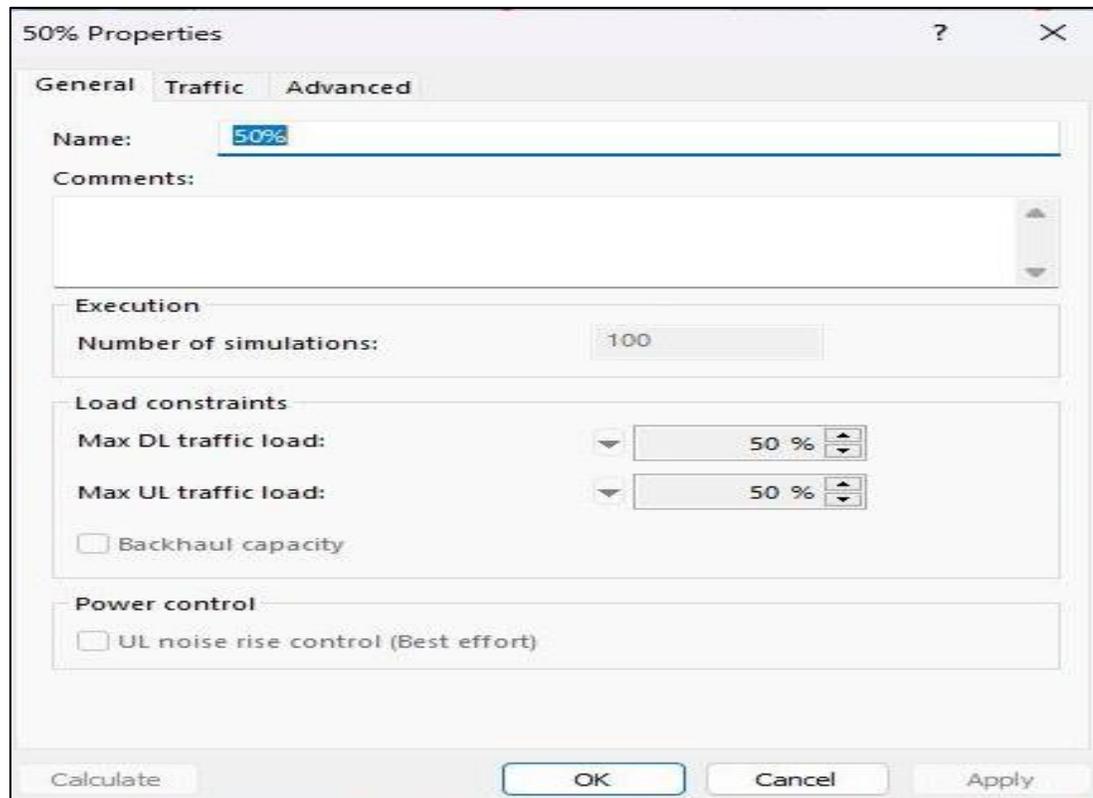
**Figura 72. Mapa del sector de tráfico del área de cobertura en la ciudad de Managua.**

- **Paso 3:** Mapa de tráfico, el cual constituye el área de cobertura en estudio en el cual se tomó en cuenta la configuración de los parámetros de tráfico generales que se utilizan como la movilidad de los usuarios anteriormente mencionado. El resultado es el que se muestra en la figura 72. Cobertura por transmisor, este tipo de mapa utiliza básicamente la cobertura proporcionada por el transmisor, la siguiente tabla representa en ATOLL la ubicación de los transmisores del clúster de la red LTE-A. En la columna de Mobile Internet Access indica el número de usuarios que va a utilizar cada transmisor. Se entiende que esto no quiere decir que estos usuarios se van a conectar precisamente a estos transmisores, si no que van a ocupar el espacio de cobertura de estos.



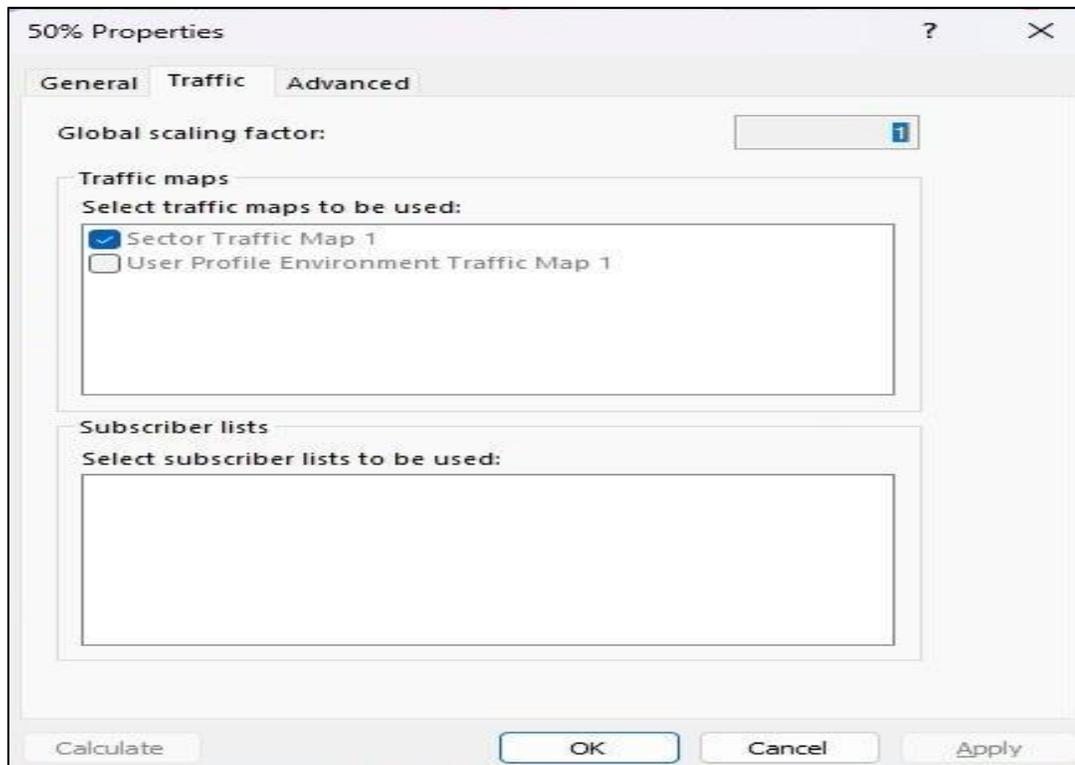
**Figura 73. Creación de las simulaciones de Monte Carlos.**

- **Paso 4:** Una vez ya hecho el mapa de tráfico, en la venta Network, nos encontramos con la opción de Simulation, acá es donde Atollo nos permite crear nuevas simulaciones de Monte Carlos. En la figura 73 se muestra las diferentes simulaciones creadas al 50, 70 y 100% de carga de tráfico.



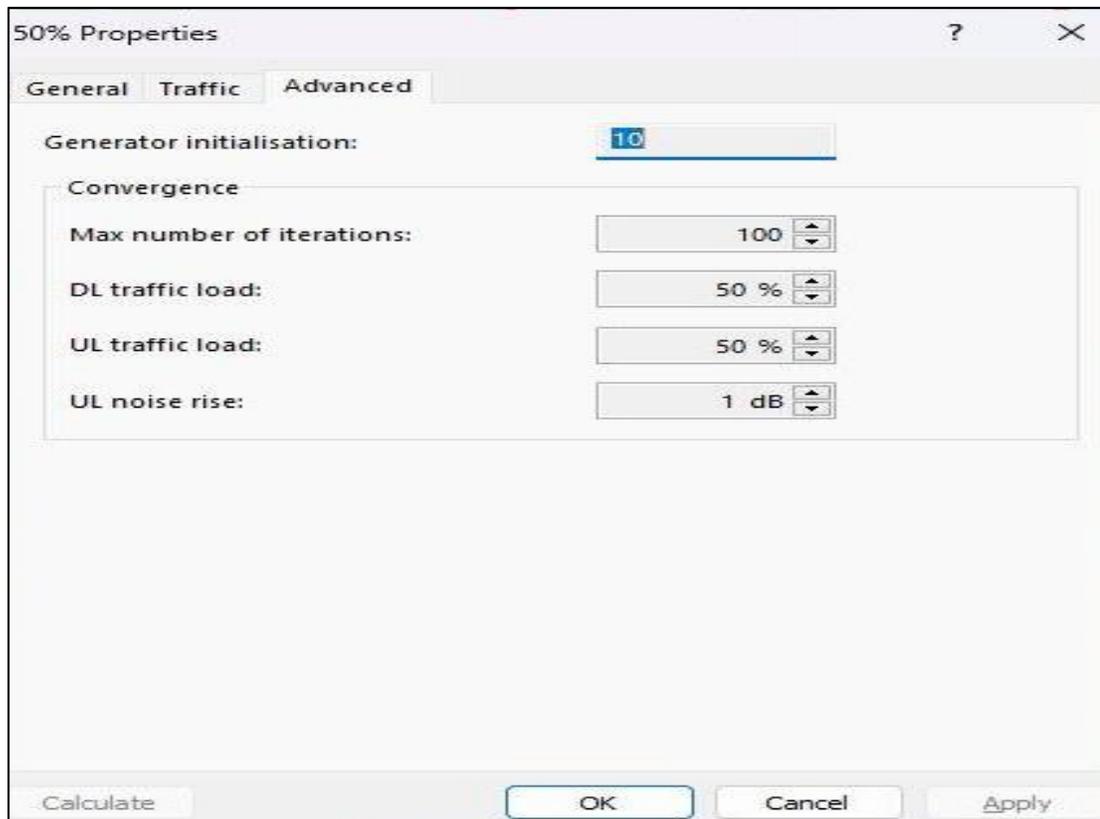
**Figura 74. Propiedades de las simulaciones en Monte Carlos – General.**

- **Paso 5:** A continuación, se muestra la opción de las propiedades de Monte Carlos. En la figura 74 se muestra las opciones generales de la simulación, donde se coloca la cantidad de simulaciones a realizar, la cantidad Max del tráfico, principalmente lo que interesa es el tráfico en descarga, porque es donde se aplica agregación de portadora.



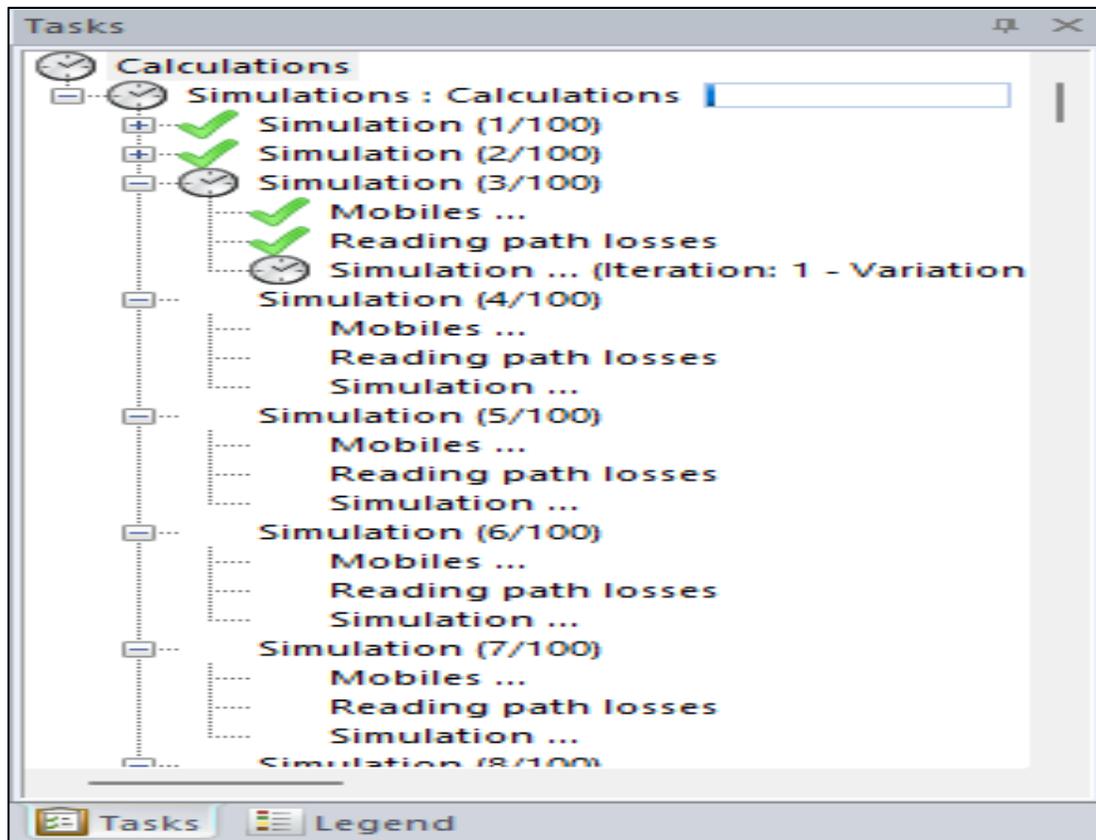
**Figura 75. Propiedades de las simulaciones en Monte Carlos – Traffic.**

- **Paso 6:** En esta pestaña se coloca el tipo de mapa de tráfico a utilizar. El Global scaling factor queda por defecto es 1 a como se muestra en la figura 75. Si se modifica el valor a más del valor por defecto, se modificará el mapa de tráfico, esto quiere decir la cantidad de usuarios se verá afectada.



**Figura 76. Propiedades de las simulaciones en Monte Carlos – Advanced.**

- **Paso 7:** La pestaña Advanced son las opciones avanzadas de la simulación, se coloca la cantidad de iteraciones del tráfico. No se debe confundir con las opciones generales donde se colocaba el Max tráfico, este sería el tráfico actual a simular. En la figura 76 se muestran el Generator initialisation, lo cual se refiere al proceso de configuración y preparación del generador de señales utilizado para simular las señales de radio en la planificación y diseño de redes de comunicación móvil.



**Figura 77. Proceso de ejecución de las simulaciones de Monte Carlo.**

- **Paso 8:** En la ventana Task, se muestra la ejecución de la simulación de Monte Carlo, en este caso se están ejecutando 100 simulaciones creadas en el escenario de 50% de tráfico a como se muestra en la figura 77. También se realizaron para los 70% y 100%.

### **5.11 Datos obtenidos a partir de las Cargas de Tráfico en las simulaciones de Monte Carlo.**

En la siguiente tabla se muestran las tablas de los datos obtenidos utilizando diferentes cargas de tráfico:

**Tabla 21. Datos obtenidos de las simulaciones de Monte Carlo con una carga de tráfico del 50% por sitios.**

<b>Simulación de Monte Carlo 50%</b>			
<b>Site</b>	<b>Peak RLC Cumulated Throughput (DL) (kbps)</b>	<b>Effective RLC Cumulated Throughput (DL) (kbps)</b>	<b>Cumulated Application Throughput (DL) (kbps)</b>
<b>Site 1</b>	321,578	315,958	315,958
<b>Site 2</b>	363,610	357,542	357,542
<b>Site 3</b>	323,305	317,617	317,617
<b>Site 4</b>	240,834	236,849	236,849
<b>Site 5</b>	219,993	216,310	216,310
<b>Site 6</b>	191,577	188,068	188,068
<b>Site 7</b>	193,136	189,508	189,508
<b>Site 8</b>	195,947	192,329	192,329
<b>Site 9</b>	211,535	207,567	207,567
<b>Site 10</b>	296,133	290,503	290,503
<b>Site 11</b>	241,518	236,461	236,461
<b>Site 12</b>	220,948	216,226	216,226
<b>Site 13</b>	145,688	142,457	142,457
<b>Site 14</b>	298,793	293,492	293,492
<b>Site 15</b>	207,090	203,279	203,279
<b>Site 16</b>	173,227	169,685	169,685
<b>Site 17</b>	209,585	205,860	205,860
<b>Total number of users not connected (rejected):</b>	229.15 (3.1%)	<b>No Coverage:</b> 93.6	<b>No Service:</b> 135.55
<b>Total number of connected users</b>	7,151.56 (96.9%)		

La tabla 21 representa los resultados obtenidos de las simulaciones de Monte Carlo con una carga de tráfico de los usuarios del 50 por ciento.

**Tabla 22. Datos obtenidos de las simulaciones de Monte Carlo con una carga de tráfico del 70% por sitios.**

<b>Simulación de Monte Carlo 70%</b>			
<b>Site</b>	<b>Peak RLC Cumulated Throughput (DL) (kbps)</b>	<b>Effective RLC Cumulated Throughput (DL) (kbps)</b>	<b>Cumulated Application Throughput (DL) (kbps)</b>
<b>Site 1</b>	378,639	371,346	371,346
<b>Site 2</b>	426,415	418,473	418,473
<b>Site 3</b>	384,072	376,615	376,615
<b>Site 4</b>	278,600	273,360	273,360
<b>Site 5</b>	254,800	249,812	249,812
<b>Site 6</b>	217,518	213,070	213,070
<b>Site 7</b>	226,022	221,146	221,146
<b>Site 8</b>	225,405	220,656	220,656
<b>Site 9</b>	240,361	235,398	235,398
<b>Site 10</b>	337,127	330,202	330,202
<b>Site 11</b>	269,003	262,966	262,966
<b>Site 12</b>	269,565	263,362	263,362
<b>Site 13</b>	167,169	162,915	162,915
<b>Site 14</b>	346,004	339,224	339,224
<b>Site 15</b>	236,688	231,878	231,878
<b>Site 16</b>	205,596	200,953	200,953
<b>Site 17</b>	238,227	233,544	233,544
<b>Total number of users not connected (rejected):</b>	573.17 (7.8%)	<b>No Coverage:</b> 93.6	<b>No Service:</b> 479.57
<b>Total number of connected users</b>	6,807.54 (92.2%)		

La tabla 22 representa los resultados obtenidos de las simulaciones de Monte Carlo con una carga de tráfico de los usuarios del 70 por ciento.

**Tabla 23. Datos obtenidos de las simulaciones de Monte Carlo con una carga de tráfico del 100% por sitios.**

<b>Simulación de Monte Carlo 100%</b>			
<b>Site</b>	<b>Peak RLC Cumulated Throughput (DL) (kbps)</b>	<b>Effective RLC Cumulated Throughput (DL) (kbps)</b>	<b>Cumulated Application Throughput (DL) (kbps)</b>
<b>Site 1</b>	411,142	402,602	402,602
<b>Site 2</b>	494,971	484,935	484,935
<b>Site 3</b>	451,429	441,947	441,947
<b>Site 4</b>	316,587	309,911	309,911
<b>Site 5</b>	296,017	289,615	289,615
<b>Site 6</b>	238,482	233,153	233,153
<b>Site 7</b>	265,772	259,520	259,520
<b>Site 8</b>	262,155	255,965	255,965
<b>Site 9</b>	276,571	270,302	270,302
<b>Site 10</b>	377,496	369,379	369,379
<b>Site 11</b>	239,955	234,379	234,379
<b>Site 12</b>	301,235	293,760	293,760
<b>Site 13</b>	181,203	176,393	176,393
<b>Site 14</b>	397,651	389,474	389,474
<b>Site 15</b>	264,460	258,544	258,544
<b>Site 16</b>	241,296	235,362	235,362
<b>Site 17</b>	269,241	263,258	263,258
<b>Total number of users not connected (rejected):</b>	1,144.91 (15.5%)	<b>No Coverage:</b> 93.6	<b>No Service:</b> 1,051.31
<b>Total number of connected users</b>	6,235.8 (84.5%)		

La tabla 23 representa los resultados obtenidos de las simulaciones de Monte Carlo con una carga de tráfico de los usuarios del 100 por ciento.

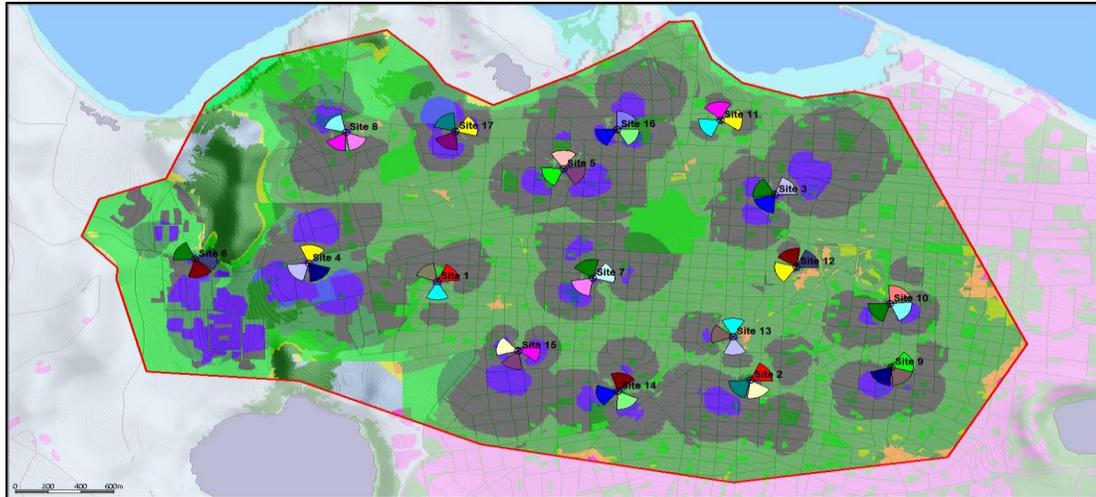
Las tablas 21, 22 y 23 son los resultados obtenidos de las simulaciones de Monte Carlo, a partir de diferentes cargas de tráfico de los usuarios del 50, 70 y 100 por ciento de las tramas en uso de las celdas asignadas para el tráfico en Down link (DL), correspondiente a un total de 17 sitios.

La cantidad de usuarios que se le asignó a cada portadora fue de 60, esto debido para tener buenas tasas de Throughput y que los usuarios tengan una buena experiencia de servicio. No se utilizó un mapa por densidad poblacional porque al utilizar mapa de densidad, Atoll no efectuaba la carga de tráfico que se seleccionaba, es decir si al colocar una carga del 50% en las configuraciones de simulaciones, este no llegaba a utilizar el 50%.

Se puede visualizar en cada tabla los parámetros como: Peak RLC Channel Throughput, el Effective RLC Channel Throughput, y Application Channel Throughput, cada uno de ellos varía en dependencia que entre mayor sea la cantidad del porcentaje de la carga de tráfico que se le suministre a la red LTE-A en la simulación la cantidad de usuarios conectados se va disminuyendo, pero sin presentar afectaciones que degraden las tasas de datos obtenidos.

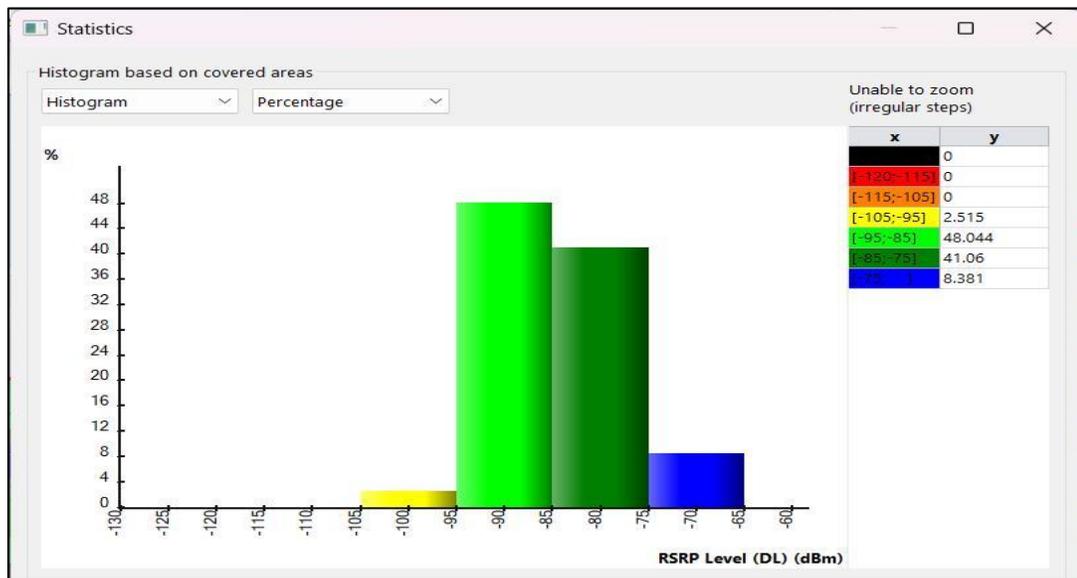
## **5.12 Predicciones de los parámetros en una red LTE-A con la herramienta ATOLL.**

A continuación, se mostrarán las predicciones de los parámetros obtenidos tomando las diferentes simulaciones de Monte Carlo 50%, 70% y 100%.



**Figura 78. Predicciones de niveles RSRP.**

En la figura 78 se muestra las predicciones del RSRP, la cobertura que tendrá en la computation zone definido en la red LTE-A. Para esta predicción de RSRP se toma en cuenta los valores asignados a los transmisores, tales como: Zona de propagación, tilt mecánico, tilt eléctrico y potencia de la antena.



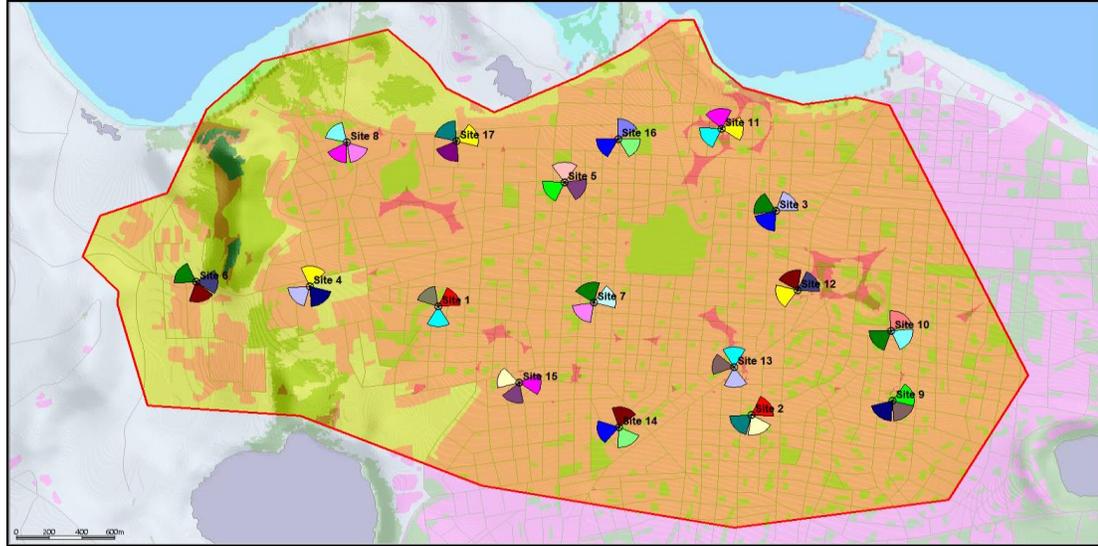
**Figura 79. Histograma de niveles de RSRP.**

En la figura 79 se muestra el histograma de los niveles de RSRP, representando la cantidad de muestras que se tienen en el área, es decir permite visualizar de manera sencilla la cantidad de veces que ocurre cada valor en un conjunto de observaciones.

**Tabla 24. Rango de valores de niveles RSRP.**

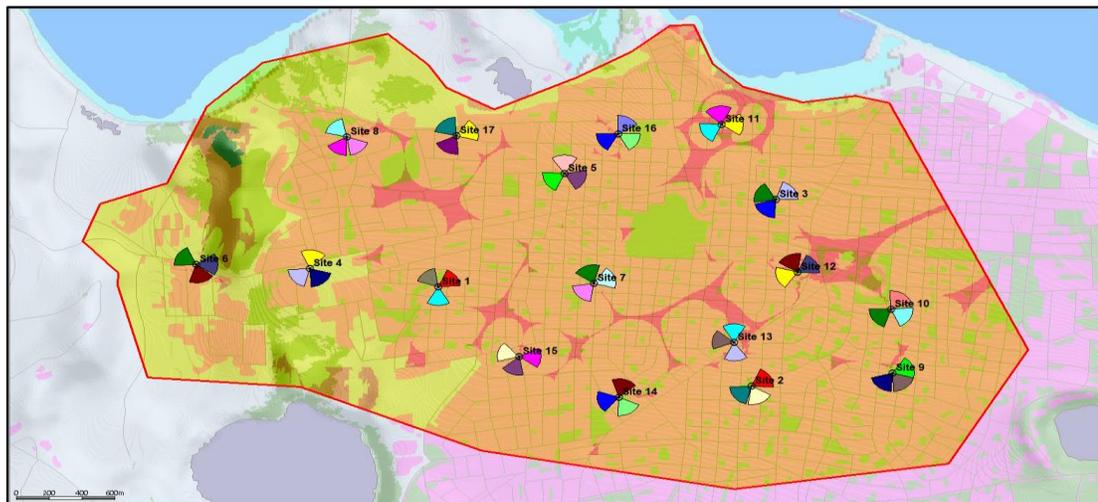
	<b>Rangos (dBm)</b>	<b>Coverage by Signal</b>
	<b>RSRP</b>	<b>Level</b>
	-75, Max	8.381%
	-85, -75	41.06%
	-95, -85	48.044%
	-105, -95	2.515%
	-115, -105	0%
	-120, -115	0%
	Min, -120	0%

La tabla 24 representa los rangos de niveles de RSRP con su respectiva leyenda de colores, se muestra el porcentaje que se obtuvo en base en la cantidad de muestras obtenidas en ese rango en Atoll.



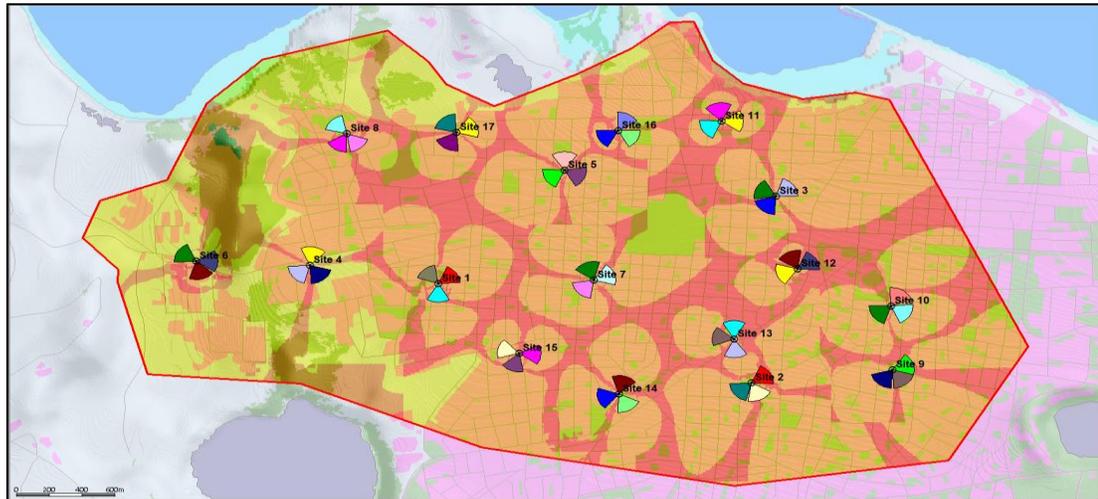
**Figura 80. Predicciones de RSRQ: A) Tráfico 50%.**

En la figura 80 se muestran las predicciones de RSRQ, donde podemos observar que se presenta con una carga de tráfico del 50 por ciento en la simulación, esto conlleva que para este porcentaje de carga se obtiene la mayor de cantidad de usuarios (7,151.56 usuarios), conectados en el área de cobertura.



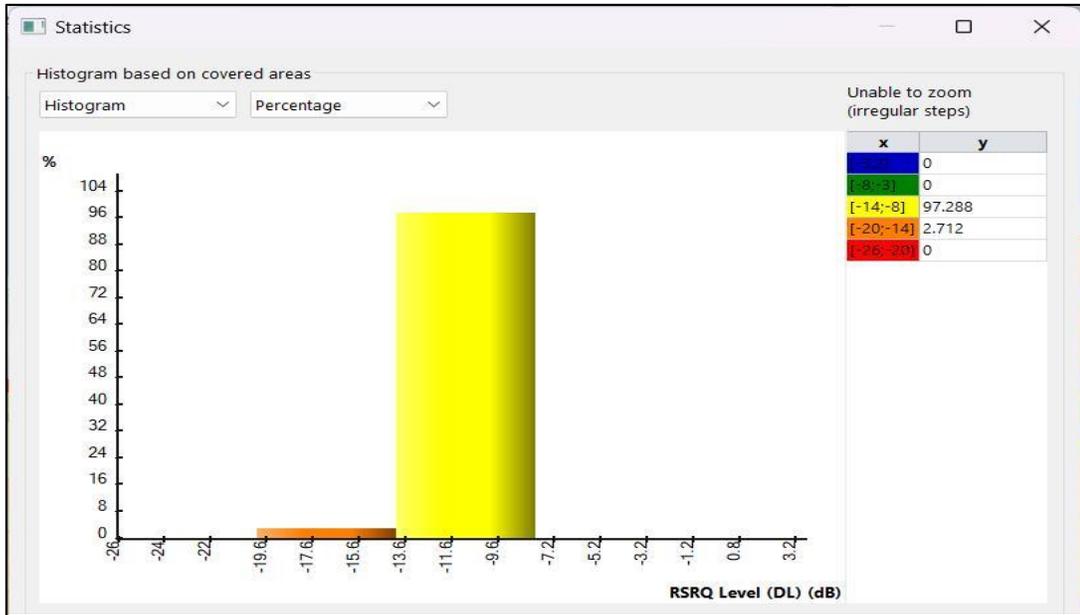
**Figura 81. Predicciones de RSRQ: B) Tráfico 70%.**

En la figura 81 se muestran las predicciones de RSRQ se presenta con una carga de tráfico del 70 por ciento en la simulación, esto conlleva que para este porcentaje de carga se obtiene una cantidad de usuarios (6,807.54 usuarios) conectados en el área de cobertura.



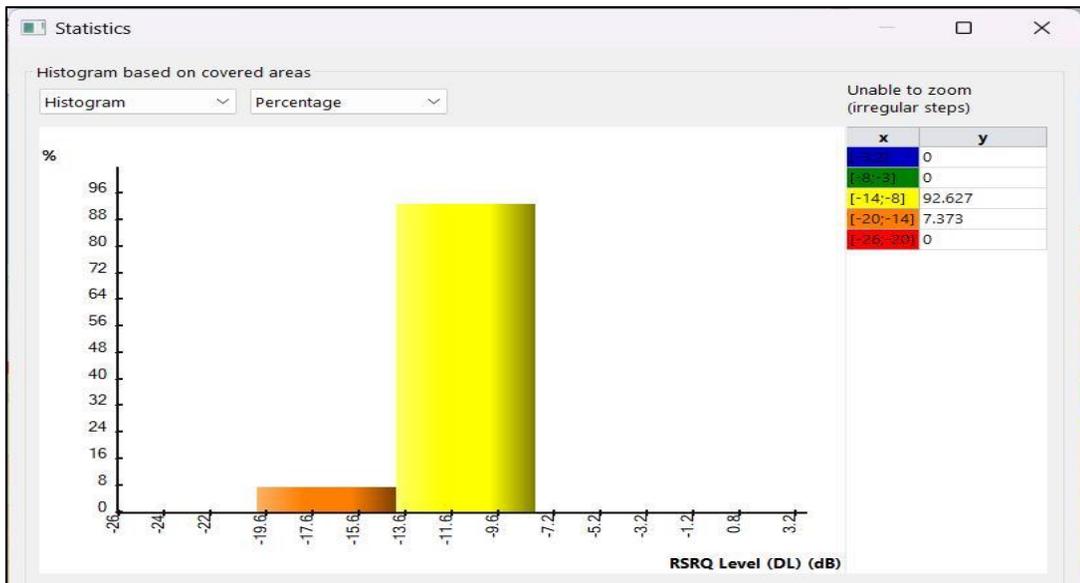
**Figura 82. Predicciones de RSRQ: C) Tráfico 100%**

En la figura 82 se muestran las predicciones de RSRQ, se presenta con una carga de tráfico del 100 por ciento en la simulación, esto conlleva que para este porcentaje de carga se obtiene una cantidad de usuarios (6,235.8) conectados en el área de cobertura.



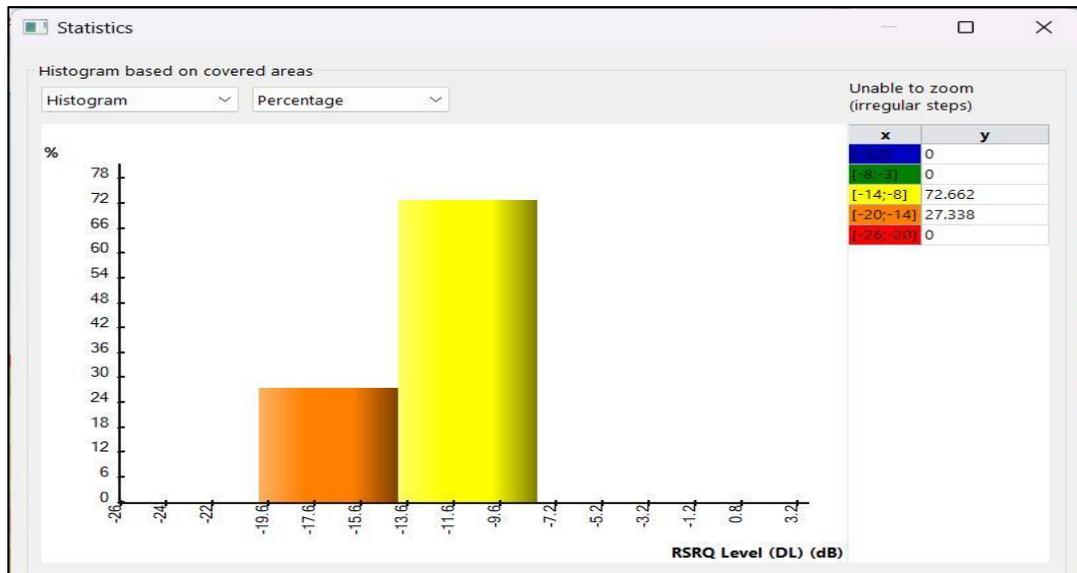
**Figura 83. Histograma de predicciones de RSRQ: A) Tráfico 50%.**

La figura 83 muestra el histograma de la carga de tráfico del 50 por ciento, donde se puede apreciar que a menor cantidad de carga de tráfico los niveles de calidad entre (- 8 a -14 dB) la señal se podrá recibir fácilmente por el terminal por ende la velocidad será mayor obteniendo una mejor calidad del servicio.



**Figura 84. Histograma de predicciones de RSRQ: B) Tráfico 70%.**

La figura 84 muestra el histograma de la carga de tráfico del 70 por ciento, donde se puede visualizar que con una carga considerable de tráfico los niveles de calidad entre (- 8 a -14 dB) siguen siendo óptimos presentando buenos niveles dentro del área de cobertura de tal manera la calidad del servicio eficiente a como se muestra a continuación.



**Figura 85. Histograma de predicciones de RSRQ: C) Tráfico 100%.**

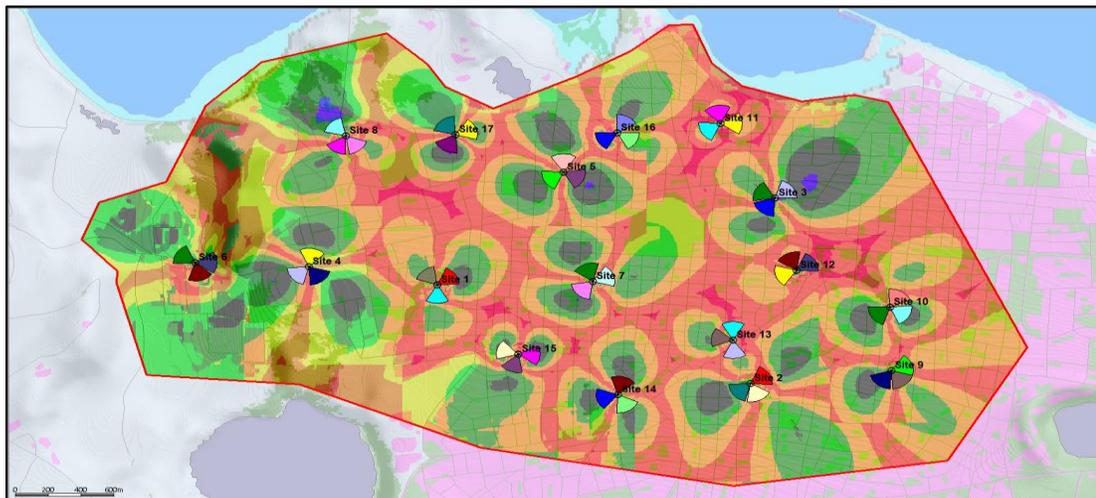
La figura 85 representa el histograma de la carga de tráfico que se encuentra al 100 por ciento, donde los usuarios están demandando la mayor cantidad de recursos (ancho de banda) de la red LTE -A. debido a que se encuentran los dispositivos móviles transmitiendo y recibiendo datos simultáneamente, es por eso que el parámetro del RSRQ en los niveles de calidad entre (-20 a -14 dB) sea probable que se dificulte el recibir la señal ya que se encuentra en los bordes del área de cobertura.

**Tabla 25. Rango de valores de RSRQ: A) Tráfico 50% B) Tráfico 70% C) Tráfico 100%.**

	Rangos (dB) RSRQ	Tráfico de usuarios: 50%	Tráfico de usuarios: 70%	Tráfico de usuarios: 100%
	[-3; 2]	0%	0%	0%
	[-8; -3]	0%	0%	0%
	[-14; -8]	97.288%	92.627%	72.662%
	[-20; -14]	2.712%	7.373%	27.338%
	[-26; -20]	0%	0%	0%

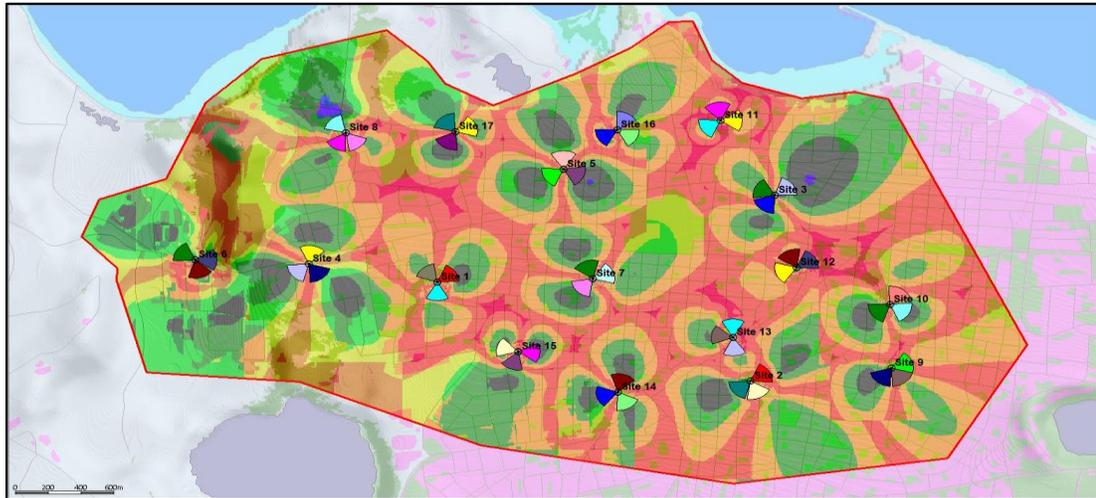
En la tabla 25 están las leyendas con su respectivo rango de valores de RSRQ, lo cual se aprecia el cambio antes mencionado por las diferentes cargas de tráfico de usuarios.

Para cada uno de estos 3 escenarios los niveles de RSRQ son óptimos ya que se encuentran con un porcentaje por encima de los 77.662% dentro del rango de buenos niveles y apenas un 27.338% en el rango de malos niveles con una carga máxima de tráfico del 100%.



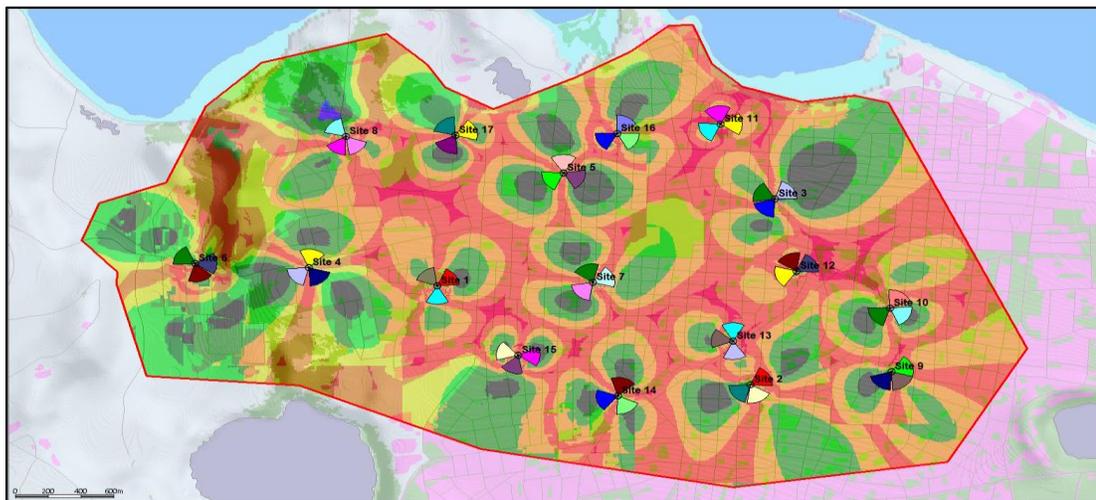
**Figura 86. Predicciones de C/(I+N): A) Tráfico 50%.**

La figura 86 representa las predicciones de  $C/(I+N)$  con una carga de tráfico del 50% en la red LTE-A.



**Figura 87. Predicciones de  $C/(I+N)$ : B) Tráfico 70%.**

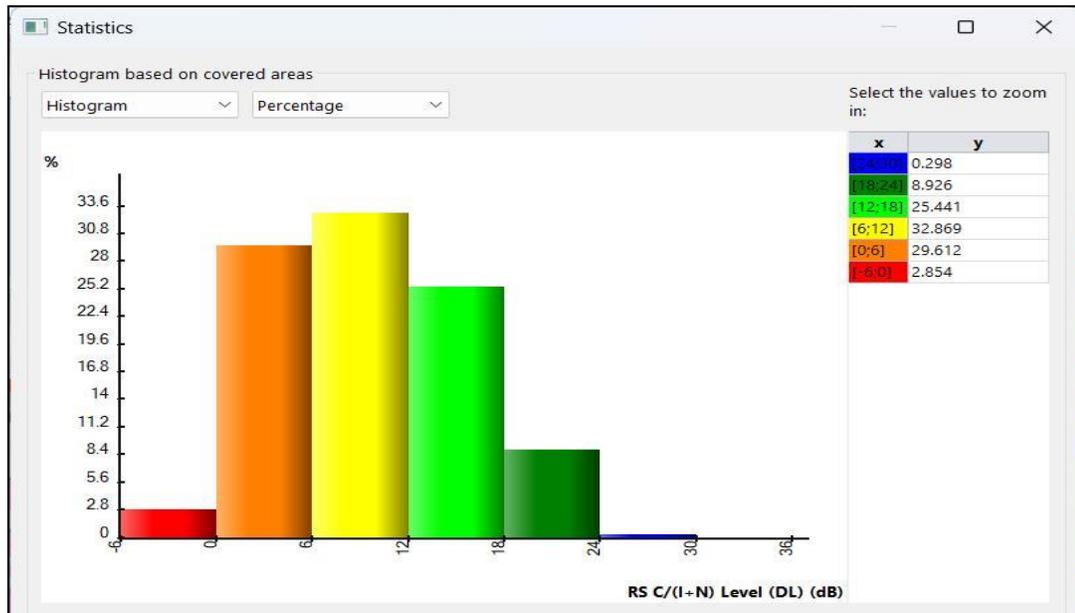
La figura 87 representa las predicciones de  $C/(I+N)$  con una carga de tráfico del 70% en la red LTE-A.



**Figura 88. Predicciones de  $C/(I+N)$ : C) Tráfico 100%.**

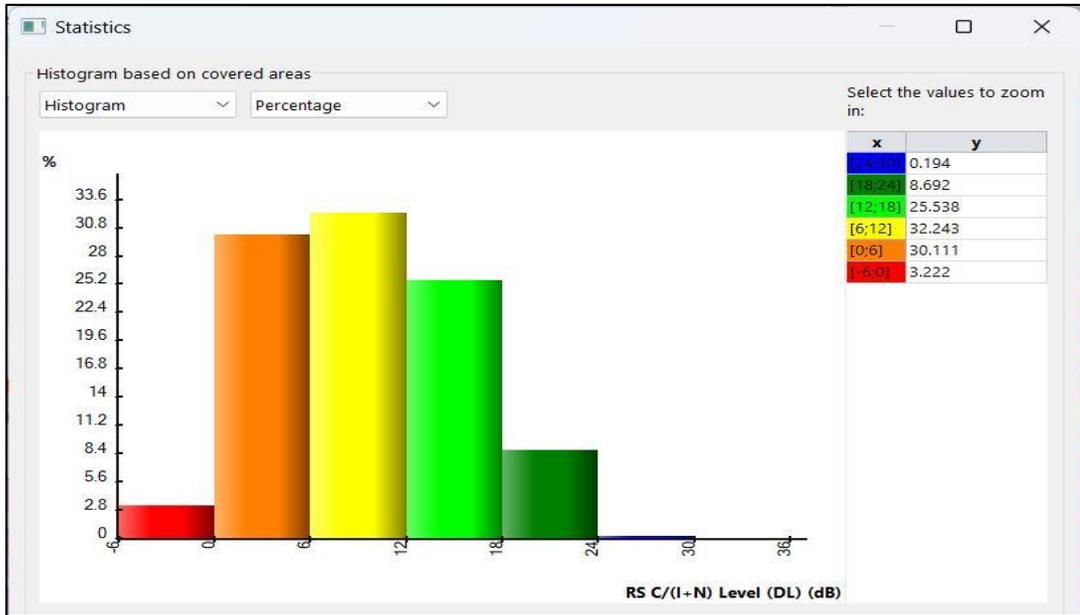
La figura 88 representa las predicciones de  $C/(I+N)$  con una carga de tráfico del 100% en la red LTE-A.

Se aprecia la zona de cobertura del C/(I+N) también se ve afectado por el cambio de carga de tráfico de usuarios. Como se menciona el marco teórico el C/(I+N) es la relación entre el nivel de la señal (señal deseada) y el nivel de ruido no deseado.



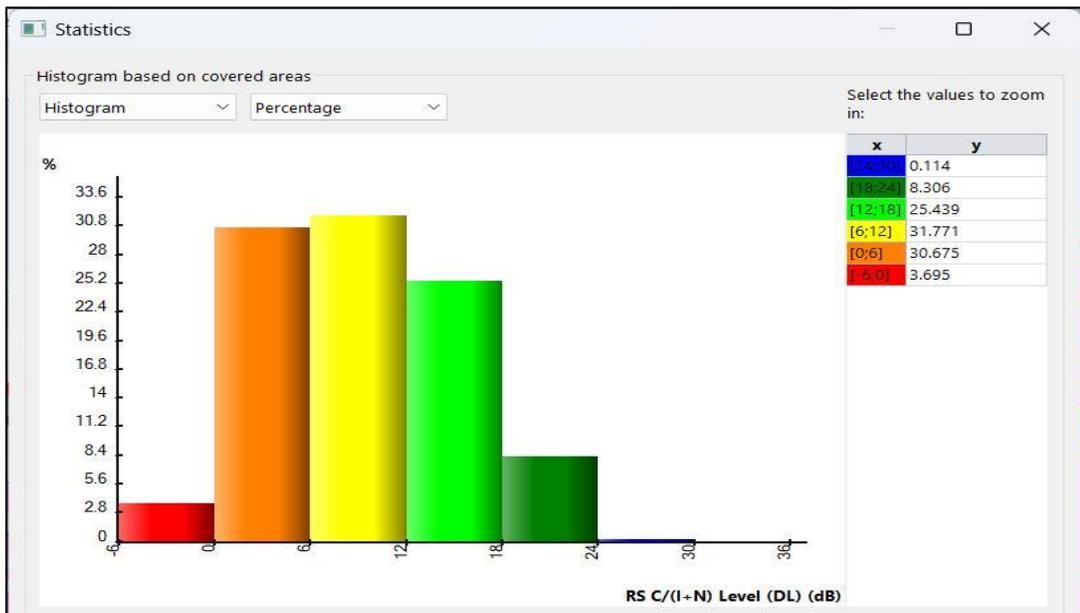
**Figura 89. Histograma de predicciones de C/(I+N): A) Tráfico 50%.**

La figura 89 representa el histograma de las predicciones del parámetro C/(I+N) con una carga de tráfico del 50% por ciento. Los rangos de valores están en el eje X y la cantidad de muestras en porcentaje se muestran en el eje Y. El mejor rango es de leyenda azul [24;30].



**Figura 90. Histograma de predicciones de C/(I+N): B) Tráfico 70%.**

La figura 90 representa el histograma de las predicciones del parámetro C/(I+N) con una carga de tráfico del 70% por ciento. Se observa en el histograma que los valores del rango [24;30] es inferior al 50% por ciento, variando por la carga de tráfico de esta.



**Figura 91. Histograma de predicciones de C/(I+N): C) Tráfico 100%.**

Desde las figuras 89 hasta la figura 91 se muestra el cambio en el CINR en los histogramas, como se mencionaba antes, en dependencia del tráfico esto cambiara, lo cual puede deberse a varios factores; interferencia, congestión de recursos, reasignación de recursos y potencia de transmisión de dispositivos cercanos. Cuando hay muchos dispositivos cercanos transmitiendo con alta potencia, puede aumentar la interferencia en la señal recibida y disminuir el  $C/(I+N)$ .

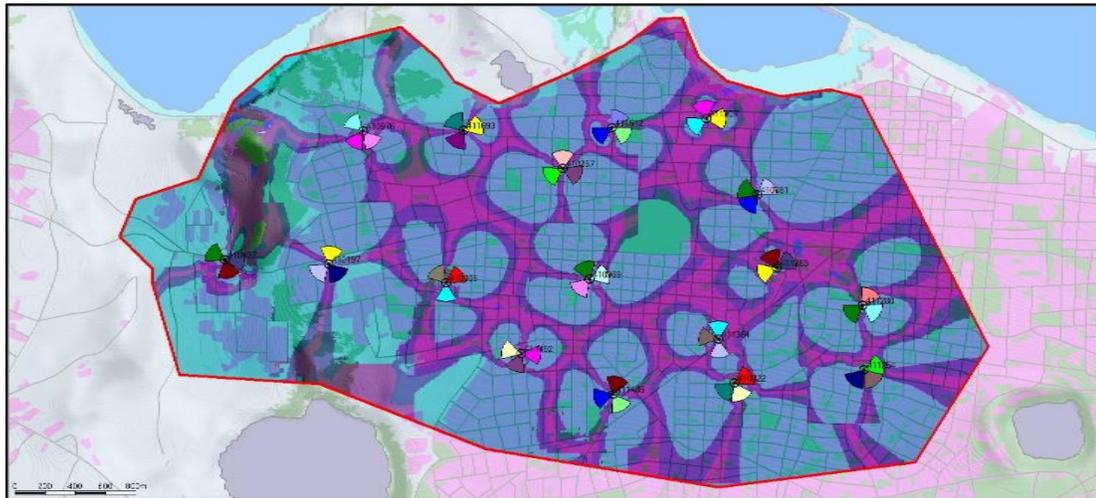
**Tabla 26. Rango de valores de  $C/(I+N)$ : A) Tráfico 50% B) Tráfico 70% C) Tráfico 100%.**

	<b>Rangos (dB) <math>C/(I+N)</math></b>	<b>Tráfico de usuarios: 50%</b>	<b>Tráfico de usuarios: 70%</b>	<b>Tráfico de usuarios: 100%</b>
	[24; 30]	0.298%	0.194%	0.114%
	[18; 24]	8.926%	8.692%	8.306%
	[12; 18]	25.441%	25.538%	25.439%
	[6; 12]	32.869%	32.243%	31.771%
	[0; 6]	29.612%	30.111%	30.675%
	[-6; 0]	2.854%	3.222%	3.695%

La tabla 26 representa los rangos de  $C/(I+N)$  con sus leyendas de diferentes colores. Cada rango del  $C/(I+N)$  tiene resultados en base a porcentajes de la carga de tráfico de la red LTE-A.

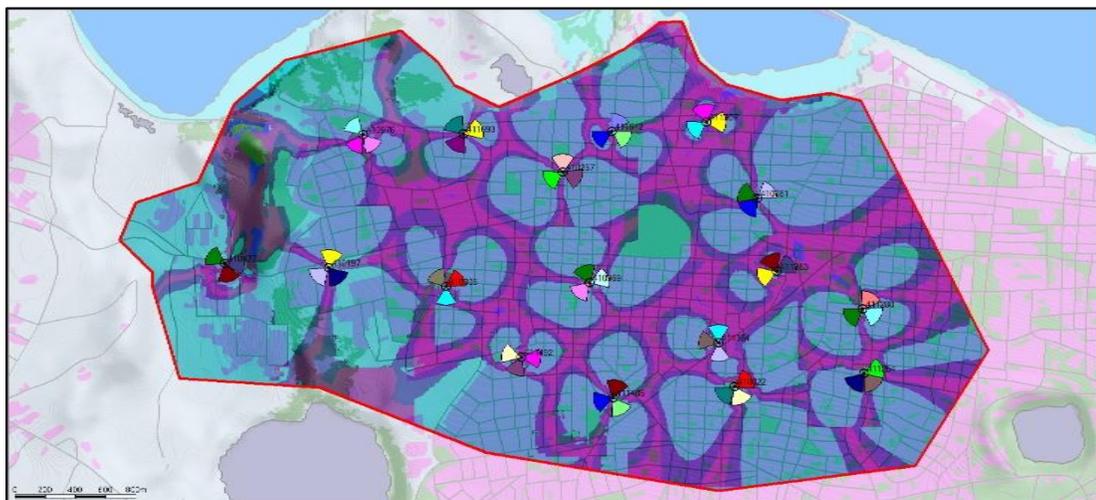
$C/(I+N)$  es la relación entre la potencia de la portadora de radiofrecuencia (RF) que lleva la señal deseada y la potencia total de las señales interferentes y el ruido térmico. Las figuras desde la 86 hasta la 91 y la tabla 26 muestra los resultados de las predicciones cobertura por  $C/(I+N)$  en DL para una carga de tráfico de 50,70 y 100%, se puede apreciar de que con el máximo de carga de tráfico los niveles no se ven tan afectados por ningún factor que pueda ocasionar

problemas en cuanto al estado de la operación de la red LTE -A manteniendo así una buena calidad de servicio de esta.



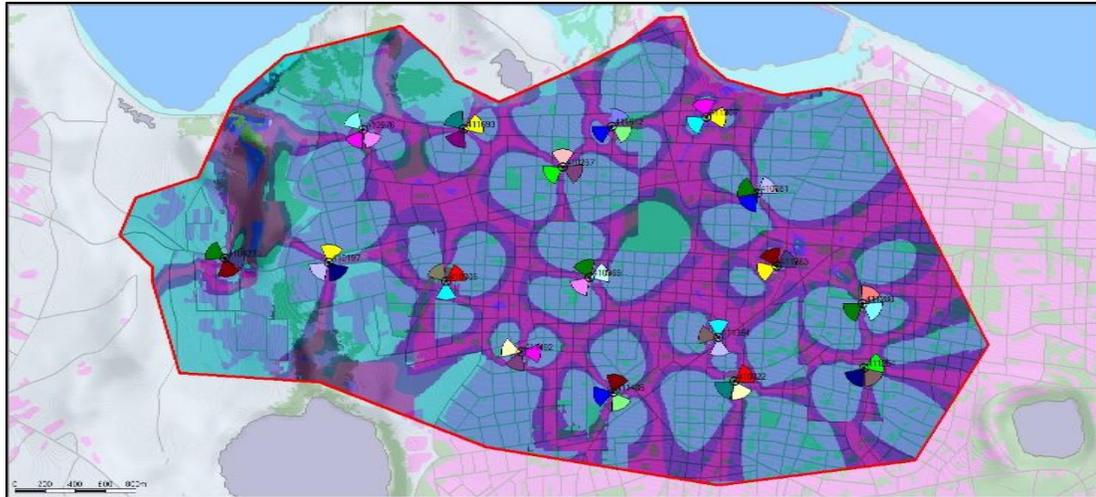
**Figura 92. A) Cobertura de Throughput: 50% de tráfico.**

La figura 92 representa el área de cobertura del Throughput en LTE-A con una carga de tráfico del 50 por ciento.



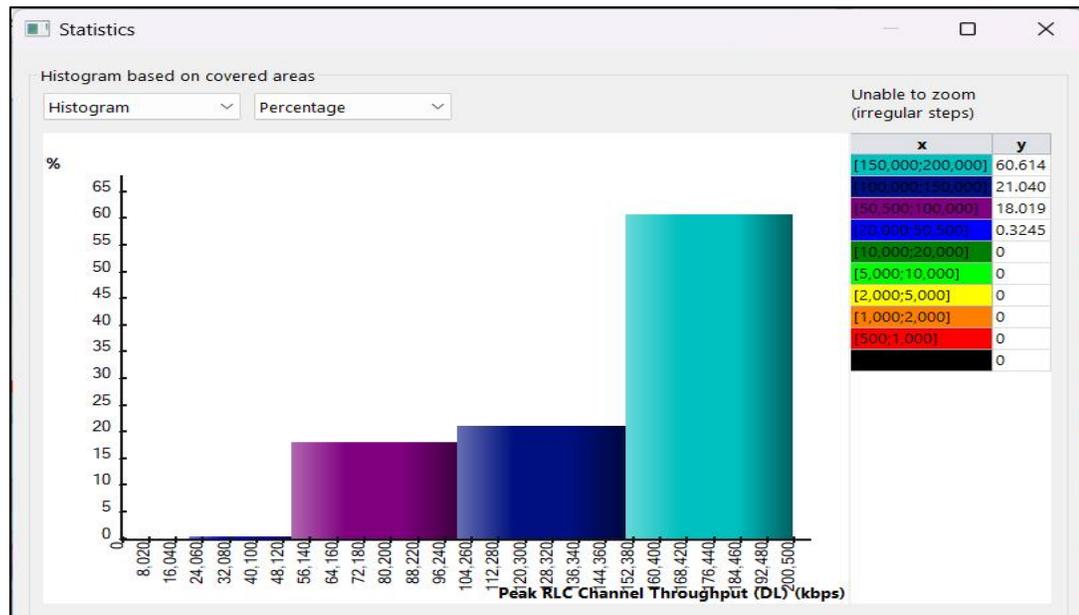
**Figura 93. B) Cobertura de Throughput: 70% de tráfico.**

La figura 93 representa el área de cobertura del Throughput en LTE-A con una carga de tráfico del 70 por ciento.



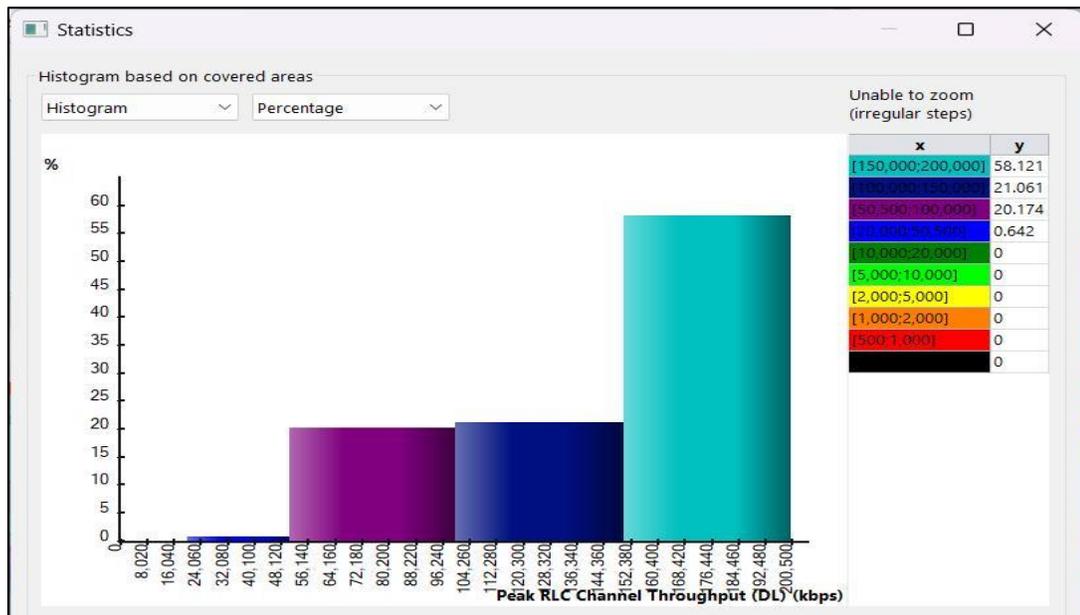
**Figura 94. C) Cobertura de Throughput: 100% de tráfico.**

La figura 94 representa el área de cobertura del Throughput en LTE-A con una carga de tráfico del 100 por ciento.



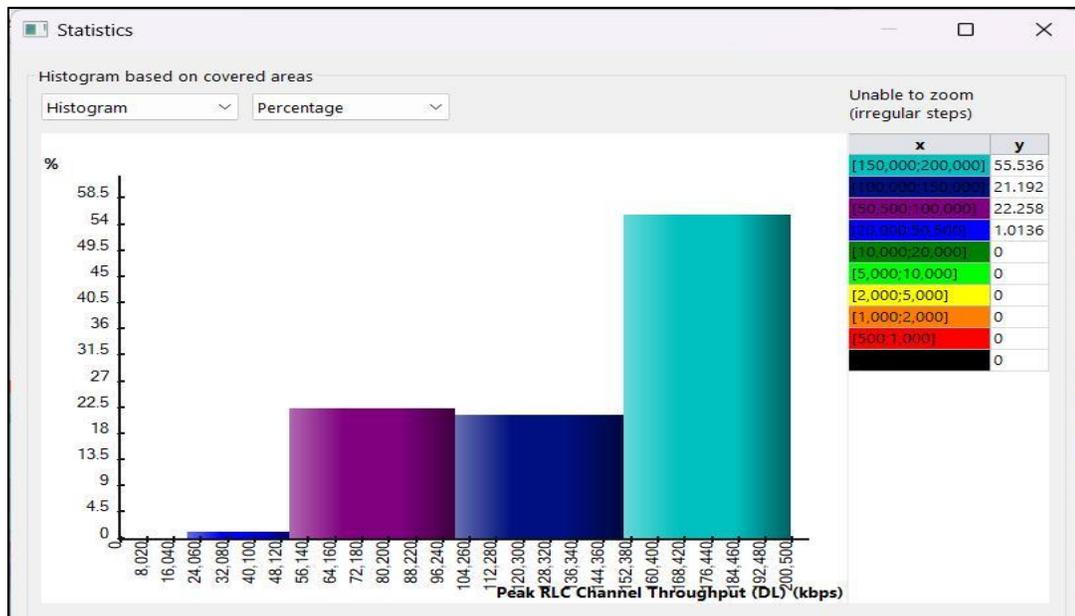
**Figura 95. Histogramas de predicciones de Throughput DL: A) Tráfico 50%.**

La figura 95 representa las predicciones de Throughput con una carga de 50% en forma de histograma, el Throughput máximo del rango 150,000; 200,000 Kbps se obtuvo en 60.61% de los usuarios en su área de cobertura.



**Figura 96. Histogramas de predicciones de Throughput DL: B) Tráfico 70%.**

La figura 96 representa las predicciones de Throughput con una carga de 70% en forma de histograma, el Throughput máximo del rango 150,000; 200,000 Kbps se obtuvo en 58.12% de los usuarios en su área de cobertura.



**Figura 97. Histogramas de predicciones de Throughput DL: C) Tráfico 100%.**

La figura 97 representa las predicciones de Throughput con una carga de 100% en forma de histograma, el Throughput máximo del rango 150,000; 200,000 Kbps se obtuvo en 55.53 % de los usuarios en su área de cobertura. Se obtuvieron buenos resultados a pesar de que el tráfico está al 100% de carga, obteniendo buenos valores en diferentes rangos de Throughput.

**Tabla 27. Rango de valores de Throughput DL: A) Tráfico 50% B) Tráfico 70% C) Tráfico 100%.**

	<b>Rangos (kbps)</b>	<b>Tráfico de usuarios: 50%</b>	<b>Tráfico de usuarios: 70%</b>	<b>Tráfico de usuarios: 100%</b>
	150000, Max	60.614	58.121	55.536
	100000, 150000	21.040	21.061	21.192
	50000, 100000	18.019	20.174	22.258
	20000, 50000	0.3245	0.642	1.0136
	10000, 20000	0	0	0
	5000, 10000	0	0	0
	2000, 5000	0	0	0
	1000, 2000	0	0	0
	500, 1000	0	0	0
	Min, 500	0	0	0

A como se puede observar, según la predicción por cobertura de Throughput para el canal Radio Link Control (RLC) de Down link, desde las figuras 92 hasta la figura 97 y la tabla 27 muestra los resultados obtenidos a partir de un 50, 70 y 100% de tráfico de usuarios en la red LTE -A con 100 simulaciones de Monte Carlo y con 3 portadoras, dicho resultados obtenidos reflejan que los usuarios conectados a la red LTE -A en su máximo porcentaje de carga de tráfico están navegando con muy buenas velocidades de datos por encima de los 150000 kbps, esto quiere decir de que la red está funcionando de forma eficiente y en óptimas condiciones con una buena área de cobertura y calidad.

## Capítulo VI. Estudio comparativo de una red LTE-A a partir de los resultados obtenidos de las mediciones de campos previas y posteriores versus las simulaciones de Monte Carlo mediante la herramienta ATOLL®.

### 6.1 Introducción del Capítulo IV

Para este último capítulo del documento, está enfocado en comparar los resultados obtenidos de las mediciones de campos previas y posteriores de la red LTE-A versus los resultados obtenidos a partir de las simulaciones generadas en la herramienta de ATOLL®, para analizar los parámetros de desempeño, de intensidad, calidad e interferencia y de la velocidad de datos mediante el parámetro de Down link Throughput, mediante graficas con un 100 por ciento de carga de usuarios evaluando así el (Throughput vs RSRP), (Throughput vs RSRQ) y (Throughput vs CINR).

En una red LTE-A con agregación de portadora intra-frecuencia existe de igual manera una separación de rangos de frecuencia, esta para evitar interferencias entre ellas. Esto no quiere decir que se descarten las interferencias, como se muestran en las tablas de CINR de Atoll, se observan en ciertas muestras de la señal con la relación al ruido mayor que la potencia de la señal deseada.

El propósito de realizar este estudio es comparar el comportamiento de la interferencia Intra frecuencia e Inter frecuencia producto a la agregación de una tercera portadora en la red LTE-A. El análisis se realizará utilizando los datos recopilados a través de mediciones de campo obtenidas en la red LTE-A en el área de estudio.

## 6.2 Análisis de los distintos parámetros en la simulación LTE-A.

En este análisis se utilizará las simulaciones de Monte Carlos con carga del 100% de tráfico para tener una similitud con el DT Post que se realizó ya que estas mediciones se realizaron en horas pico.

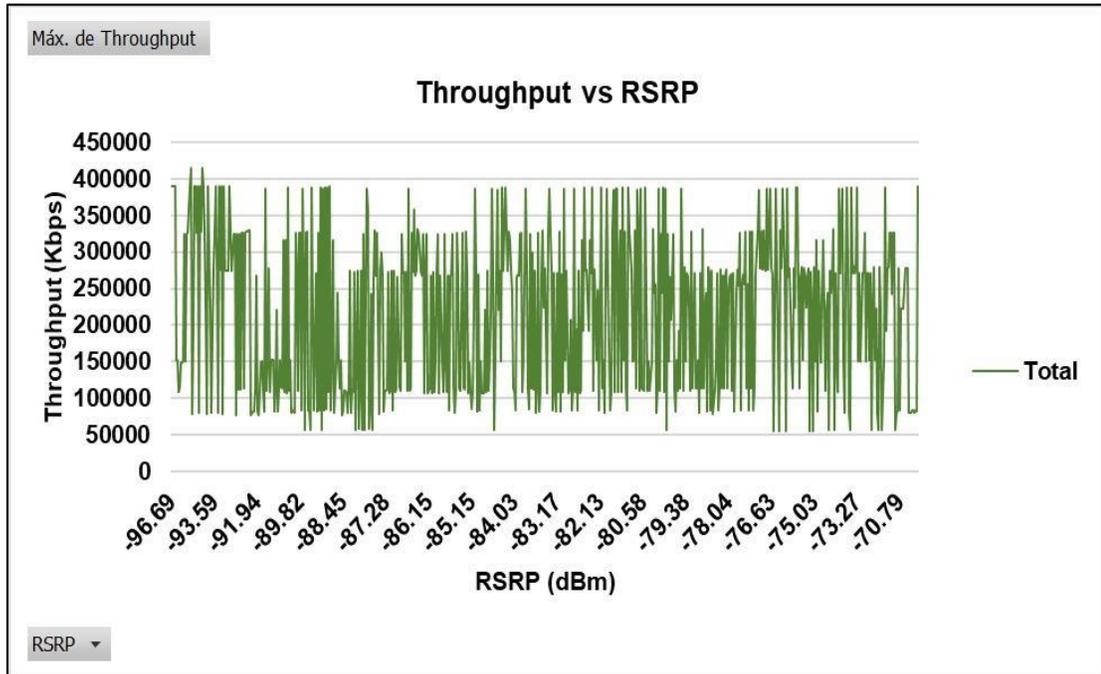
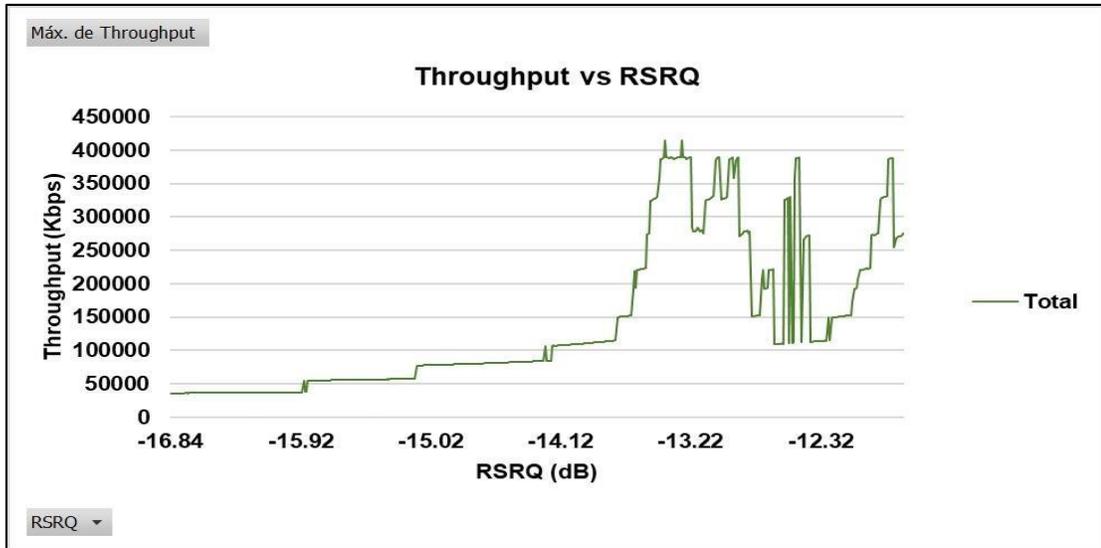


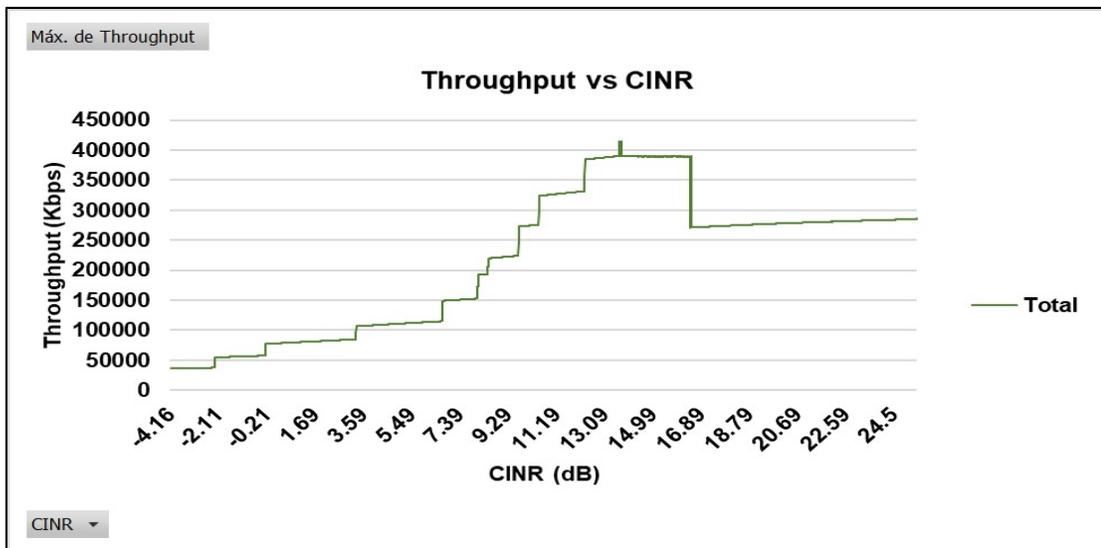
Figura 98. Throughput vs RSRP.

La figura 98 se observa el Throughput Max. obtenido en los diferentes niveles de RSRP. En la mayoría de la predicción se obtuvo entre los 50,000 Kbps hasta picos de 400,000 Kbps, a pesar de los diferentes niveles de RSRP bajos y altos no significa que vamos a tener una conectividad estable en el servicio de descarga y viceversa, siempre hay que tomar en cuenta los demás parámetros que miden la calidad y el ruido de la señal como lo son el RSRQ y CINR.



**Figura 99. Throughput vs RSRQ.**

La figura 99 muestra las tasas picos de Throughput en relación con los valores de RSRQ, las tasas de descarga llegan arriba de 400,000 Kbps. Los valores de RSRQ al ir aumentando se observa como las tasas de Throughput aumentan. En el rango -14.12 dB a Max. se observa un incremento de throughput considerable, según la tabla 1 del marco teórico el rango de RSRQ mayor a -15 dB se considera buenos niveles de este parámetro.



**Figura 100. Throughput vs CINR.**

La figura 100 muestra las tasas de Throughput en relación con el CINR. Como en los casos anteriores se muestran altas tasas Max. de Throughput en los diferentes niveles. Las tasas picos de Throughput van aumentando de forma considerable al ir mejorando los niveles de CINR. En el rango 14.99 a 24.5 dB se observa de forma estable un Throughput entre 250,000 a 3000,000 Kbps.

Los parámetros antes mostrados RSRP, RSRQ y CINR con relación al Throughput son datos de velocidades Max. de Throughput, se puede realizar diferentes análisis como el promedio del Throughput con relación a los diferentes parámetros. En este caso se decidió utilizar un tipo de cálculo Max. en Excel.

### **6.3 Análisis comparativo de las mediciones de campo y simulaciones**

En las siguientes tablas se mostrarán las diferencias que se obtuvieron en las mediciones de campo de una red LTE-A Inter frecuencia y las simulaciones de Monte Carlos de una red LTE-A Intra frecuencia con una carga de tráfico del 100%. Las tablas 28, 29, 30 y 31 muestran los diferentes parámetros de una red LTE-A, datos obtenidos mediante las mediciones de campo que se realizaron y post procesaron. Los datos de las simulaciones de Monte Carlos obteniendo los diferentes parámetros mediante predicciones. Los valores de Coverage by Signal Level es el porcentaje del área cobertura de la zona medida o en el caso de ATOLL® la zona de predicción.

**Tabla 28. Comparativos niveles RSRP: Mediciones de campo y simulaciones de Monte Carlo en ATOLL®.**

Mediciones de campo		Simulaciones de Monte Carlos	
Rangos (dBm) RSRP	Coverage by Signal Level	Rangos (dBm) RSRP	Coverage by Signal Level
-75, Max	15.06%	-75, Max	8.38%
-85, -75	36.28%	-85, -75	41.06%
-95, -85	36.16%	-95, -85	48.04%
-105, -95	11.51%	-105, -95	2.52%
-115, -105	1%	-115, -105	0%
-120, -115	0%	-120, -115	0%
Min, -120	0%	Min, -120	0%

Los valores de la tabla 28 en el rango de -75, Max dBm se obtuvieron mejores muestras de RSRP en las mediciones de campo post de un 6.68%, pero en los rangos de -85 a -75 en las simulaciones se obtienen 4.78% mejor. En el rango -95 a -85 dBm se obtienen 11.88% mejores niveles de RSRP. Los niveles antes mencionados, todavía están en el rango aceptable, quiere decir buenos y excelentes niveles de RSRP en las mediciones y en las simulaciones.

**Tabla 29. Comparativos niveles RSRQ: Mediciones de campo y simulaciones de Monte Carlo en ATOLL®.**

Mediciones de campo		Simulaciones de Monte Carlo	
Rangos (dB) RSRQ	Coverage by Signal Level	Rangos (dB) RSRQ	Coverage by Signal Level
[-3, Max]	0%	[-3; 2]	0%
[-8; -3]	0.32%	[-8; -3]	0%
[-14; -8]	77.99%	[-14; -8]	72.66%
[-20; -14]	21.53%	[-20; -14]	27.34%
[-Min, -20]	0.16%	[-26; -20]	0%

Los valores de la tabla 29, las mediciones de campos post se obtuvieron mejores resultados que las predicciones, aunque no es de mucha diferencia. Los valores de RSRQ la mayor tasa de muestras de las mediciones y las predicciones se encuentran en el rango de -14 a -8 dB.

**Tabla 30. Comparativos niveles CINR: Mediciones de campo y simulaciones de Monte Carlo en ATOLL®**

Mediciones de campo			Simulaciones de Monte Carlo	
Rangos SINR y CINR (dB)	Coverage by Signal Level SINR	Coverage by Signal Level CINR	Rangos CINR (dB)	Coverage by Signal Level
[24, Max]	1.14%	1.53%	[24; 30]	0.11%
[18, 24]	7.07%	9.12%	[18; 24]	8.31%
[12; 18]	20.13%	21.98%	[12; 18]	25.44%
[6; 12]	27.20%	28.16%	[6; 12]	31.77%
[0; 6]	25.39%	23.53%	[0; 6]	30.68%
[-Min, 0]	19.07%	15.67%	[-6; 0]	3.70%

Los valores de CINR de la tabla 30 se observa ligeramente mejor desempeño en las simulaciones que en las mediciones de campo. En el rango de Min, 0 dB se obtuvo mayor cantidad de muestras con bajos niveles de CINR en las mediciones de campo de 15.67% a diferencia de las predicciones solo con un 3.70%. Un dato bastante notable en esta comparativa.

**Tabla 31. Comparativos niveles Throughput: Mediciones de campo y simulaciones de Monte Carlo en ATOLL®.**

Mediciones de campo		Simulaciones	
Rangos throughput (kbps)	Coverage by Signal Level	Rangos throughput (kbps)	Coverage by Signal Level
50000, Max	3.81%	50000, Max	98.92%
20000, 50000	25.78%	20000, 50000	1.01%
10000, 20000	20.98%	10000, 20000	0
5000, 10000	19.04%	5000, 10000	0
2000, 5000	17.00%	2000, 5000	0
1000, 2000	5.63%	1000, 2000	0
500, 1000	2.65%	500, 1000	0
Min, 500	5.10%	Min, 500	0

La tabla 31 es la tabla de Throughput, donde comparamos lo que se obtuvo en lo real y lo simulado. La mayor cantidad de Throughput se obtuvo en las simulaciones con 98.98% con una tasa de datos mayor a 50,000 Kbps. La mayor tasa de Throughput que se obtuvo en las mediciones de campo post fue de 155,332 Kbps como se mostró en la tabla 7 en el capítulo IV, mientras que la mayor tasa de Throughput en la simulación se observan por encima de 400,000 Kbps en las gráficas de los análisis de los distintos parámetros en la simulación LTE-A del capítulo V.

## 7. Conclusiones

Este trabajo monográfico se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de la interferencia entre portadoras en las bandas B2, B4 y B28 FDD en una red LTE-A mediante Drive Test, Post Proceso y las simulaciones de Monte Carlo haciendo uso de la herramienta de simulación ATOLL®. El análisis permitió evaluar el desempeño y eficiencia en función de los parámetros de la red LTE-A previos y posterior a la agregación de una tercera portadora, concluyendo en lo siguiente:

En el objetivo n°1, se logra cumplir de forma detallada el análisis de las mediciones de campo resaltando la eficiencia de los niveles de los distintos parámetros de calidad de señal, intensidad de señal, la relación de la señal recibida respecto a la interferencia y el Throughput en la comparación de la red LTE con la red LTE -A, ya que, con la agregación de la tercera portadora, se agregó la banda B4 (2100 MHz), generando un mejor servicio de conectividad, ancho de banda y transmisión de datos para los usuarios dentro del área de cobertura en la red LTE-A.

Con respecto al objetivo n°2, enfatiza el estudio comparativo en base al análisis del Throughput en relación con el resto de los demás parámetros de la red LTE y LTE-A desplegada, se puede observar que el Throughput en el Drive Test Pre comparado con los otros parámetros en el Drive Test Post el resultado que se obtuvo fue más óptimo en la tasa de transmisión de datos en Down link ya que se presentaron mejores niveles de intensidad y calidad de los distintos parámetros de la red LTE-A cumpliendo así con el objetivo propuesto.

El objetivo n°3, se cumple a partir de la planificación de la red LTE-A en la herramienta de simulación de ATOLL®, donde se llevó a cabo la calibración del modelo de propagación estándar (SPM) para ejecutar todas las simulaciones ya que un modelo calibrado permite realizar estimaciones más reales en la

operatividad de la red, posterior se efectuó la optimización de la red a partir de las predicciones existente, para evaluar los diferentes escenarios de simulaciones de Monte Carlo los cuales se le suministraron distintas cargas de tráfico con el propósito de analizar el desempeño de los parámetros de la red obteniendo mejores niveles de calidad de señal, intensidad de señal y Throughput de la red LTE-A.

En referencia al objetivo n°4, se da a conocer el resultado del estudio comparativo de las mediciones de campo de una red LTE-A inter-frecuencia versus las simulaciones de Monte Carlo de una red LTE -A intra-frecuencia con un máximo de carga de tráfico de usuarios del 100%, el cual el resultado obtenido fue que los niveles de calidad, intensidad y Throughput son más eficientes esto debido a que la red LTE-A ya se encuentra optimizada en ATOLL®.

Los resultados obtenidos en las simulaciones dejan más que claro que una red LTE-A que se encuentre desplegada y optimizada con una tercera portadora se puede comprobar que tendrá mejores niveles de calidad, intensidad y Throughput sea cual sea la cantidad de carga de tráfico que se le suministre ya que se puede hacer un mejor ajuste de los parámetros lógicos y físicos para que la red opere con mayor alcance y una mejor calidad del servicio.

## 8. Recomendaciones

1. Se recomienda realizar mediciones de campo para cada una de las bandas de frecuencias en las cuales opera la red LTE-A en nuestro país esto con el propósito de comprobar la calidad del Throughput tanto en Down link como Up link con distintas cargas de tráfico durante horas pico.
2. Sugerimos realizar la agregación de más de 3 portadoras a la red LTE-A para verificar si la calidad del servicio sigue siendo óptima o si tendrá problemas de interferencias intra-frecuencia o inter-frecuencias.
3. Recomendamos considerar aparte del Throughput otros criterios que permitan evaluar el desempeño de la red LTE-A proporcionado a los usuarios mayores áreas de cobertura con mejores tasas de transmisión de datos en Down link.
4. Realizar estudios comparativos de mediciones reales versus simulaciones con otro tipo de software de planificación y simulación para redes LTE-A.

## 9. Referencias bibliográficas

- [1] 5G Americas, “4G Mobile Broadband Evolution: 3GPP Release 11 & Release 12 and Beyond”, 2014 [En línea]. Disponible:2014<https://acortar.link/ZPE46e>. [Accedido: 19-octubre-2023]
- [2] R. Sánchez Mínguez, “Arquitectura 4G”, 2016. [Accedido: 19-octubre-2023]
- [3] ] L. N. Villarreal Tercero y L. J. Pérez Agurcia, “Procedimientos de Optimización en Redes de Acceso 3G WCDMA/HSPA y su efectividad en Casos de Estudio en Nicaragua”, tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería, 2015. [En línea]. Disponible: <https://ribuni.uni.edu.ni/1316/>. [Accedido: 01-septiembre-2020]
- [4] P. Anker, “Telecom ABC”, 2005. [En línea]. Disponible: <https://bit.ly/3HuToCt>. [Accedido: 2-septiembre-2020]
- [5] L. Almansa Lopez, “Intotally”, 11 Julio 2013. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/9r5DfX>. [Accedido: 02-septiembre-2020]
- [6] “CISCO”, 2021. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/EyTlaM>. [Último acceso: 15-abril-2021]
- [7] J. Wannstrom, “3GPP”, Junio 2013. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/xTGHyl>. [Accedido: 24-enero-2022]
- [8] 4G LTE MALL, “Vodafone Launches Gigabit LTE with 4x4 MIMO”, 2017. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/2cv8jO>. [Accedido: 28-enero-2022]
- [9] S. Parkvall, A. Furuskar, E. Dahlman y S. Wänstedt, “LTE-advanced - Evolving LTE towards IMT-advanced”, Canada, 2008. Disponible: <https://acortar.link/ILtXql>. [Accedido: 29-October-2023]
- [10] R. Agusti Comes, F. Bernardo Alvarez y F. Casadevall Palacio, “LTE: Nueva tendencias en comunicaciones moviles”, Fundación Vodafone España, 2010. Disponible: <https://acortar.link/JBmOlX>. [Accedido: 29-October-2023]
- [11] T. Global, “Telcoma”, 2023. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/BUvoG6>. [Accedido: 29-October-2023]

- [12] AlexSRo, "Huawei", [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/iVQ4XC>. [Accedido: 31-enero-2022]
- [13] Arimas, "Arimas", [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/Bg9J3M>. [Accedido: 31-enero-2022]
- [14] M. Frackiewicz, "TS2", 15 Julio 2023. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/fmj6F2>. [Accedido: 20-octubre-2023]
- [15] Forsk, "Atoll Overview". [En línea]. Disponible: <https://www.forsk.com/atoll-overview>. [Accedido: 27-enero-2022]
- [16] Forsk, "Atoll 3.3.0 User Manual". [Accedido: 27-enero-2022]
- [17] RF Wireless World "RF drive test/testing basics", 2012. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/Q53nPR>. [Accedido: 15-abril-2021]
- [18] "Infovista", 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.infovista.com/tems>. [Accedido: 04-abril-2021]
- [19] "Optionbox", 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.optionbox.co.uk/internet-circuits/indoor-and-outdoor-wireless-networks/>. [Accedido: 04-abril-2021]
- [20] "Giga Telecom", 6 Julio 2012. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/UrCiVg>. [Accedido: 10-mayo-2021]
- [21] S. D. R. López García y L. A. Hernández Rocha, "Método para la realización de un Swap en una red 3G en la ciudad de León", tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería, 2021. [En línea]. Disponible: <https://ribuni.uni.edu.ni/3940/>. [Accedido: 04-julio-2021]
- [22] "SmartGSM". [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/QclZck>. [Accedido: 22-julio-2022]
- [23] "SmartGSM". [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/VhF3iO>. [Accedido: 22-julio-2022]

- [24] J. M. Gomez Roja y X. R. Romero Ortiz, “Análisis del throughput en una red LTE-A con el modelo SPM calibrado y distintas estrategias del packet Sheduling”, tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería, 2018. [En línea]. Disponible: <https://ribuni.uni.edu.ni/2218/>. [Accedido: 1-septiembre-2020]
- [25] Dropbox, “Dropbox”. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/fvGkwh>. [Accedido: 27-julio-2022]
- [26] T. Brüggén, “Sistema de prueba R&S®TS8980 verifica los indicadores de calidad LTE CQI, PMI y RI”. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/J2eN7x>. [Accedido: 8-Julio-2022]
- [27] F. J. Falcone Lanas, F. Esparza Alfaro y V. Torres Landívar, “Análisis del comportamiento de esquemas de modulación en LTE”, Pamplona, 2009. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/CCqnox>. [Accedido: 12-julio-2022]
- [28] J. F. López, “economipedia”. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/Uia2fk>. [Accedido: 29-enero-2023]
- [29] G. Westreicher, “economipedia”. [En línea]. Disponible: <https://economipedia.com/definiciones/promedio.html>. [Accedido: 29-enero-2023]
- [30] J. F. López, “economipedia”. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/X8qnh0>. [Accedido: 29-enero-2023]
- [31] J. R. Aubert Cárcamo, “Estudio del Comportamiento de los Esquemas de Modulación Digital en LTE”, tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería, 2016. [En línea]. Disponible: <https://ribuni.uni.edu.ni/1217/>. [Accedido: 12-julio-2023]
- [32] J. T. J. Penttinen, The LTE-Advanced Deployment Handbook: The Planning Guidelines for the Fourth Generation Networks”, Wiley Telecom, 2014. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/iQNR3D>. [Accedido: 2-abril-2023]
- [33] “XirioOnline”, [En línea]. Disponible: <https://www.xirio-online.com/web/help/es/index.htm>. [Accedido: 2-abril-2023]

- [34] E. A. Maltez Rodríguez y N. E. Valle Martínez, A, “Diseño y simulación de una red LTE-A para la Zona Urbana de la Ciudad de Granada”, tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería, 2019. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/iQNR3D>. [Accedido: 2-abril-2023]
- [35] “Napit Global Network Solutions”. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/dTbNqh>. [Accedido: 28-febrero-2023]
- [36] I. Fernandez, “PLANIFICACIÓN Y DIMENSIONADO DE UNA RED LTE”, tesis de grado, Universidad Politecnica de Cataluña, 2014. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/56u9T3>. [Accedido: 18-abril-2023]
- [37] K. L. García Ruiz, R. D. Medina y C. A. Tenorio Zuniga, “Análisis técnico de LTE para su implementación en la ciudad de Managua, Nicaragua”, tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería, 2014. [En línea]. Disponible: <https://ribuni.uni.edu.ni/1139/>. [Accedido: 03-septiembre-2020]
- [38] J. A. Balmaceda Fonseca y K. R. Arana Orozco, “Estudio técnico de migración de la red de acceso de la tecnología WIMAX a LTE en la empresa Yota de Nicaragua”, tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería, 2015. [En línea]. Disponible: <https://ribuni.uni.edu.ni/1459/>. [Accedido: 1-septiembre-2020]
- [39] S. Antipolis Valbonne, “3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Physical Layer Procedures For Data, 3GPP”, France, 2017. Disponible: [https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38\\_series/38.214/](https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.214/). [Accedido: 23-ocubre-2023]
- [40] I. Akyildiz, D. Gutierrez y E. Chavarria, “The evolution to 4G cellular systems: LTE-Advanced, Physical Communication”, 2010. Disponible: <https://acortar.link/v5cac3>. [Accedido: 23-ocubre-2023]

## 10. Anexos



Figura 101. Tilt Mecánico.

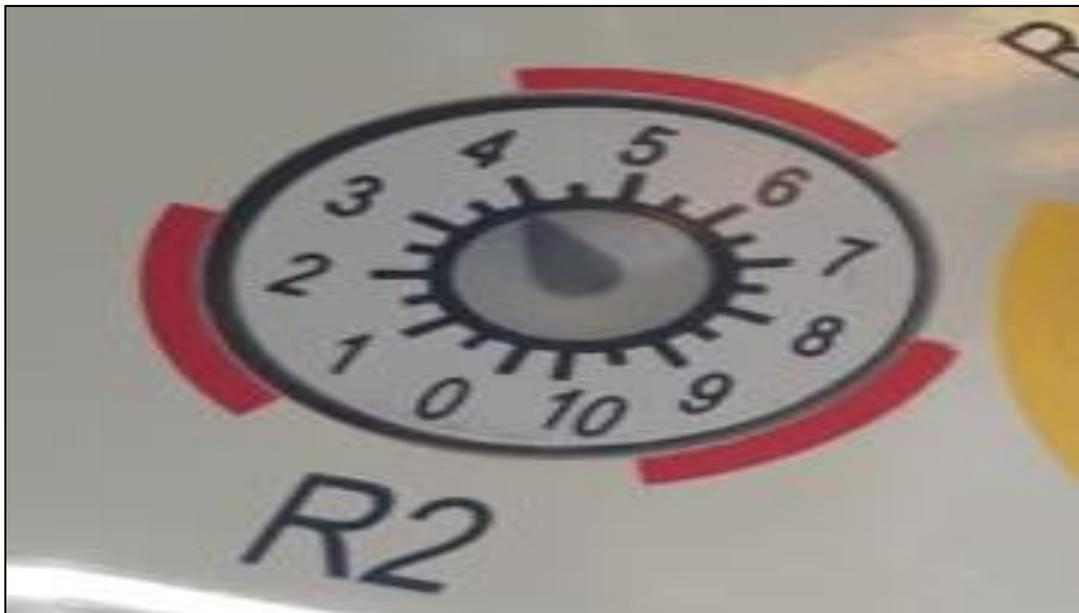
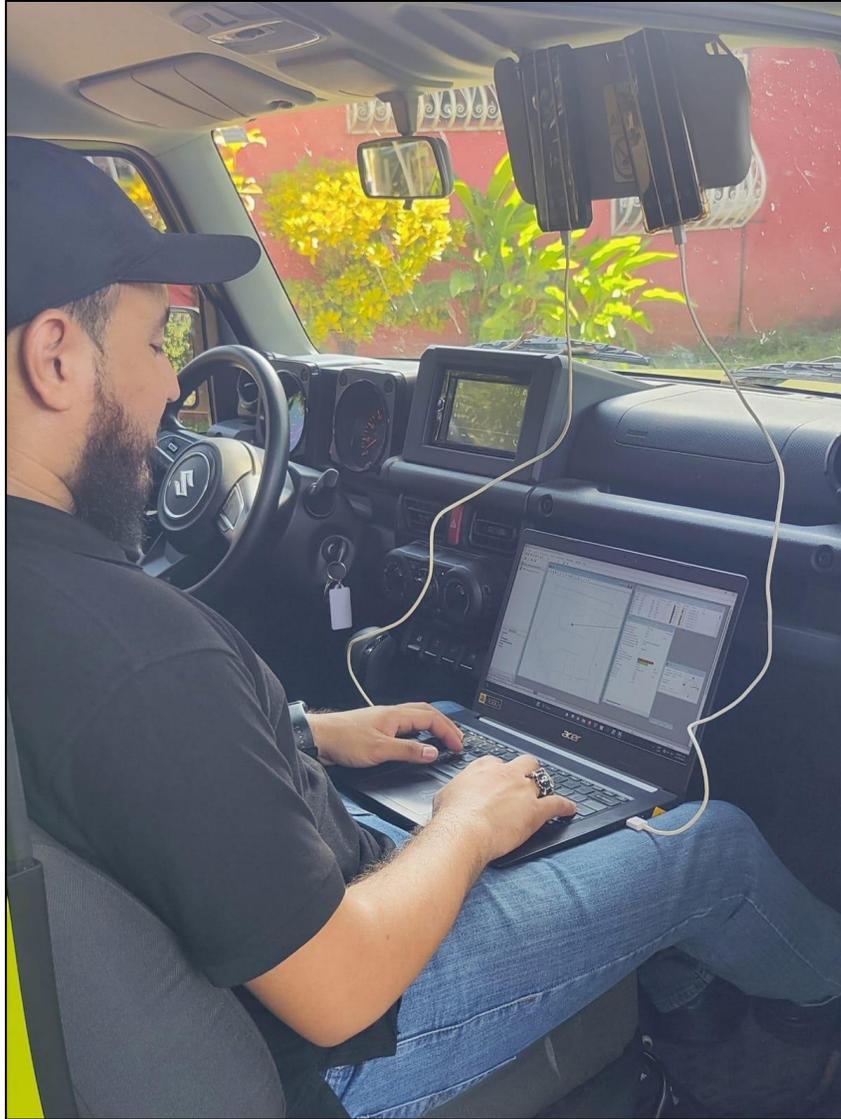


Figura 102. Tilt Eléctrico.



**Figura 103. Mediciones de campos con equipos de medición.**