

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**DISEÑO DE UNA RED 4G-LTE INDOOR PARA EL CENTRO  
COMERCIAL REAL PLAZA SANTA CLARA**

Tesis para optar el Título de Ingeniero de las Telecomunicaciones, que  
presenta el bachiller:

**MICHAEL EDUARDO CHANCASANA CUETO**

ASESOR: Ing. Cristhian Castro Chávez

**Lima, noviembre del 2015**

## Resumen

El presente proyecto de tesis consiste en realizar el diseño de una red 4G-LTE *INDOOR* para el centro comercial Real Plaza Santa Clara con los objetivos de mejorar la cobertura celular y aumentar la velocidad de acceso a internet móvil; con ello, se busca ofrecer un mejor servicio móvil que se traducirá en ganancias. Se usa la solución *indoor* de un sistema pasivo distribuido de antenas (DAS) para su desarrollo. Se tienen en cuenta: el cumplimiento de los KPI de LTE; las posibilidades de implementación en las zonas elegidas para el despliegue; que los resultados finales del diseño sean los deseados y analizar si el proyecto es rentable. La tesis está dividida en 4 capítulos que se presentan a continuación.

El primer capítulo desarrolla el marco teórico de la tecnología 4G LTE y las soluciones *indoor* explicando los detalles más importantes para el desarrollo del diseño.

El segundo capítulo está centrado en el análisis de la problemática de cobertura aplicando parte de la metodología del proyecto previo al desarrollo del diseño.

El tercer capítulo presenta la ingeniería de diseño tomando en consideración lo necesario para un desarrollo óptimo; además, muestra simulaciones de cobertura en *software* como también resultados finales reales post-instalación.

El cuarto capítulo, por su parte, describe el análisis económico del proyecto; así como, la evaluación de rentabilidad del mismo.

Por último, se presentan las conclusiones y recomendaciones del presente proyecto. Se proponen algunos trabajos que permitan tener una visión más amplia de lo que significa desplegar una red *indoor* y su proyección a futuro.

## Dedicatoria



A mis padres por su amor y enseñanzas,  
a mis hermanos por ser un ejemplo a seguir  
y a mis amigos por ser parte de mi vida.

## Agradecimientos

A mis padres, por su amor incondicional, por su esfuerzo de querer darme siempre lo mejor, por sus enseñanzas y consejos, por soportarme como soy, por creer en mí y apoyarme en cada momento. Son el principal motor de mi vida, no sería nada sin ustedes.

A mis hermanos, por su cariño y respeto, por ser mis consejeros y guías en todos los aspectos de la vida, y por esos imborrables momentos juntos.

A mi familia, por estar siempre pendientes de mí y desearme lo mejor en la vida.

A mi asesor, el ingeniero Cristhian Castro Chávez por su apoyo y su disposición para resolver mis dudas en la realización de la tesis.

Al *Team Wireless* de Alcatel-Lucent por su apoyo, información y enseñanzas.

A mis amigos más cercanos por apoyarme y estar presentes en momentos importantes de mi vida.

# Índice

Índice .....	I
Lista de Figuras .....	III
Lista de Tablas .....	V
Glosario .....	VI
Introducción .....	1
<b>Capítulo 1 Marco teórico .....</b>	<b>2</b>
1.1 Estado del arte. ....	2
1.2 <i>Long Term Evolution</i> .....	6
1.2.1 Motivaciones de LTE .....	6
1.2.2 Requerimientos de 3GPP .....	6
1.2.3 <i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> .....	6
1.2.4 <i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i> .....	8
1.2.5 Flexibilidad del Espectro .....	9
1.2.6 Arquitectura de LTE .....	10
1.2.7 Canales de LTE .....	12
1.2.8 Técnicas Multiantena .....	14
1.2.9 <i>Spatial Multiplexing</i> .....	14
1.2.10 Tramas de LTE .....	16
1.2.11 <i>Resource grid</i> .....	16
1.2.12 <i>Circuit Switched Fall Back</i> .....	17
1.3 Soluciones de despliegue de redes <i>Indoor</i> .....	18
1.4 Opciones de despliegue de redes <i>Indoor</i> .....	19
1.4.1 Sistema Distribuido de Antenas .....	19
1.4.2 Repetidores .....	21
1.4.3 <i>Small Cells</i> .....	21
1.5 Principales <i>Key Performance Indicators</i> .....	21
1.5.1 KPI para 3G .....	21
1.5.2 KPI para 4G .....	22

<b>Capítulo 2 Análisis de la problemática de cobertura .....</b>	<b>23</b>
2.1 Introducción.....	23
2.2 Análisis general .....	23
2.3 Principales datos del centro comercial.....	26
2.4 Distribución de tiendas .....	28
2.5 Metodología.....	30
2.6 Ante-Diseño.....	31
2.6.1 <i>Technical Site Survey</i> .....	31
2.6.2 <i>Walk Test</i> .....	35
2.6.3 Post-Procesamiento .....	37
2.7 Análisis del problema de cobertura.....	38
2.7.1 Análisis de ubicación .....	39
2.7.2 Análisis de KPI .....	40
<b>Capítulo 3 Ingeniería del proyecto.....</b>	<b>44</b>
3.1 Introducción.....	44
3.2 Diseño de red .....	44
3.2.1 Procedimiento.....	46
3.2.2 Simulaciones de 4G.....	60
3.2.3 Simulaciones de 2G y 3G .....	68
3.2.4 Mediciones Post Instalación .....	71
<b>Capítulo 4 Análisis financiero del proyecto .....</b>	<b>78</b>
4.1 Introducción.....	78
4.2 Análisis financiero.....	78
<b>Conclusiones .....</b>	<b>83</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>85</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>87</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>92</b>

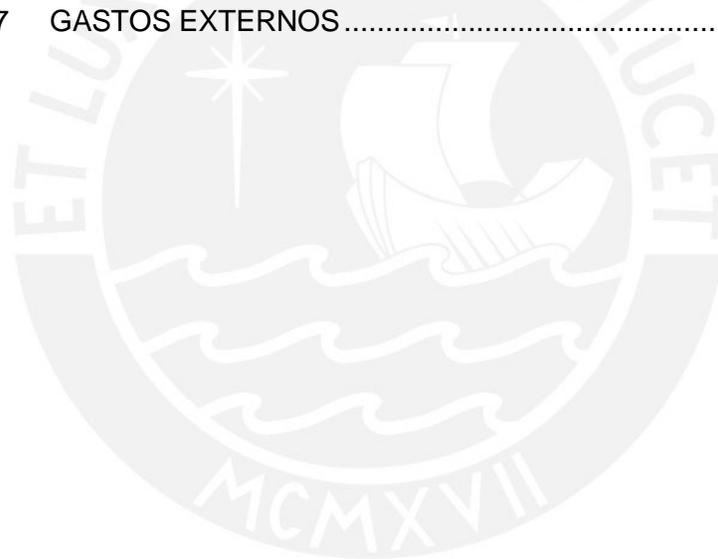
## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- 1	TRÁFICO DE VOZ Y DATOS (2007-2011).....	4
FIGURA 1- 2	OFDMA .....	7
FIGURA 1- 3	SC-FDMA.....	8
FIGURA 1- 4	BANDAS EN FDD .....	9
FIGURA 1- 5	BANDAS EN TDD .....	9
FIGURA 1- 6	ARQUITECTURA DE LTE.....	10
FIGURA 1- 7	ARQUITECTURA DE EPC.....	11
FIGURA 1- 8	MIMO 2X2.....	15
FIGURA 1- 9	ESTRUCTURA DE TRAMA EN FDD.....	16
FIGURA 1- 10	<i>RESOURCE BLOCK – RESOURCE GRID</i> .....	16
FIGURA 1- 11	PROCESO DE CSFB.....	17
FIGURA 2- 1	INDICADORES DE SERVICIO DE INTERNET MÓVIL .....	24
FIGURA 2- 2	COBERTURA LTE MOVISTAR – PERÚ .....	25
FIGURA 2- 3	COBERTURA LTE ENTEL – PERÚ .....	25
FIGURA 2- 4	COBERTURA LTE CLARO – PERÚ .....	26
FIGURA 2- 5	VISTA SATELITAL DEL CENTRO COMERCIAL .....	27
FIGURA 2- 6	PLANO DEL CENTRO COMERCIAL .....	27
FIGURA 2- 7	FACHADA DEL CENTRO COMERCIAL .....	28
FIGURA 2- 8	DISTRIBUCIÓN COMERCIAL.....	29
FIGURA 2- 9	ÁREAS CUBIERTAS POR EL PROYECTO .....	30
FIGURA 2- 10	LASER BOSCH DLR130.....	31
FIGURA 2- 11	CUARTO DE EQUIPOS.....	32
FIGURA 2- 12	BANDEJAS DE CABLEADO .....	32
FIGURA 2- 13	POSIBLE UBICACIÓN DE ANTENAS.....	33
FIGURA 2- 14	TSS DEL PISO 1 .....	34
FIGURA 2- 15	TSS DE LA AZOTEA.....	34
FIGURA 2- 16	MÓVIL DE PRUEBA Y MÓVIL RECEPTOR.....	35
FIGURA 2- 17	EJEMPLO DE <i>TEST</i> EN <i>NEMO HANDY</i> .....	36
FIGURA 2- 18	CAPTURA DE PANTALLA DE <i>NEMO ANALYZE 5</i> .....	37
FIGURA 2- 19	ESTACIONES VECINAS.....	39
FIGURA 2- 20	MEDICIÓN DE RSCP.....	40
FIGURA 2- 21	MEDICIÓN DE EC/NO .....	41
FIGURA 2- 22	MEDICIÓN DE <i>TX POWER</i> .....	42
FIGURA 2- 23	MEDICIÓN DE <i>SCRAMBLING CODE</i> .....	43
FIGURA 3- 1	DIAGRAMA DEL DAS .....	45
FIGURA 3- 2	BASE DE DATOS DE LOS COMPONENTES.....	46
FIGURA 3- 3	IMPORTACIÓN DE PLANO AL <i>IBWAVE</i> .....	47
FIGURA 3- 4	VISTA 3D DEL CENTRO COMERCIAL.....	47
FIGURA 3- 5	UNILINEAL DEL SECTOR 1 .....	50
FIGURA 3- 6	UNILINEAL DEL SECTOR 2 .....	51
FIGURA 3- 7	UNILINEAL DEL SECTOR 3 .....	52
FIGURA 3- 8	UNILINEAL DEL SECTOR 4 .....	53
FIGURA 3- 9	POSICIÓN DE ANTENAS Y CABLEADO EN PISO 1 .....	56

FIGURA 3- 10	POSICIÓN DE CABLEADO EN AZOTEA.....	57
FIGURA 3- 11	UBICACIÓN DE EQUIPOS PRINCIPALES EN PISO 1 .....	58
FIGURA 3- 12	UBICACIÓN DE EQUIPOS PRINCIPALES EN AZOTEA .....	58
FIGURA 3- 13	VISTA INTERNA EN 3D DEL CABLEADO .....	59
FIGURA 3- 14	VISTA EN 3D CON PREDICCIÓN A 1.5m .....	60
FIGURA 3- 15	FACTORES DE <i>FAST RAY TRACING</i> .....	61
FIGURA 3- 16	PREDICCIÓN DE RSRP .....	62
FIGURA 3- 17	PREDICCIÓN DE RSRQ.....	63
FIGURA 3- 18	PREDICCIÓN DE TASA DE DATOS.....	64
FIGURA 3- 19	PREDICCIÓN DE RS SNIR.....	65
FIGURA 3- 20	PREDICCIÓN DE UE TX <i>POWER</i> .....	66
FIGURA 3- 21	PREDICCIÓN DE MEJOR SERVIDOR .....	67
FIGURA 3- 22	PREDICCIÓN DE RSCP .....	69
FIGURA 3- 23	PREDICCIÓN DE RX <i>LEVEL</i> .....	70
FIGURA 3- 24	MEDICIÓN DE RSRP .....	71
FIGURA 3- 25	MEDICIÓN DE RSRQ .....	72
FIGURA 3- 26	MEDICIÓN DE TASA DE DATOS .....	73
FIGURA 3- 27	MEDICIÓN DE SNIR .....	74
FIGURA 3- 28	MEDICIÓN DE MEJOR SERVIDOR.....	75
FIGURA 3- 29	MEDICIÓN DE RSCP.....	76
FIGURA 3- 30	MEDICIÓN DE RX <i>LEVEL</i> .....	77
FIGURA 4- 1	FLUJO DE CAJA.....	82

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1- 1	SUB-PORTADORAS DE LTE.....	7
TABLA 2- 1	AFOROS .....	29
TABLA 2- 2	ESTACIONES CERCANAS.....	39
TABLA 3- 1	SECTORIZACIÓN DEL PROYECTO .....	48
TABLA 3- 2	LEYENDA DE ETIQUETADO.....	49
TABLA 3- 3	LEYENDA DE COMPONENTES TOTALES .....	54
TABLA 3- 4	KPI DE LTE Y RANGOS ACEPTABLES .....	60
TABLA 3- 5	KPI DE 3G-2G Y RANGOS ACEPTABLES.....	68
TABLA 4- 1	POBLACIÓN EFECTIVA DEL PROYECTO.....	79
TABLA 4- 2	CRECIMIENTO DE POBLACIÓN EFECTIVA PARA VOZ.....	80
TABLA 4- 3	CRECIMIENTO DE POBLACIÓN EFECTIVA PARA DATOS.....	80
TABLA 4- 4	CONSIDERACIONES PARA LAS GANANCIAS.....	80
TABLA 4- 5	GANANCIAS DEL SERVICIO DE VOZ.....	80
TABLA 4- 6	GANANCIAS DEL SERVICIO DE DATOS.....	81
TABLA 4- 7	GASTOS EXTERNOS.....	81



## Glosario

<b>3GPP</b>	Proyecto Asociación de Tercera Generación
<b>ADSL</b>	Línea de Abonado Digital Asimétrica
<b>ARPANET</b>	Red de la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados
<b>AWS</b>	Servicios Inalámbricos Avanzados
<b>Banda D</b>	UL: 1 865 - 1 870 MHz y DL: 1 945 -1 950 MHz
<b>Banda E</b>	UL: 1 882,5 - 1 895 MHz y DL: 1 962,5 -1 975 MHz
<b>CC</b>	Centro Comercial
<b>DARPA</b>	Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa
<b>DL</b>	Enlace Descendente
<b>DSL</b>	Línea de Abonado Digital
<b>EDGE</b>	Tasas de Datos Mejoradas para la Evolución de GSM
<b>FO</b>	Fibra Óptica
<b>GMSK</b>	Modulación por Desplazamiento Mínimo Gaussiano
<b>GPRS</b>	Servicio General de Paquetes vía Radio
<b>GSM</b>	Sistema Global para las comunicaciones Móviles
<b>HOTSPOTS</b>	Se refiere a establecimientos con gran afluencia de personas
<b>HSDPA</b>	Acceso de Paquetes en Bajada a Alta Velocidad
<b>HSPA</b>	Acceso de Paquetes a Alta Velocidad
<b>HSUPA</b>	Acceso de Paquetes en Subida a Alta Velocidad
<b>INDOOR</b>	Se refiere al interior de las edificaciones
<b>MU-MIMO</b>	Múltiple Usuarios MIMO
<b>OUTDOOR</b>	Se refiere al exterior de las edificaciones
<b>PDN</b>	Red Pública de Datos
<b>PIM</b>	Intermodulación Pasiva
<b>PSTN</b>	Red Telefónica Pública Conmutada
<b>SISO</b>	Entrada Única Salida Única
<b>SNR</b>	Relación Señal Ruido
<b>TTI</b>	Intervalo de Tiempo de Transmisión
<b>UL</b>	Enlace Ascendente
<b>UMTS</b>	Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles
<b>VoLTE</b>	Voz sobre LTE
<b>WCDMA</b>	Acceso Múltiple por División de Código en Banda Ancha

## Introducción

Con la aparición de Internet en la década del sesenta en EEUU, cuyo génesis fue una red de carácter netamente militar desarrollada por DARPA denominada ARPANET [1], se generó una de las más importantes revoluciones tecnológicas. El notable crecimiento de internet llevó consigo muchos cambios desde sus inicios, afectando diversos campos como: la industria, el comercio, la salud, la educación, la comunicación, etc. Uno de los campos donde se muestran investigaciones y avances más significativos es el de las comunicaciones móviles, que tuvo que modificar su arquitectura para ofrecer no sólo llamadas de voz sino también internet móvil. Esto debido a la creciente demanda de parte de los usuarios por alta velocidad, acceso desde cualquier lugar y en cualquier momento.

Los frecuentes cambios en las comunicaciones móviles sumados al auge inmobiliario en los últimos años hacen complicado que las redes *outdoor* satisfagan las necesidades de cobertura y capacidad al interior de cada edificación; esto se debe al limitante físico propio de las ciudades modernas que generan mayores retos a los diseñadores de redes celulares. Es por ello que surgen las redes *indoor*, como una solución para cubrir estas necesidades en lugares específicos con déficit de cobertura y alto tráfico de usuarios como: aeropuertos, centros comerciales, estadios; para así, mejorar el servicio y descongestionar la red *outdoor*.

La presente tesis realiza el diseño de una red 4G-LTE *Indoor* para el centro comercial Real Plaza Santa Clara con los objetivos de mejorar la cobertura y aumentar la velocidad de acceso; con ello, ofrecer un mejor servicio que se traducirá en ganancias para el operador y satisfacción de los usuarios.

El desarrollo de la presente tesis conlleva una breve descripción teórica de la tecnología 4G-LTE y la solución escogida, la evaluación del problema de cobertura en el centro comercial, el diseño de la red *indoor* con los alcances y consideraciones de ingeniería, la presentación de los resultados finales y por último, el análisis financiero del proyecto con la evaluación de rentabilidad del mismo.

## Capítulo 1: MARCO TEÓRICO

### 1.1 Estado del arte

El generalizado uso del internet hace que ya no sólo se le necesite en casa o en el trabajo con un equipo de escritorio; sino también en las calles, en los viajes y hasta en la vida diaria. Ante el aumento de la necesidad de acceso a internet, las tecnologías de comunicaciones móviles han evolucionado su arquitectura inicial para poder ofrecer internet móvil en celulares. Este cambio ha avanzado durante los años ofreciendo en el proceso mejoras en cuestiones de velocidad de acceso, capacidad de datos, convergencia con otras tecnologías, menor latencia y otros. Esta evolución se caracterizó por la clasificación en generaciones, siendo la primera (1G o primera generación) netamente analógica en los inicios de la década del ochenta [2].

La 2G (también denominada GSM) surgió a mediados de la década del ochenta en Europa. Está basada en sistemas de comunicación digital [2]. Este sistema trabaja con un único dominio, *Circuit Switched* (CS) o Conmutación de Circuitos, el cual transporta las llamadas hacia la PSTN [3]. Se establece una arquitectura con 3 partes: la red núcleo, la red de acceso de radio y el teléfono móvil. En un inicio 2G fue exclusiva para voz, luego insertó datos en su tráfico como SMS y correos con una velocidad de datos de 9.6kbps [2]. La transmisión se basa en una combinación de TDMA y FDMA con

portadoras de 200kHz y modulación GMSK [4]. El tercer sistema denominado GPRS o 2.5G tuvo lugar en la segunda mitad de la década del noventa, mantiene las principales características de GSM pero añade el dominio *Packet Switched* (PS) o Conmutación de Paquetes y permite la transmisión de paquetes de datos a velocidades de hasta 40kbps [2]. Con el aumento de velocidades de datos surgió el estándar EDGE, también denominado 2.75G, que presenta el mismo diseño de sus antecesores de segunda generación pero con velocidades de datos de hasta 384kbps [5].

La tercera generación (3G o UMTS) fue desarrollada en 1998 con velocidades de datos de hasta 2Mbps, fue en esta generación que los datos ya se integran por completo a la voz y progresivamente se hace un mejor uso del espectro de radio [2]. Este sistema introdujo la visión de 2 dominios: el primero es el *Circuit Switched* (CS), el cual transporta las llamadas hacia la PSTN, y el segundo en el *Packet Switched* (PS), el cual transporta el flujo de datos hacia el PDN (ejemplo internet) [3]. La transmisión se basó en WCDMA que trabaja con códigos diferentes para cada usuario, portadora de 5MHz, modulación BPSK para UL y QPSK para DL [6]. La siguiente evolución fue denominada 3.5G o HSPA, generación en la cual se optimizan velocidades de datos tanto para el DL (HSDPA) con 14.4Mbps como para el UL (HSUPA) con 5.8 Mbps [5]. La última evolución 4G o LTE surgió en el 2008. Brinda mayores velocidades comparadas con sus predecesoras para ofrecer una mejor experiencia de usuario. Estas velocidades son de hasta 50Mbps en el UL y 100Mbps en el DL. Es en esta generación que ocurre un cambio en la estructura, ya que la voz al no tener un dominio propio pasa a ser un servicio de los datos usando redes multimedia IP o VoLTE [7].

*Long Term Evolution* (LTE) cuya aparición data del 2004, completa su desarrollo con el *Release 8* en el 2008 [8]. LTE ofrece mejoras en términos de velocidad, latencia, soporte de aplicaciones, rendimiento y facilidad de despliegue [2]. Si bien es una tecnología en pleno desarrollo desde su aparición se viene implementando de manera favorable. Es así que hasta mayo del 2015 son 142 países los que han desplegado LTE, de los cuales 17 se encuentran en Latinoamérica [9]. Su aceptación y desarrollo masivo se debe al incremento crítico del tráfico de datos, la aparición de *smartphones* y numerosas aplicaciones en los últimos años.

En la Figura 1-1 se observa el crecimiento crítico del tráfico de datos desde el 2007 hasta el 2011 según un estudio de la compañía Ericsson.

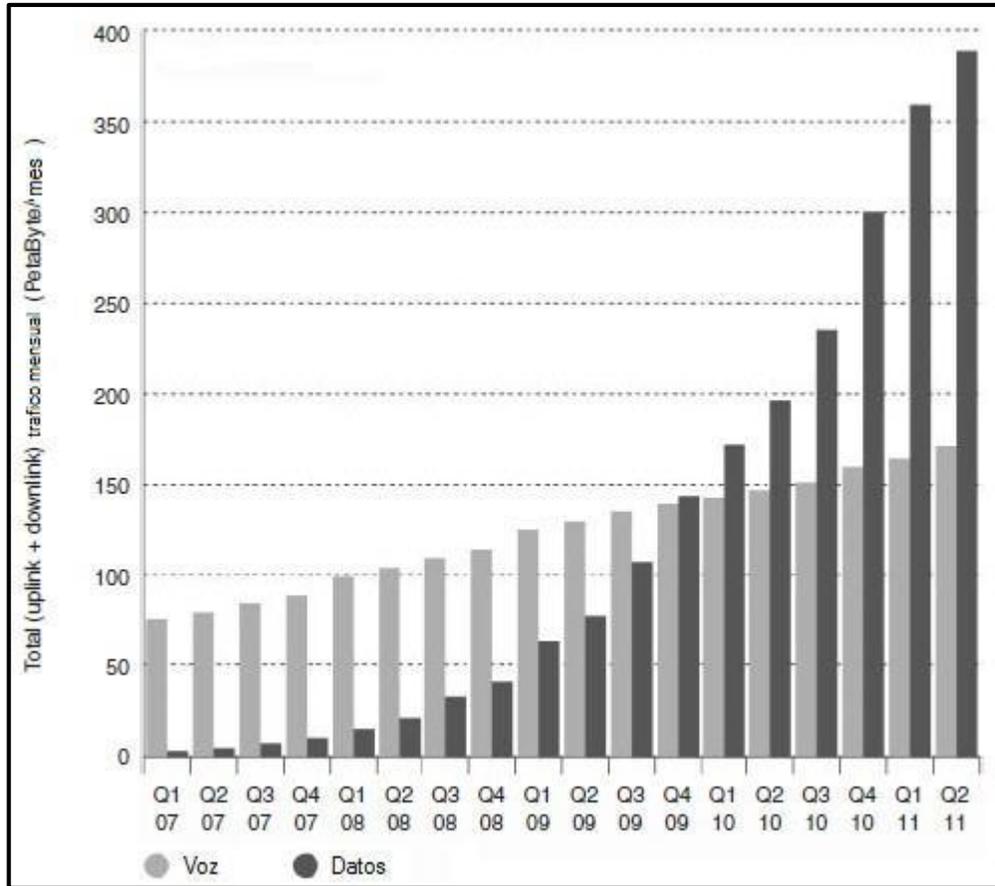


FIGURA 1-1: TRÁFICO DE VOZ Y DATOS (2007-2011)

FUENTE: AN INTRODUCTION TO LTE [3]

El Perú se encuentra entre estos 17 países con despliegue de 4G, ya que desde el 1 de enero del 2014 entró en vigencia la red LTE de Movistar [10], en junio del 2014 la red de Claro y en octubre del 2014 desplegó LTE comercialmente Entel, segunda operadora ganadora de una de las dos bandas de LTE (la primera fue Movistar) [11].

En la actualidad, el servicio de LTE representa el 7% de la cuota del mercado móvil mundial con 498 millones de conexiones y se estima que para el año 2018 represente el 16% [9]. El despliegue de LTE se da en la mayoría de las redes aplicando FDD que implica el uso de dos porciones de bandas de frecuencia; una para DL y la otra para UL. Pero una nueva opción está surgiendo con fuerza en el mundo: es el despliegue en

TDD que implica el uso de sólo una banda de frecuencia para DL y UL. Las cuatro principales ventajas que tiene TD-LTE, así se denomina a este nuevo despliegue, frente al despliegue en FDD son: los bajos costos de implementación, la utilización flexible del espectro, la alta eficiencia espectral para adaptar la configuración de UL/DL y la supresión de interferencia. Hasta abril del 2015 son 35 los países que han implementado esta nueva opción con 58 redes. Se tienen adicionalmente 81 redes en planificación o despliegue [12].

Los cambios cada vez más frecuentes en los últimos años hacen que las redes *outdoor* se vean desfavorecidas ante el crecimiento de las ciudades. Muchas soluciones se han planteado para frenar este problema, pero la que ha evolucionado y está siendo aplicada cada vez más es la solución *indoor*. Surge como una opción de despliegue de red para interiores como: edificios, centros comerciales, aeropuertos, estadios, etc. Esta solución tiene diversas opciones como el uso de repetidores que repiten la señal del *outdoor* hacia los interiores, sistemas distribuidos de antenas que reparten la señal provista por un equipo central y *small cells* que son celdas de menor capacidad en comparación con las celdas *outdoor*. Esta solución sigue en constante investigación. Su futuro es prometedor debido a que la tendencia en despliegue de redes es tener cada vez más estaciones de menor área de cobertura con la finalidad de concentrar los recursos en pequeñas áreas; para con ello asegurar mayor velocidad y calidad de servicio.

## 1.2 Long Term Evolution

Sistema de comunicación móvil de cuarta generación o 4G diseñado por 3GPP, comenzó su desarrollo en el 2004 y finalizó en el 2008 con el *Release 8* en el cual se dan sus especificaciones. El principal cambio en esta tecnología es el diseño basado en el dominio de datos IP en el cual la voz pasa a ser un servicio externo de datos denominado VoLTE [7].

### 1.2.1 Motivaciones de LTE

- Alta demanda por velocidades de datos: los usuarios demandan cada vez mayor velocidades de acceso [8]
- Baja complejidad: simplifica la arquitectura teniendo sólo el dominio *packet switched* [8]
- Reducción en CapEx y OpEx: Al tener solo un dominio, se reducen los costos e inversiones [8]
- Baja latencia: se busca reducir el tiempo de retardo de un paquete enviado desde un servidor hacia un cliente y de regreso [2]
- Disminuir las diferencias de soluciones entre TDD y FDD [2]

### 1.2.2 Requerimientos de 3GPP

- Velocidades: 100Mbps en el DL y 50Mbps en el UL
- Baja latencia: alrededor de 10ms
- Incrementar la eficiencia espectral (EE)
- Optimización IP
- Portadoras escalables de 1.4MHz, 3MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz y 20MHz
- Soporte para TDD y FDD
- Compatibilidad con sistemas móviles existentes [13]

### 1.2.3 Orthogonal Frequency Division Multiple Access

Acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (OFDMA por sus siglas en inglés), es una técnica de acceso múltiple de multi-portadoras que permite a la estación base comunicarse con varios terminales a la vez, como también reducir problemas por desvanecimiento e interferencia intersímbolo [3]. Permite tener mayor número de subportadoras gracias a su naturaleza ortogonal [2]. La propiedad de ortogonalidad se

da debido a que el pico de una subportadora coincide con los ceros de las demás portadoras y no se interfieren [3]. Además, OFDMA también considera subportadoras ortogonales entre sí en el tiempo, es por ello que éstas se pueden superponer sin interferencia.

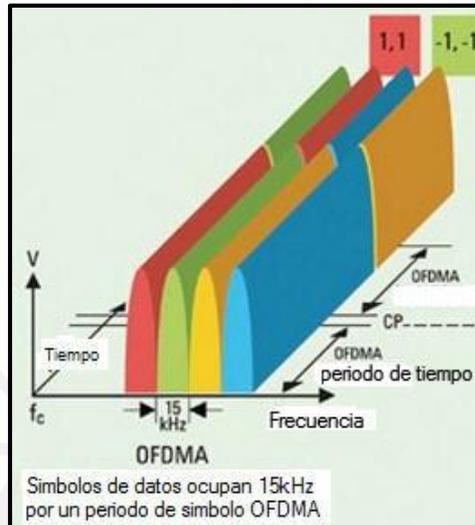


FIGURA 1-2: OFDMA

FUENTE: ACCESO MÚLTIPLE - OFDMA [14]

En LTE las portadoras tienen una banda de guarda de 10% y las subportadoras son de 15kHz, haciendo que varíe su cantidad total con cada portadora que soporta LTE [2]. La Tabla 1-1 muestra más detalles de la cantidad de subportadoras por cada portadora permitida en LTE.

TABLA 1-1: SUB-PORTADORAS DE LTE

FUENTE: AN INTRODUCTION TO LTE [3] – ELABORACIÓN PROPIA

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



### 1.2.5 Flexibilidad del Espectro

Una de las características de LTE es la gran flexibilidad en el uso del espectro, ya que soporta el despliegue en diferentes bandas de frecuencia y con diferentes portadoras; como también, permite el despliegue en FDD con un par de bandas (UL y DL) y en TDD con una sola banda [2]. Las bandas de LTE se muestran a continuación:

Banda	Release	Banda Uplink (MHz)	Banda Downlink (MHz)	Region Central	Notas
1	R99	1920–1980	2110–2170	Europe, Asia, Africa	WCDMA
2	R99	1850–1910	1930–1990	Americas	GSM 1900, CDMA
3	R5	1710–1785	1805–1880	Europe, Asia, Africa	GSM 1800
4	R6	1710–1755	2110–2155	Americas	
5	R6	824–849	869–894	Americas	GSM 850, CDMA
6	–	–	–	–	No usado en LTE
7	R7	2500–2570	2620–2690	Europe	
8	R7	880–915	925–960	Europe, Asia, Africa	GSM 900
9	R7	1749.9–1784.9	1844.9–1879.9	Japan	
10	R7	1710–1770	2110–2170	Americas	
11	R8	1427.9–1447.9	1475.9–1495.9	Japan	
12	R8	699–716	729–746	USA	Dividendo Digital
13	R8	777–787	746–756	USA	Dividendo Digital
14	R8	788–798	758–768	USA	Dividendo Digital
15	–	–	–	–	No usado por 3GPP
16	–	–	–	–	No usado por 3GPP
17	R8	704–716	734–746	USA	Dividendo Digital
18	R9	815–830	860–875	Japan	
19	R9	830–845	875–890	Japan	
20	R9	832–862	791–821	Europe	Dividendo Digital
21	R9	1447.9–1462.9	1495.9–1510.9	Japan	
22	R10	3410–3490	3510–3590	Europe	
23	R10	2000–2020	2180–2200	Norte América	
24	R10	1626.5–1660.5	1525–1559	Norte América	
25	R10	1850–1915	1930–1995	Americas	

FIGURA 1-4: BANDAS EN FDD

FUENTE: AN INTRODUCTION TO LTE [3]

Banda	Release	Banda de frecuencia (MHz)	Region Principal
33	R99	1900–1920	Europe, Asia
34	R99	2010–2025	Europe, Asia
35	R99	1850–1910	Americas
36	R99	1930–1990	Americas
37	R99	1910–1930	Americas
38	R7	2570–2620	Europe
39	R8	1880–1920	China
40	R8	2300–2400	China
41	R10	2496–2690	USA
42	R10	3400–3600	Europe
43	R10	3600–3800	Europe

FIGURA 1-5: BANDAS EN TDD

FUENTE: AN INTRODUCTION TO LTE [3]

### 1.2.6 Arquitectura de LTE

La arquitectura de redes móviles se compone de una red de acceso de radio (RAN), una red núcleo (CN) y el equipo de usuario (UE). En LTE el RAN pasa a denominarse EUTRAN y el CN pasa a llamarse *Evolved Packet Core* (EPC) que juntos forman el *Evolved Packet System* (EPS). El beneficio de tener ambas redes por separado es que permite usar varias tecnologías de acceso con el mismo núcleo [3].

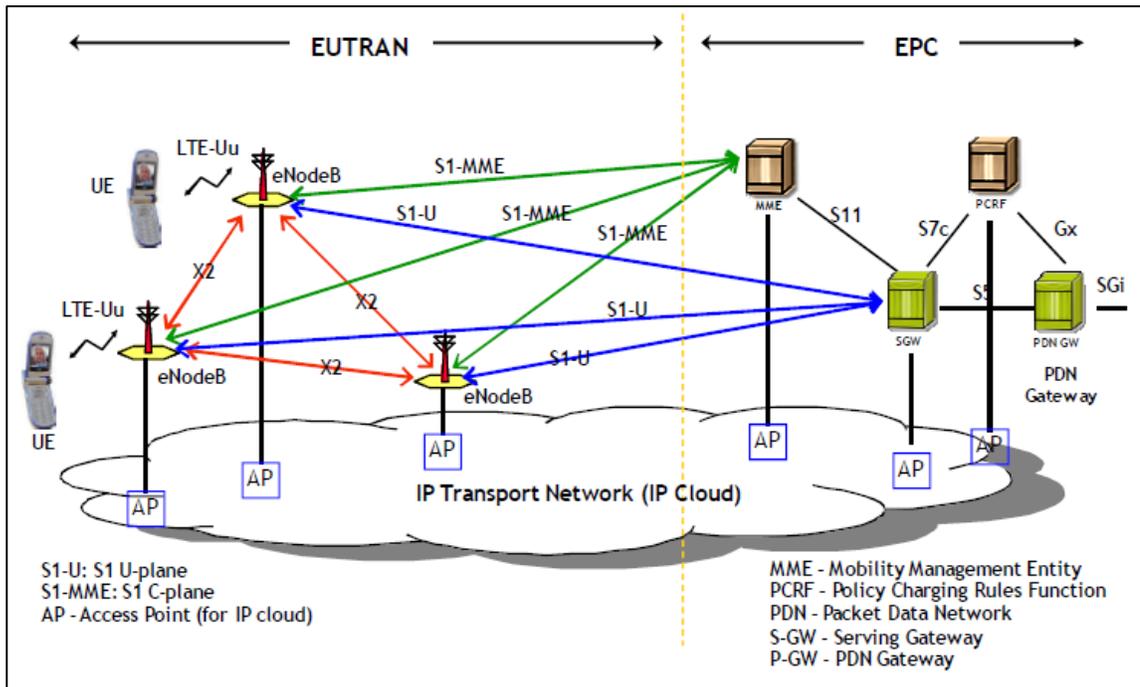


FIGURA 1-6: ARQUITECTURA DE LTE

FUENTE: LTE SOLUTION [15]

- **Equipo de Usuario (UE)**

Está compuesto por el equipo móvil (cumple funciones de comunicación, transmisión de voz y datos) y la tarjeta de circuito integrado universal (UICC); más conocido como SIM (*Subscriber Identity Module*); que contiene la identificación del usuario en la red (IMSI) [3], los datos para la autenticación como el IMEI (código que identifica a cada equipo móvil en el mundo) y también puede albergar contactos [7].

- **Evolved UMTS Terrestrial RAN (EUTRAN)**

La arquitectura EUTRAN maneja la comunicación de radio entre el UE y la EPC [3]. Está compuesta por un sólo elemento denominado *eNodeB* que se conecta con el S-GW mediante la interfaz S1-u, con el MME mediante la interfaz S1-c [2] y entre

*eNodeB* mediante la interfaz X2 para funciones de *handover* [3]. El UE puede estar conectado a un único *eNodeB*, por lo tanto sólo se da el *hard handover*. El *eNodeB* junta la inteligencia que antes se manejaba en el RNC del 3G con el objetivo de reducir la latencia, ya que la información pasa directamente del *eNodeB* a la EPC [7].

### Funciones de EUTRAN [2]

- Transmisión en DL y recepción en UL
- Manejo de los recursos de radio y asignación de portadoras a terminales
- Protocolos de retransmisión y codificación
- Manejo de esquemas multi-antena

- **Evolved Packet Core (EPC)**

Los componentes que son parte de la EPC son: *Home Subscriber Service* (HSS), *Mobility Management Entity* (MME), *Serving Gateway* (S-GW) y *Packet Data Network Gateway* (P-GW) [2].

### Funciones de EPC [2]

- Autenticación
- Funciones de tarificación
- Configuración de conexiones *end-to-end*
- Distribuye la información de voz y datos al terminal [3]

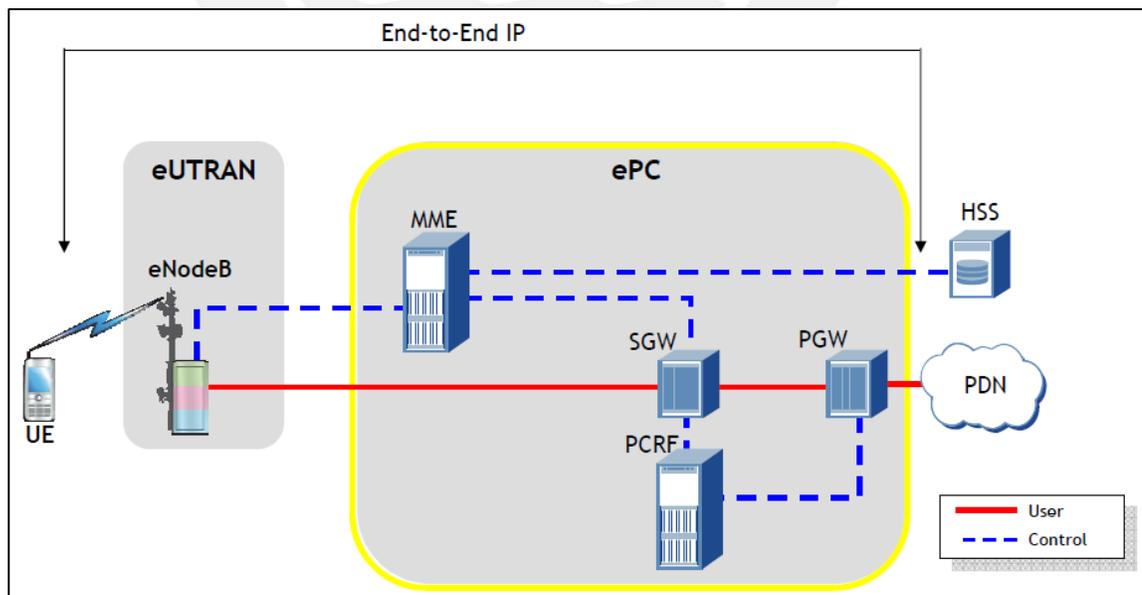


FIGURA 1-7: ARQUITECTURA DE EPC

FUENTE: LTE SOLUTION [16]

- ✓ HSS: es una base de datos que contiene la información de los usuarios
- ✓ MME: es un nodo en plano control que conecta las portadoras a los terminales, maneja transiciones de *IDLE* a *ACTIVE* y las llaves de seguridad
- ✓ S-GW: es un nodo en plano usuario que conecta la EUTRAN con la EPC, distribuye la información y actúa como asegurador cuando los terminales pasan entre *eNodeB* como también entre tecnologías 3GPP
- ✓ P-GW: conecta la EPC a internet por la interfaz SGi, asigna IP a los terminales y controla la calidad de servicio [2]

El HSS se hereda del 3G, el P-GW sustituye al GGSN y el SGSN es dividido en S-GW y MME; esta división hace más escalable a la red ya que al aumentar el tráfico el operador puede agregar S-GN y al aumentar la cantidad de usuarios puede agregar MME para cumplir los requerimientos [3].

### 1.2.7 Canales de LTE

#### Canales lógicos

La capa MAC provee servicios a la capa RLC mediante los canales lógicos. Estos canales se clasifican como:

- Canales lógicos de control: usado para la transmisión de información de control y configuración propia del sistema.
- Canales lógicos de tráfico: usado para la transmisión de la información propia del usuario.
- Canales lógicos dedicados: canales asignados a un terminal en específico.
- Canales lógicos comunes: canales que pueden ser usados por más de un terminal [3].

- Canales Lógicos en LTE: [2]

**Broadcast Control Channel (BCCH):** canal que transmite la información del sistema y cómo está configurado la celda hacia los terminales. Esta información es indispensable para que el terminal sepa los parámetros importantes y cómo comportarse dentro de la celda.

**Paging Control Channel (PCCH):** canal usado para la búsqueda del terminal en la celda. Este canal es importante para dirigir la llamada.

**Common Control Channel (CCCH):** canal usado para la transmisión de información de control a varios terminales que están pasando del estado *RRC\_IDLE* al *RRC\_CONNECTED*.

**Dedicated Control Channel (DCCH):** canal usado para la transmisión de información de control hacia o desde un único terminal.

**Dedicated Traffic Channel (DTCH):** canal usado para la transmisión de información del usuario hacia o desde un único terminal.

## Canales de Transporte

La capa MAC usa servicios de la capa física mediante los canales de transporte [3]. La información es transportada en bloques uno a la vez cada TTI, pero con el uso del arreglo MIMO en LTE se puede llegar a enviar hasta dos bloques cada TTI [2].

- Canales de Transporte en LTE [3]

**Broadcast Channel (BCH):** canal usado para transportar la mayor parte de la información del BCCH.

**Paging Channel (PCH):** canal usado para transportar mensajes de *paging* originados por el PCCH.

**Downlink Shared Channel (DL-SCH):** principal canal de transporte de información y señalización en DL. Además, transporta las partes sobrantes del BCCH no abarcadas por el BCH.

**Uplink Shared Channel (UL-SCH):** principal canal de transporte de información y señalización en UL.

**Random Access Channel (RACH):** canal por el cual el terminal puede contactarse con la red sin estar programado el acceso [7].

## Canales Físicos

Los canales físicos son recursos en tiempo y frecuencia que permiten la transmisión de los canales de transporte, cada canal de transporte tiene su respectivo canal físico.

- Canales físicos en LTE [2]

**Physical Downlink Shared Channel (PDSCH):** es el principal canal en DL que lleva información y mensajes de señalización del DL-SCH; como también, transmite información de *paging* del PCH.

**Physical Uplink Shared Channel (PUSCH):** es el principal canal de UL que lleva información y mensajes de señalización del UL-SCH.

Los únicos canales físicos que pueden adaptar su modulación de acuerdo a los cambios del SNR son el PDSCH y el PUSCH; los demás usan normalmente modulación QPSK [3].

**Physical Broadcast Channel (PBCH):** canal que contiene la información del sistema del BCH.

**Physical Downlink Control Channel (PDCCH):** canal que contiene la información de control de DL.

**Physical Hybrid-ARQ Indicator Channel (PHICH):** canal que transporta los *Hybrid ACK* para reportar al terminal si es necesario o no retransmitir la información.

**Physical Uplink Control Channel (PUCCH):** canal que transporta los *Hybrid ACK* para reportar al *eNodeB* si es necesario o no retransmitir de información.

**Physical Random-Access Channel (PRACH):** canal que transporta el acceso aleatorio del RACH.

### 1.2.8 Técnicas Multiantena

Técnicas que manejan diversas configuraciones teniendo en común el uso de múltiples antenas para la transmisión y/o recepción. Uno de los puntos importantes en estas configuraciones es la distancia entre antenas, que van desde muy cercanas a muy lejanas obteniendo así alta o baja correlación de desvanecimiento respectivamente. Este grado de correlación se designa dependiendo si se desea obtener diversidad, beamforming o multiplexación espacial [2]. Estas técnicas presentan los siguientes beneficios:

- Mejor rendimiento del sistema ya que permite tener mayor SNR
- Mayor capacidad del sistema ya que permite más usuarios por celda
- Mejora en la cobertura ya que presenta diversidad ante el desvanecimiento o *fading*
- Mejora en la prestación del servicio permitiendo mayores velocidades de datos [2]

### 1.2.9 Spatial Multiplexing

Configuración de técnica multiantena en la cual se tienen múltiples antenas tanto en la transmisión como en la recepción. Permite tener altas velocidades de datos en

proporción al número de antenas en transmisión ( $N_t$ ) y en recepción ( $N_r$ ). Juntamente con la aplicación del *beamforming* (hace directiva el haz) se pueden tener velocidades proporcionales a  $N_t \times N_r$ . *Spatial multiplexing* implica la transmisión de la información en paralelo entre las antenas sobre el recurso dado a un mismo terminal. Esta técnica es más conocida como MIMO [2]. En la Figura 1-8 se muestra la transmisión de *bits* aplicando la técnica MIMO.

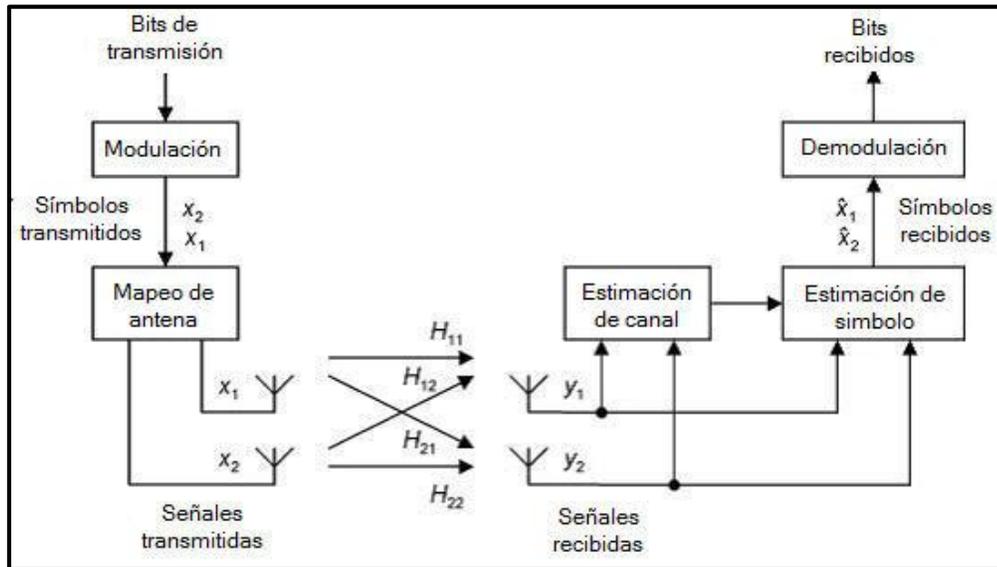


FIGURA 1-8: MIMO 2X2

FUENTE: AN INTRODUCTION TO LTE [3]

Para asegurar la correcta recepción de los símbolos enviados, LTE usa una técnica denominada *Closed Loop Spatial Multiplexing*; el cual requiere un aviso del receptor (terminal) indicando si es factible enviar 2 símbolos o no. Si es factible, el transmisor envía cada símbolo por una antena diferente. Si no es factible, solo envía un símbolo a la vez por las dos antenas. Además, para asegurar la recepción de ese único símbolo, envía por una antena el símbolo y por la otra su conjugado. Es así que en LTE se asegura por completo la recuperación de la señal en el receptor [3].

*Spatial Multiplexing* (MIMO) funciona mejor cuando se tiene alto desvanecimiento y línea de visión no directa [3]. Para optimizar recursos se da la configuración MU-MIMO, en el cual se puede transmitir a múltiples usuarios usando el mismo recurso (DL) o la transmisión de múltiples usuarios hacia la estación base (UL) [2].

### 1.2.10 Tramas en LTE

Las transmisiones en LTE se dan en tramas de 10ms. Las tramas están constituidas de 10 subtramas de 1ms cada una y cada subtrama está constituida de 2 *slots* de 0.5ms. Dentro de cada *slot* caben de 6 a 7 símbolos OFDM dependiendo del prefijo cíclico usado (extendido o normal) [2]. Cada símbolo tiene una duración de 66.7 $\mu$ s con prefijos cíclicos de 4.7 $\mu$ s en normal o 16.7 $\mu$ s en extendido [3].

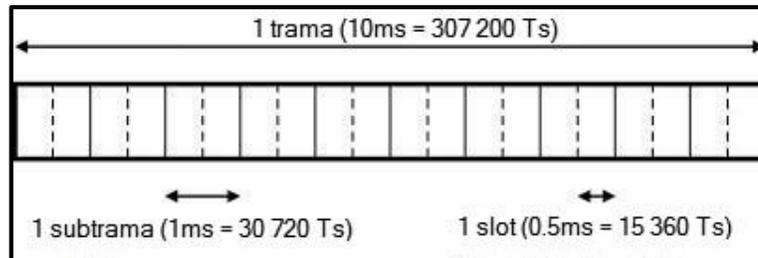


FIGURA 1-9: ESTRUCTURA DE TRAMA EN FDD

FUENTE: AN INTRODUCTION TO LTE [3]

Los recursos en LTE se agrupan en bloques, un recurso consiste en una subportadora durante un símbolo OFDM. Los bloques de recursos constan de 12 subportadoras en 0.5ms [2].

### 1.2.11 Resource Grid

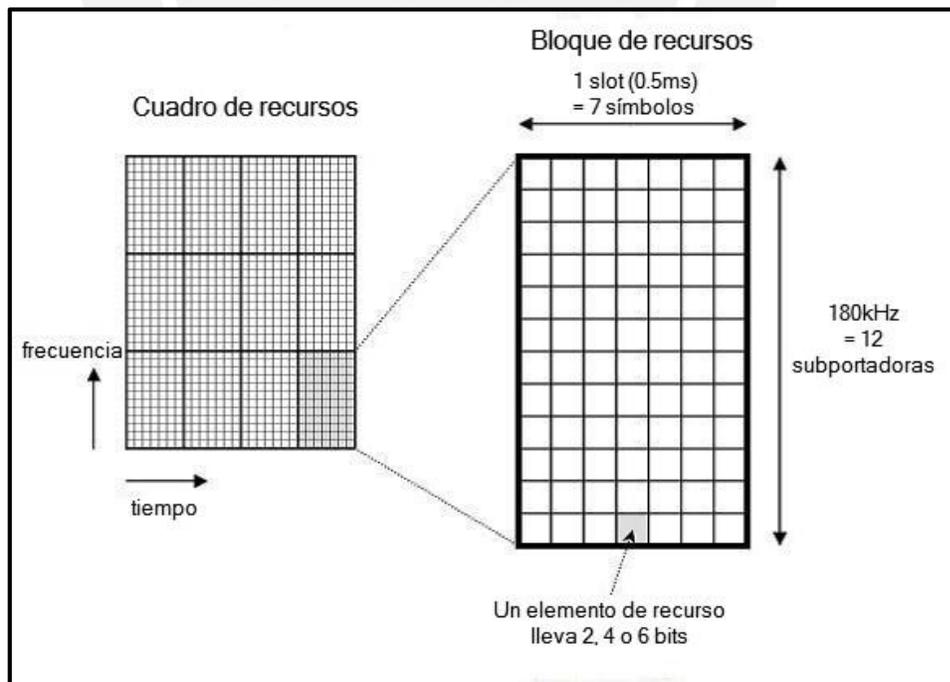


FIGURA 1-10: RESOURCE BLOCK – RESOURCE GRID

FUENTE: AN INTRODUCTION TO LTE [3]

La información en LTE está organizada en tiempo y en frecuencia en una cuadrilla de recursos que contiene elementos; estos elementos de recurso en conjunto hacen un bloque de recursos. Normalmente un bloque de recursos está conformado en tiempo por 7 elementos de recurso o símbolos que hacen en conjunto 0.5ms y en frecuencia por 12 sub-portadoras que hacen en conjunto 180kHz. Cada elemento de recurso puede contener 2, 4 o 6 bits dependiendo lo modulación escogida: QPSK, 16QAM o 64QAM. El total de bloques de recursos depende de la portadora a usar [3].

### 1.2.12 *Circuit Switched Fall Back*

Es una opción estandarizada por el 3GPP para su uso en redes LTE. Permite realizar llamadas de voz en LTE regresando al dominio de Conmutación de Circuitos de los sistemas 2G o 3G [3]. Lo que facilita este cambio es una nueva interfaz denominada SGs que une el MME de LTE con el MSC de la red 2G o 3G. Es por esta interfaz que los sistemas se comunican y comparten mensajes de señalización para establecer la llamada [17].

#### Proceso de CSFB

Para realizar CSFB el móvil o terminal tiene que estar registrado tanto en el MME como en el MSC. Además, el MSC debe saber en cada instante donde se encuentra el terminal; por ello, el MME reporta la ubicación del móvil periódicamente al MSC por la interfaz SGs [3].

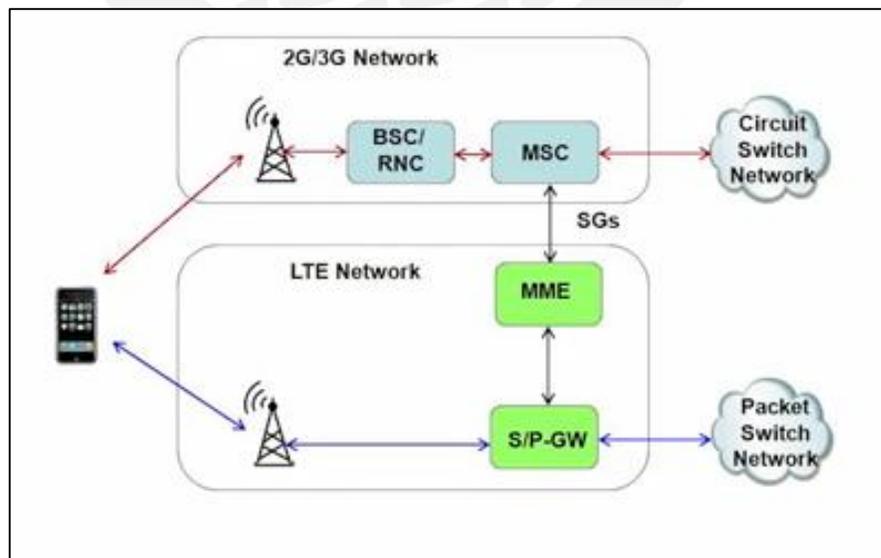


FIGURA 1-11: PROCESO DE CSFB

FUENTE: EXPLOREGATE [17]

Al ejecutarse una llamada desde LTE, el móvil pide acceso al MME y este verifica que esté activado el CSBF para luego ordenar al *eNodeB* que transfiera al terminal a la nueva red 2G o 3G con un *handover* inter-sistema. Antes de la transferencia, el *eNodeB* pide al terminal que realice medidas de señal tanto para 2G y 3G que serán reportadas al *eNodeB*, el cual las tendrá en cuenta para decidir la mejor red de destino. De forma paralela, el MME se comunica con el MSC enviándole información de señalización, ubicación y autenticación del terminal. En el caso que se tenga una sesión de datos establecida, ésta también es transportada a la nueva red en el *handover* y continuará con las velocidades permitidas de dicha red o puede ser suspendida hasta que la llamada finalice. Ocurre también que la red de destino deniegue el acceso por no garantizar un buen servicio o por congestión.

Al recibir una llamada en un terminal con LTE, los mensajes de señalización llegan primero al MSC en el que dicho terminal está previamente registrado. El MSC envía mensajes de *paging* al MME por la interfaz S-GW y éste los reenvía al terminal. Si el terminal acepta la llamada solicita el servicio al MME, éste ordena al *eNodeB* que transfiera al terminal hacia la otra red 2G o 3G [17].

### 1.3 Soluciones de despliegue de redes *Indoor*

Actualmente pasamos la mayor parte del día dentro de edificios, centros comerciales, aeropuertos, oficinas, etc. Esto hace que alrededor del 80% del tráfico de voz y datos se inicie dentro de edificaciones [18]. Es así que las redes *indoor* toman gran relevancia y surgen como solución a los recientes problemas que aquejan a las redes *outdoor* como:

- Inadecuada cobertura dentro de edificaciones; crece con el incremento de la demanda de cobertura para empresas, hoteles o centros comerciales
- Baja calidad de señal en ciudades emergentes; esto debido al desvanecimiento de la señal propia de la morfología urbana actual
- Interferencia; se debe al incremento de las estaciones base *outdoor*
- Demanda de alta velocidad de acceso con el incremento de aplicaciones y redes sociales
- Congestión de redes *outdoor* por el incremento de usuarios

### Ventajas de redes *indoor*

- Asegura la cobertura en interiores como: edificios, centros comerciales, aeropuertos, hoteles, etc.
- Mejora la calidad de señal en interiores
- Permite la sectorización para evitar la interferencia
- Permite ofrecer altas velocidades ya que su área de cobertura es menor
- Descongestiona las redes *outdoor* ya que al aplicarse a lugares con alta concurrencia permite liberar recursos de la red *outdoor* para ofrecerlas a otros clientes [19]

### Consideraciones

- El despliegue de redes *indoor* no debe interferir ni afectar a las celdas o sectores de las redes *outdoor*
- Se debe asegurar la movilidad o *handover* entre el área exterior y el área interior para que al salir de la edificación la conexión no se pierda
- Se debe cuidar los niveles de potencia para no afectar a usuarios lejanos ni cercanos [19]

## 1.4 Opciones de despliegue de redes *Indoor*

### 1.4.1 Sistema distribuido de antenas

DAS (sistema distribuido de antenas): consiste en un método de diseño en el cual se divide y reparte la señal provista de la estación base *indoor* hacia las antenas requeridas; es primordial que las antenas operen a similares potencias para que sea más fácil de optimizar. La cantidad y tipo de antenas depende de los requerimientos, dimensión de diseño y tecnología móvil [19].

#### Métodos:

- **DAS Activo:** Método que usa elementos activos, brinda mayores ventajas debido a presentar menores pérdidas de potencia y ofrecer altas velocidades. Este método no se preocupa por las pérdidas de potencia debido a largas distancias ya que cada antena es alimentada por equipos activos. La principal desventaja es el precio de los equipos activos ya que se necesita un equipo que provea la señal y potencia por cada antena; además, fibra óptica, amplificadores, rectificadores, etc. [19]

- **DAS Pasivo:** método que usa elementos pasivos para distribuir la potencia. Presenta mayores pérdidas por las distancias pero es más fácil de instalar. Es preferible su uso para pequeños edificios por la menor pérdida de potencia que presentará. Para grandes edificaciones se aplica la sectorización, donde cada sector que divide el área objetivo contará con su propio equipo proveedor de potencia y señal [19].

- ✓ **Elementos del DAS pasivo [19]:**

**Cable coaxial:** medio de guía para la señal.

**Splitter:** divide la potencia en la relación que se desee de forma equitativa. Si no se usa una terminación o puerto se debe poner una carga para evitar pérdidas de señal de retorno. Existen *splitters* de 2, 3 y 4 vías.

**Tapper:** divide la potencia pero no de forma equitativa. La potencia central es mantenida en gran porcentaje en una salida pero en la otra es reducida dependiendo del *tapper* escogido (6dB, 8dB, 10dB, 15dB, 20dB, etc.).

**Atenuador:** reduce la potencia en un valor que depende del atenuador.

**Carga:** sirve para cerrar puertos no usados y evitar insertar pérdidas.

**Circulador:** es un *splitter* con la particularidad de tener muy poca pérdida por inserción en un sentido y muy alta en el sentido contrario. Es usado para dividir las señales de Tx/Rx de una misma línea.

**Coupler 3dB:** combina las señales de puertos entrantes a los salientes, dividiendo su potencia a la mitad (-3dB). Los puertos 2 y 3 están aislados, como también el 1 y el 4.

**Filtros:** Son los *diplexer* (separan 2 bandas de frecuencia), *triplexer* (separan 3 bandas de frecuencias), *duplexer* (separan una señal combinada de Tx/Rx en Tx y Rx).

- ✓ **Equipos Centrales del DAS**

**BBU (Base Band Unit):** equipo responsable de la comunicación a través de la capa física. Recibe y envía la señal en banda base, es decir, las señales no son moduladas y son transmitidas a su frecuencia original. La BBU está compuesta de un procesador de señal digital que permite procesar las señales transmitidas hacia el móvil y desde el móvil. Junto a la RRU forman una estación base *indoor*.

**RRU (Remote Radio Unit):** es la estación de radio que convierte las señales de la BBU a señales de radio DL y las señales de radio UL a señales para la BBU. Es decir,

convierte la señal de banda base de la BBU a la banda a la que trabaja el operador. Está compuesta por amplificadores y se conecta a la BBU mediante fibra óptica.

**RRH (*Remote Radio Header*):** evolución de la RRU ya que tiene la particularidad de soportar las bandas de LTE y hacer la operación MIMO más sencilla.

- **DAS Activo Híbrido:** Combina elementos pasivos con elementos activos (fibra óptica, repetidores, *splitters*, etc.).

### DAS para LTE

Para aplicar el arreglo MIMO en el DAS pasivo se debe tener antenas separadas para asegurar el aislamiento de los *paths* o caminos. Para calcular la separación se tiene

$$\lambda = \frac{300}{f(\text{MHz})}; \text{ es recomendable una separación de } 4\lambda \text{ a } 7\lambda \text{ [19].}$$

### 1.4.2 Repetidores

Su concepto es usar una antena donadora que capta la señal del *outdoor* y la repite en el área *indoor*. Su desventaja es que repite todo lo que capta: múltiple portadoras, ruido, frecuencias espurias, baja señal, etc. Es más usada en trenes y transporte rápido por su gran movilidad. Usado también en situaciones en donde no se tenga gran presupuesto o se requiera una rápida implementación a bajo costo. Los repetidores no agregan capacidad de usuarios.

### 1.4.3 *Small Cells*

Son celdas de menor tamaño y capacidad de usuarios que proveen señal tomada del DSL. Necesitan contar con una red núcleo especial que soporte sus características; además, brinda facilidades de *plug and play*, autoconfiguración y soporte de múltiples tecnologías. Es limitada en potencia (hasta 24dBm), cobertura (10 metros a 2 km) y capacidad (entre 8 a 64 usuarios). Las *small cells* no surgen como un reemplazo a las macroceldas sino como una extensión de apoyo y complemento. Es una tecnología en pleno desarrollo e implementación.

## 1.5 Principales *Key Performance Indicators*

### 1.5.1 KPI para 3G

- **RSCP (*Received Signal Code Power*):** Es el promedio de potencia recibida por código en el terminal. Es una medida de la intensidad de señal y sirve de

indicador principal de cobertura [20]. Un valor aceptable de esta medida es de mayor o igual a -80dBm.

- **Ec/No:** Es la relación entre la energía de chip y el ruido. Un valor aceptable de esta medida es de mayor o igual a -8dB.
- **Tx Power:** Es el nivel de potencia que necesita transmitir el terminal para realizar una llamada. A mayor potencia, se usan más recursos y se gasta más la batería del móvil.

Un valor aceptable de esta medida es de menor o igual a -20dBm.

- **Scrambling Code:** En DL permite diferenciar sectores y en UL permite diferenciar usuarios. El terminal puede estar enganchado a más de un sector consumiendo recursos por igual de dichos sectores. Un exceso de códigos por terminal es perjudicial.

### 1.5.2 KPI para 4G

- **RSRP (Reference Signal Received Power):** Es el promedio de potencia recibida por *resource element* en el terminal. Es una medida de la intensidad de señal y sirve de indicador principal de cobertura [20]. Un valor aceptable de esta medida es de mayor a -100dBm.
- **RSRQ (Reference Signal Received Quality):** Es la relación entre la señal y la interferencia. Se considera la interferencia de todas las fuentes (celda servidor más celdas vecinas) y del ruido [20]. Un valor aceptable de esta medida es de mayor a -15dB.
- **Tasa de Datos:** Es la tasa de velocidad de acceso. Para LTE teóricamente se puede llegar a 100 Mbps y con el uso de MIMO hasta 200 Mbps.
- **RS SNIR (Reference Signal-Signal to Noise plus Interference Ratio):** Es la relación de potencia entre la señal de referencia y la interferencia de los vecinos más el ruido. Un valor aceptable es de mayor o igual a 20dB.
- **UE Tx Power:** Es el nivel de potencia de transmisión que emite el móvil. Un alto valor afecta a la batería del móvil; es por ello que un rango menor a 0 dBm es aceptable.

## Capítulo 2

# ANÁLISIS DE LA PROBLEMÁTICA DE COBERTURA

### 2.1 Introducción

En este capítulo se presentan datos importantes sobre el centro comercial, se limitan las áreas que se cubren en el proyecto, se explica la metodología a usar y se realiza el diagnóstico de la problemática de cobertura dentro del centro comercial.

### 2.2 Análisis general

En los últimos años la demanda por acceso a internet desde cualquier lugar ha ido creciendo notablemente. Esto implica tener cobertura celular amplia y de óptima calidad para ofrecer una buena experiencia al usuario. Pero la necesidad del usuario no quedo únicamente en acceso a internet desde cualquier lugar, sino que también demandaron velocidades de acceso cada vez mayores. Desde la introducción de la tecnología 2.5G (GPRS) hasta la última LTE se ha buscado cumplir con estas demandas cada vez más crecientes.

El Perú no es ajeno a estos cambios, según las estadísticas de la Figura 2-1, se muestra que la cantidad de suscriptores a algún servicio de internet móvil en plan control y post-pago creció en un 756% desde diciembre del 2010 hasta febrero del 2013.

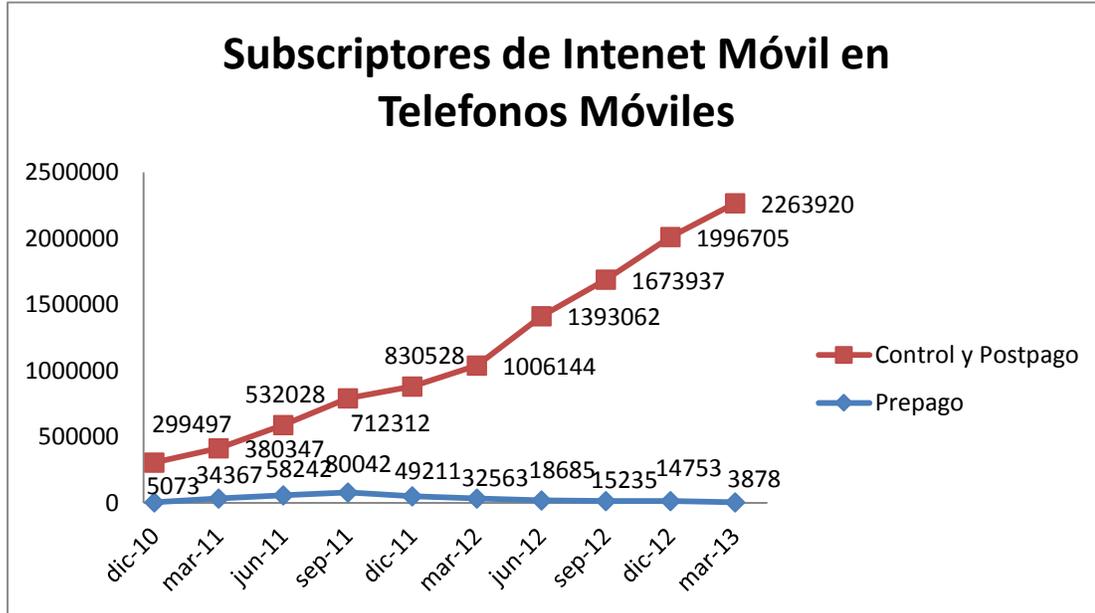


FIGURA 2-1: INDICADORES DE SERVICIO DE INTERNET MÓVIL  
FUENTE: OSIPTEL [21] – ELABORACIÓN PROPIA

En el 2013, el Estado peruano subastó las bandas A y B de 1700MHz y 2100MHz (AWS), siendo ganadas por Telefónica Móviles y Entel Perú [11]. Con esta banda, a inicios del 2014, Movistar empezó a ofrecer servicios de LTE a sus usuarios con planes desde 60.00 a 200.00 nuevos soles [10]. Por su parte Claro, a mediados de junio del 2014 desplegó su red LTE (en la banda 1900MHz) con planes desde 65.00 a 150.00 nuevos soles [22]. Por último, Entel empezó a ofrecer el servicio LTE a fines de octubre del 2014 con planes desde 99.00 a 299.00 nuevos soles [23]. Todos estos planes varían en la cantidad de minutos para llamar a RPM, RPC o RPE; a otros operadores, SMS y paquete de datos que van desde los 350MB a los 10GB dependiendo del operador. Estos despliegues de tecnología no han sido generales sino parciales, favoreciendo a los distritos de Lima sombreados en las siguientes figuras.

- **Movistar**

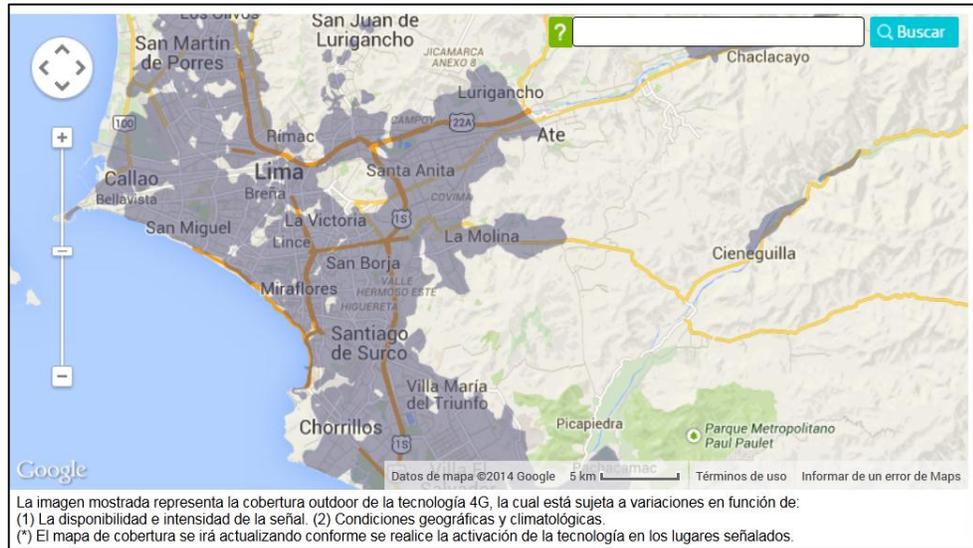


FIGURA 2-2: COBERTURA LTE MOVISTAR – PERÚ

FUENTE: COMPAÑÍA MOVISTAR [10]

Además de las siguientes provincias: Trujillo, Arequipa, Chiclayo, Piura, Chimbote e Ica

- **Entel**

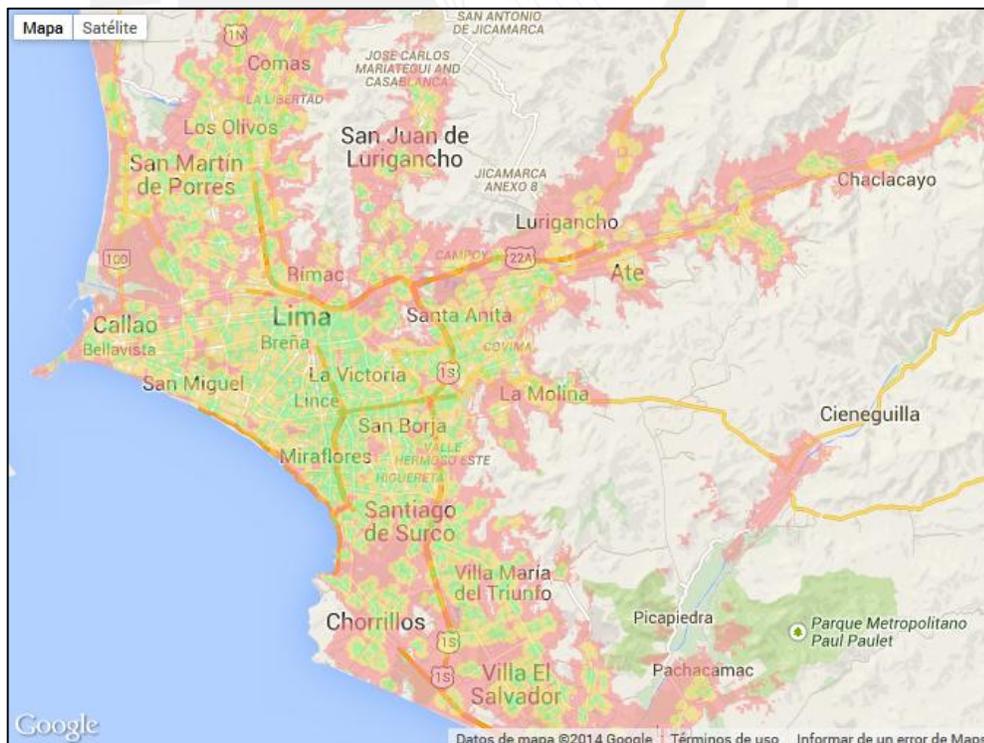


FIGURA 2-3: COBERTURA LTE ENTEL – PERÚ

FUENTE: COMPAÑÍA ENTEL [23]

- **Claro**



FIGURA 2-4: COBERTURA LTE CLARO – PERÚ

FUENTE: COMPAÑÍA CLARO [22]

Además de las siguientes provincias: Arequipa, Cajamarca, Chiclayo, Cusco, Huancayo, Ica, Tacna y Trujillo.

Se espera que para el año 2016 las operadoras logren desplegar LTE en todos los distritos de Lima y en todas las provincias del Perú.

### 2.3 Principales datos del centro comercial

El centro comercial Real Plaza Santa Clara es uno de los 9 centros comerciales en Lima pertenecientes al grupo empresarial Grupo Intercorp que posee un total de 21 centros comerciales con la marca Real Plaza en todo el Perú [24].

**Ubicación:** Av. Nicolás Ayllón 8694-Carretera Central 10.5 Ate. Ubicado en un lugar estratégico que hace fácil su acceso por la carretera central, su enfoque es atender al sector familiar de un distrito que está en pleno crecimiento.

**Inauguración:** 2009, fue el sexto centro comercial de la marca en inaugurarse [25].

**Área arrendable:** 21,560m<sup>2</sup> de área total de construcción incluyendo los estacionamientos.

**Altura promedio:** 5 a 6 metros

**Largo:** 310 metros aproximadamente.

**Ancho:** 160 metros aproximadamente.



FIGURA 2-5: VISTA SATELITAL DEL CENTRO COMERCIAL  
FUENTE: GOOGLE MAPS [26] – ELABORACIÓN PROPIA

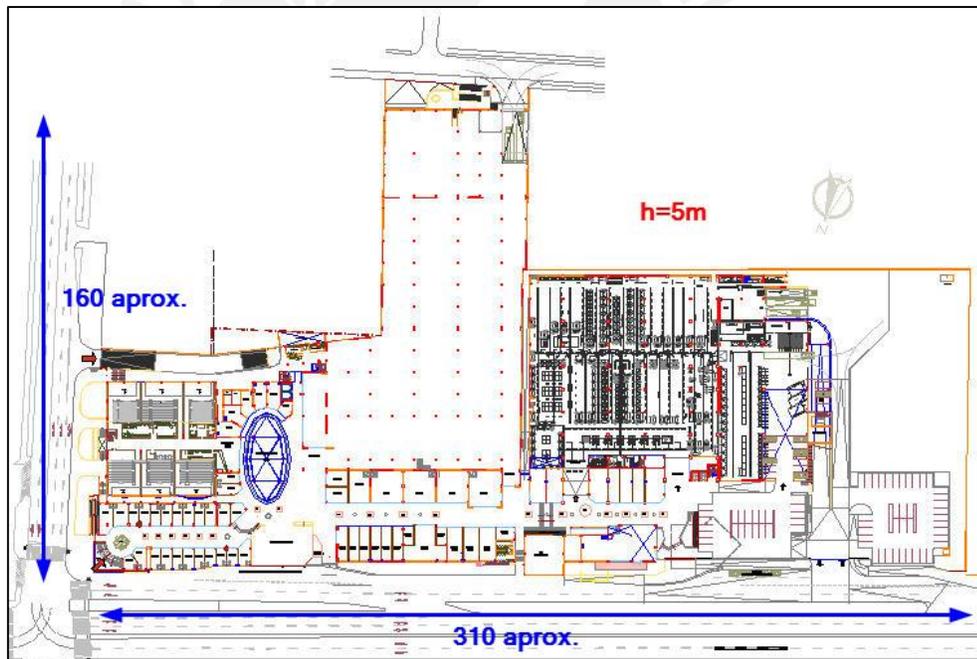


FIGURA 2-6: PLANO DEL CENTRO COMERCIAL  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

**Inversión total:** US\$20,000 millones. Inversión inicial más una segunda en el año 2011 para mejorar y agrandar la infraestructura [27].

**Ventas anuales (2013):** S/.182,000 millones [25].

**Visitas anuales (2013):** 9,000 millones de visitantes [25].



FIGURA 2-7: FACHADA DEL CENTRO COMERCIAL

FUENTE: REAL PLAZA SANTA CLARA [28]

## 2.4 Distribución de tiendas

El centro comercial alberga a más de 40 tiendas del rubro gastronómico, moda, servicios, entretenimiento, tecnología, doméstico, supermercados, etc. Entre las principales se encuentran: Bata, *Baby Modas*, *Óptica Express*, *Rústica*, *Dunkin Donuts*, *Platanitos*, *Aramis*, *Porta*, *Topitop*, *Disfruta*, *Mis Costillitas*, *Parque D'Onofrio*, entre otras reconocidas marcas. Además, posee un patio de comidas, un amplio estacionamiento en la azotea y en el piso 1, zona bancaria y *FoodCourt* con capacidad máxima de 300 personas [27].

Sus tiendas ancla son:

Plaza Veá (supermercado)

Promart (*homecenter*)

Cineplanet (cine)

Se muestra la distribución comercial del Real Plaza Santa Clara.

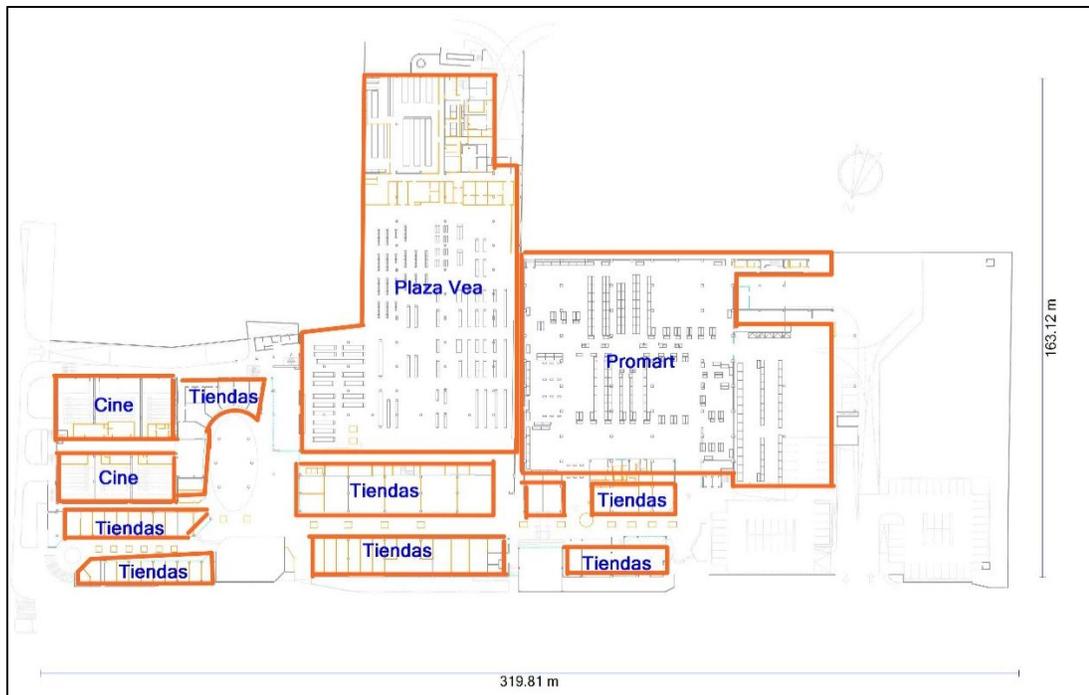


FIGURA 2-8: DISTRIBUCIÓN COMERCIAL

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Justamente son las tiendas ancla, el patio de comidas y los principales pasillos los lugares que se han decidido cubrir en la tesis; la razón es que poseen mayor afluencia de clientes y cubren mayor área. Para el ámbito de redes móviles son estos lugares los que generan más tráfico y necesitan una buena cobertura por el alto número de potenciales usuarios.

A continuación se presentan los aforos reales y los vistos en campo de las áreas cubiertas por el proyecto.

TABLA 2-1: AFOROS

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Área	Aforo Total	Aforo visto en campo
Promart	2346	1300
Plaza Vea	3967	1800
Patio de Comidas	288	150
Cineplanet	1157	750
Pasillo principal	5100	2500

La siguiente imagen muestra las áreas específicas que cubre el proyecto.

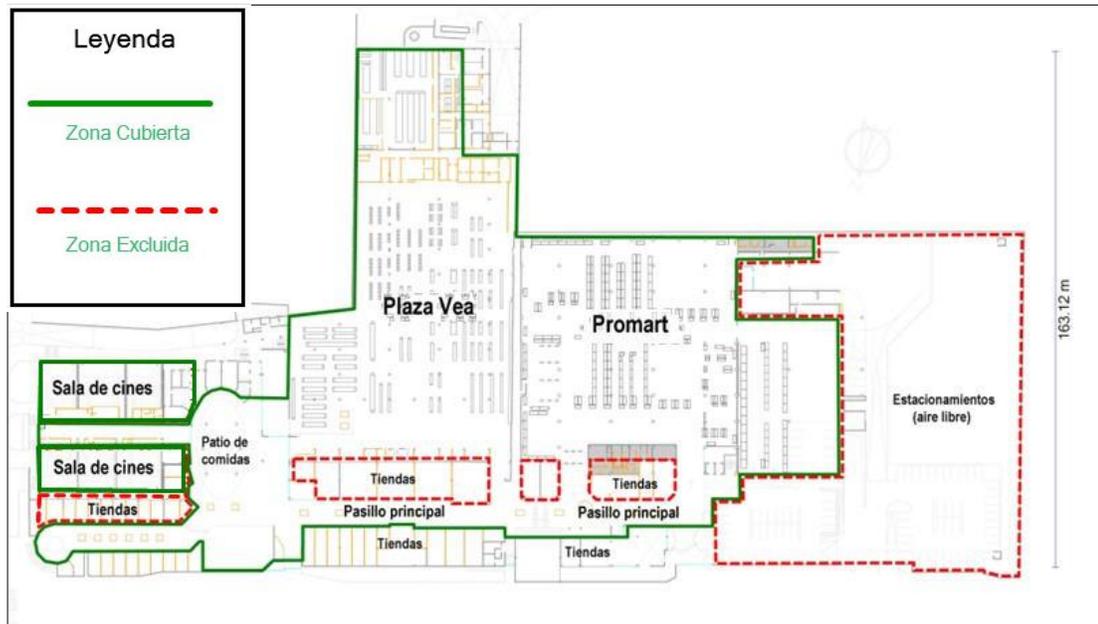


FIGURA 2-9: ÁREAS CUBIERTAS POR EL PROYECTO  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

## 2.5 Metodología

Para el desarrollo del presente proyecto se tendrán en cuenta los siguientes pasos a seguir en el orden establecido, esta planificación del trabajo ayuda a tener un orden de tareas y asegura el éxito del proyecto si se cumplen.

- Coordinar con el área administrativa del centro comercial una visita guiada al establecimiento.
- Realizar un TSS (*technical site survey*) en el cual se familiarice con el centro comercial.
- Tomar medidas de KPI para 3G: esto se hace con una llamada normal desde el centro comercial para registrar los niveles de cobertura mediante un *software* llamado *Nemo Handy* instalado previamente en el móvil.
- Una vez obtenido todos los datos con el desarrollo del TSS, se deben post-procesar los logs (archivos) obtenidos para analizar los niveles de cobertura *indoor*.
- Con la información extraída al post-procesar los logs se debe evaluar el problema de cobertura dentro del centro comercial teniendo énfasis en aquellas zonas con peor cobertura a ser mejoradas con el desarrollo del proyecto.

- El diseño se hace con los planos originales teniendo en consideración dimensiones y materiales reales.
- Una vez desarrollado el diseño se procede a simular los niveles de cobertura y otros KPI que verifiquen el correcto diseño.

## 2.6 Ante-diseño

Es el procedimiento que se sigue antes de desarrollar el diseño, busca obtener la mayor información sobre el centro comercial y el problema de cobertura *indoor* que sean de referencia para un buen diseño.

### 2.6.1 *Technical Site Survey*

El TSS es una técnica que consiste en la visita al establecimiento por parte del ingeniero con la finalidad de reconocer y familiarizarse con las principales características del lugar, como también, recopilar información vital para el diseño. La visita debe ser coordinada previamente y de preferencia asistida por algún administrador del establecimiento que pueda absolver las dudas y guiar por todo el centro comercial. Es recomendable tomar fotos de referencia que ayuden a recordar la información posteriormente.

Durante el TSS se busca reconocer:

- Tipo de material de las divisiones (puertas, ventanas, paredes, elevadores, escaleras, etc.)
- Dimensiones de infraestructura (alturas, áreas, dimensiones reales, proyecciones, etc.). Esto se puede realizar con algún instrumento de medición como winchas o telémetro láser (BOSCH DLR130) que tiene un rango de medición de 0-150m con una margen de  $\pm 1$  mm [29]; opción elegida para este proyecto.



FIGURA 2-10: LASER BOSCH DLR130

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

- Ubicación del cuarto de equipos, data center o posibles lugares que permitan la instalación de los equipos principales.



FIGURA 2-11: CUARTO DE EQUIPOS

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

- Infraestructura de cableado (bandejas de cableado, montantes, falso techo, falso piso, tuberías, etc.) existente que se pueda usar para el diseño. Ello permite tener una guía por donde se puede o no instalar el cableado.

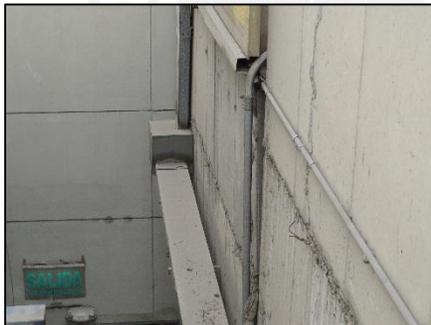


FIGURA 2-12: BANDEJAS DE CABLEADO

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

- Posible ubicación de las antenas: se busca lugares tentativos para la ubicación de las antenas considerando esquinas, columnas, vigas u otros.



FIGURA 2-13: POSIBLE UBICACIÓN DE ANTENAS  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Toda la información obtenida se debe indicar en el plano del centro comercial, esto favorece el reconocimiento en el momento de diseñar ya que el diseño se hará en el plano real.

Las siguientes imágenes muestran una forma de plasmar la información en el plano durante el TSS. Se ubican las bandejas, montantes, cuarto de equipos, dimensiones y posible ubicación de antenas (mostrado con flechas).



### 2.6.2 Walk Test

El *walk test* es una técnica de toma de medidas o parámetros para verificar la funcionalidad y calidad de la red celular [30]. Esta toma de medidas se realiza caminando a diferencia del *drive test* para redes *outdoor* que se hace con un automóvil.

#### Materiales:

- **Software de toma de medidas:**

*Nemo Handy*, desarrollado por Anite desde el 2005, es un *software* de toma de medidas que se puede instalar en un terminal móvil compatible con *Android*. Este *software* soporta las tecnologías GSM, CDMA, WCDMA, HSPA y LTE; permite tomar medidas de rendimiento y visualizarlos en tiempo real [31]. La principal ventaja es facilitar la prueba ya que no se tiene que cargar una *laptop* o equipo especial pesado que soporte el *software*, sino que sólo se moviliza con un teléfono móvil en la mano por todo el establecimiento. Este aplicativo permite cargar automáticamente el mapa con el uso del GPS y empezar la llamada a un número celular antes configurado. Posteriormente comienza la toma de medidas y mientras se avanza en el camino el GPS registra en el mapa los parámetros medidos. Al terminar la prueba se tiene la opción de guardar las medidas en un archivo o log.

- **2 celulares operativos:**

Móvil de prueba: tiene instalado el *software* mencionado, realiza la llamada al segundo móvil y efectúa la toma de parámetros o medidas.

Móvil receptor: recibe la llamada y espera hasta que termine la prueba.



FIGURA 2-16: MÓVIL DE PRUEBA Y MÓVIL RECEPTOR

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Ambos celulares deben tener el chip que provee la tecnología y banda a usar.

### Procedimiento:

Una vez instalado el *software* en el móvil de prueba, se carga el plano del centro comercial debido a que el aplicativo fue diseñado para pruebas en lugares *outdoor* y el GPS no carga automáticamente el plano en interiores. Para el presente proyecto se adapta este *software* cargando el plano del centro comercial y sobre este se marca manualmente los puntos de posición para que las medidas se distribuyan en el trayecto.

Se inserta el chip en el celular de prueba, este chip opera con la tecnología 3G y en la banda 1900 MHz.

En el *software* se configura un *script* con el número del teléfono celular a llamar (móvil receptor), el tipo de llamada (larga duración), la tecnología (3G) y la banda (1900MHz). Al ejecutar este *script* se realiza la llamada larga en 3G al móvil receptor, este acepta la llamada y comienza la toma de medidas 3G.

Con la llamada en curso se desplaza por todo el centro comercial, cada cierto tiempo se marca en el plano un punto que da referencia a la ubicación actual y reparte las medidas tomadas en el trayecto. El siguiente gráfico muestra un ejemplo de la toma de medidas en un plano.

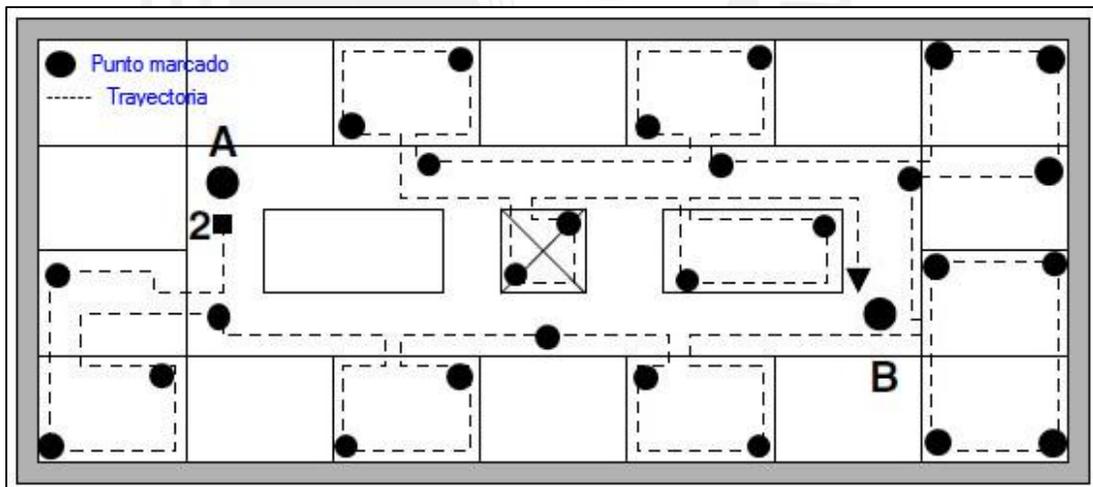


FIGURA 2-17: EJEMPLO DE TEST EN NEMO HANDY

FUENTE: INDOOR RADIO PLANNING [19]- ELABORACIÓN PROPIA

Al finalizar la prueba se graban las medidas tomadas en un log para que sean procesadas posteriormente. Se debe asegurar la correcta toma de medidas ya que algún error significaría coordinar otra visita al establecimiento generando incomodidad y retrasos en el proyecto.

### 2.6.3 Post-Procesamiento

Tarea ejecutada después de realizar el *walk test* en el cual se procesan las medidas obtenidas para mostrarlas de forma dinámica y así sea más fácil de analizar el problema de cobertura. Este post-procesamiento se realiza en un *software* llamado *Nemo Analyze* en su versión 5.0 (desarrollado por Anite); permite visualizar los parámetros, generar reportes estadísticos y realizar comparaciones. Soporta las tecnologías GSM, UMTS, HSPA y LTE; además, es compatible con el *Nemo Handy* por lo que se podrá interpretar los logs obtenidos en el *walk test* [32].

#### Procedimiento:

Se carga en el *Nemo Analyze* el plano del centro comercial que se usó para el *walk test*, esto es importante ya que si se elige otro plano las medidas serán plasmadas de forma errónea y descuadradas.

Se carga las medidas obtenidas en la prueba que fueron grabadas en un archivo (log).

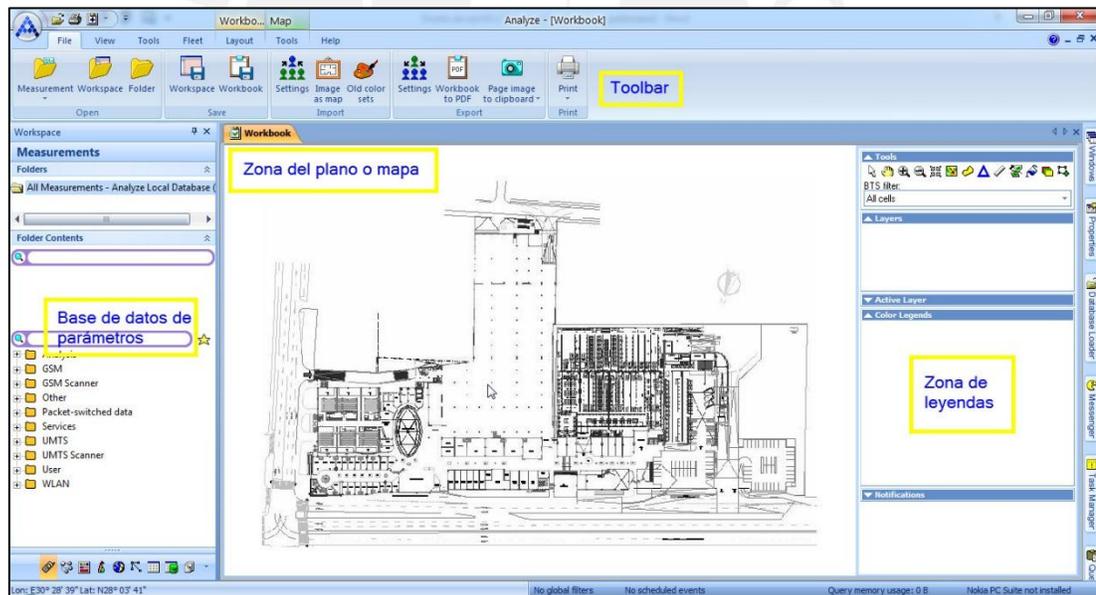


FIGURA 2-18: CAPTURA DE PANTALLA DE NEMO ANALYZE 5

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

El *software* nos permite buscar y escoger los parámetros que se desean procesar. Una vez escogido el parámetro deseado, se desplaza al plano cargado pasos atrás y se muestran sus medidas con puntos de colores que clasifican su intensidad o magnitud

según una leyenda. A estos archivos generados se les denominan *plots* de cobertura y pueden ser exportados como imágenes.

Para el análisis de cobertura 3G se procesan los principales parámetros o KPI: RSCP, Tx Power, Scrambling Code y Ec/No.

## 2.7 Análisis del problema de cobertura

El diseño de una red celular se puede realizar en base a lograr una buena cobertura o soportar un tráfico deseado. Para obtener una red óptima se toman decisiones con el objetivo de conseguir los más altos niveles posibles tanto en cobertura como en tráfico a ofrecer. En los últimos años, la demanda de cobertura y tráfico sumado a las solicitudes de mayores velocidades de internet móvil han hecho cada vez más complicado el diseño de redes *outdoor*.

- **Cobertura:**

No sólo factores tecnológicos afectan al diseño de una red sino también factores externos, principalmente la morfología de la región o área que cubrirá el diseño. Este factor se hace más relevante con el auge inmobiliario que tiene el país y con el crecimiento económico de los últimos años. Las construcciones más frecuentes ahora son: edificios de gran altura, centros comerciales, puentes y casas. Estos cambios generan mayores obstáculos para la señal celular teniendo como consecuencia espacios de área con ineficiente cobertura.

- **Tráfico:**

El crecimiento demográfico de las ciudades, que concentran mayor población en menor área, hace que el tráfico solicitado también se concentre en dichas áreas. Establecimientos como centros comerciales, aeropuertos, estadios, estaciones, etc., consumen la mayoría del tráfico por el alto número de personas que albergan; por ello son denominados *hotspots*. Se desequilibra el tráfico ofrecido generando que áreas cercanas a estos establecimientos tengan un mal servicio.

Una solución a estos problemas es el aumento de estaciones base haciendo que el área de cobertura se acorte y centre los recursos en zonas específicas. Lamentablemente esta solución no es bien vista por la sociedad ya que se tiene un mal concepto de la radiación que estas estaciones generan. Este concepto erróneo hace que las operadoras no puedan aumentar las estaciones y busquen otras soluciones.

En el caso específico del CC. Real Plaza Santa Clara al ser un *hotspot* que alberga aproximadamente 14,000 personas como aforo máximo en un área de 22km<sup>2</sup>, necesita una buena cobertura y dimensionamiento de la capacidad a ofrecer para mejorar la experiencia del usuario y generar ganancias a las operadoras. A continuación se analiza la situación del centro comercial.

### 2.7.1 Análisis de ubicación

El CC. Real Plaza Santa Clara se encuentra ubicado al borde de las estaciones base Santa Clara y Villa Rímac [33], exactamente a 1.3km y a 1.8km respectivamente como se muestra en el gráfico.

TABLA 2-2: ESTACIONES CERCANAS  
FUENTE: ALCATEL LUCENT [33] - ELABORACIÓN PROPIA

Site	Distancia al CC.	Sector	Scrambling Code
Santa Clara	1230 m	3111	261
		3112	212
		3113	224
Valle Rímac	1800 m	4851	91
		4852	92
		4853	493

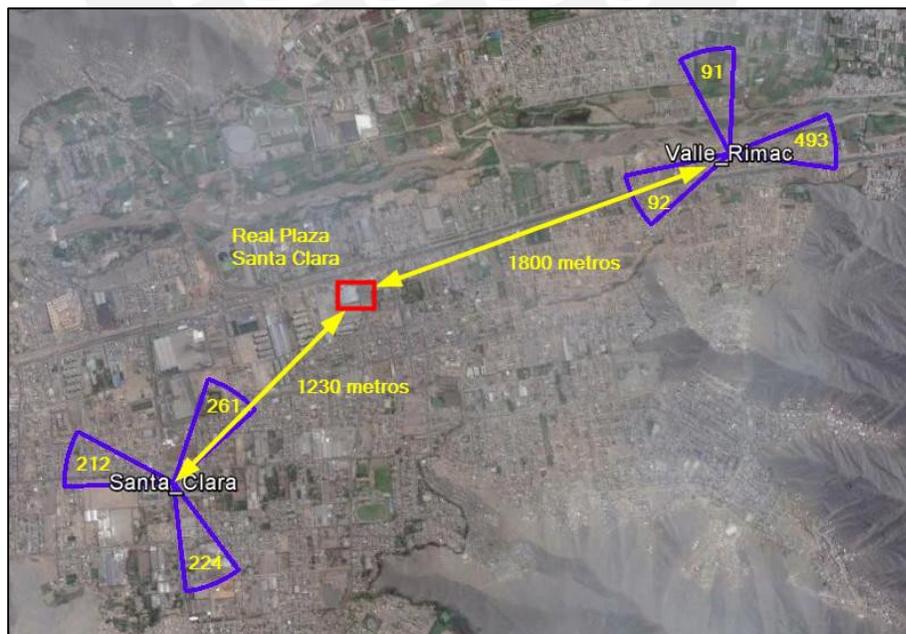


FIGURA 2-19: ESTACIONES VECINAS  
FUENTE: GOOGLE MAPS [26] - ELABORACIÓN PROPIA

La ubicación de las estaciones base no favorece a la cobertura del centro comercial, esto se debe a que el establecimiento se encuentra muy alejado de las dos estaciones. Además, se encuentra en el borde de ambas lo cual no permite una dominancia clara de algún sector sobre otro.

### 2.7.2 Análisis de KPI

A continuación se analizan los principales KPI de 3G para una red desplegada en la banda 1900 MHz con los *plots* procesados anteriormente.

- RSCP

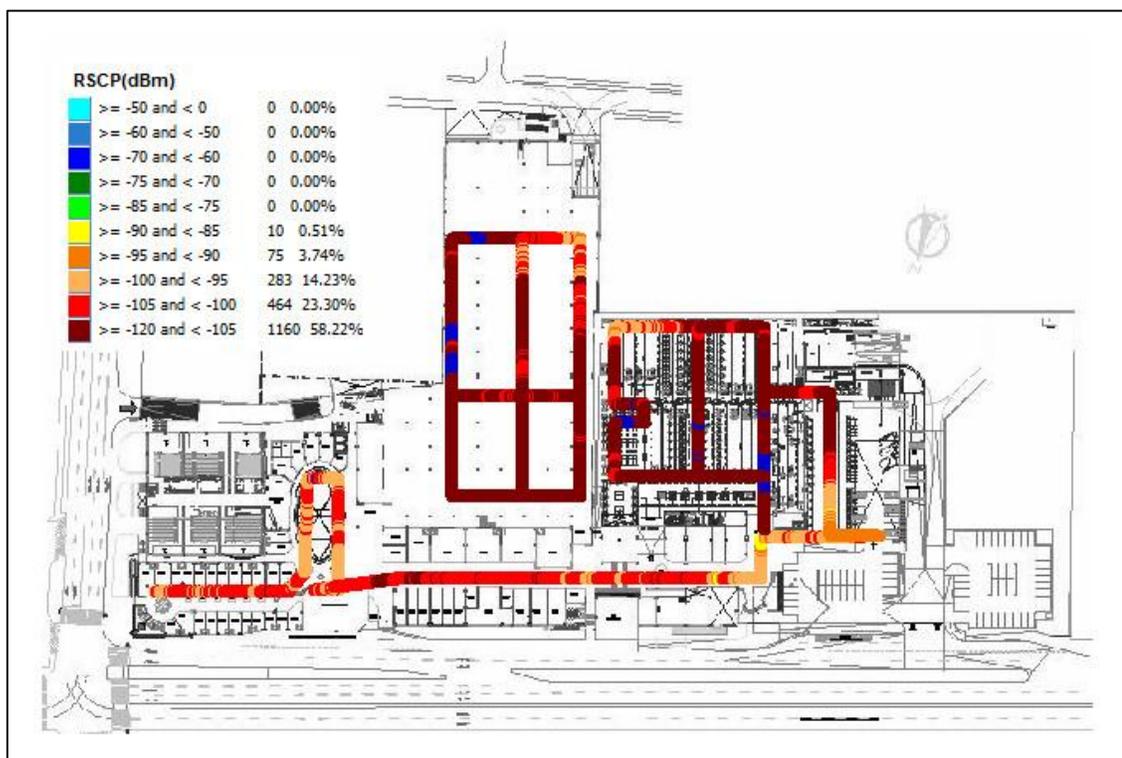


FIGURA 2-20: MEDICIÓN DE RSCP

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Se observa que el 100% de las medidas tomadas tienen niveles menores a -85dBm. Según el rango permitido ( $RSCP > -75dBm$ ), los valores obtenidos están muy por debajo de lo mínimo aceptable para que el móvil reciba la información de parámetros de la estación base y pueda realizar o recibir una llamada; surge un alto riesgo de caída de la llamada y mala calidad de señal.

- **Ec/No**

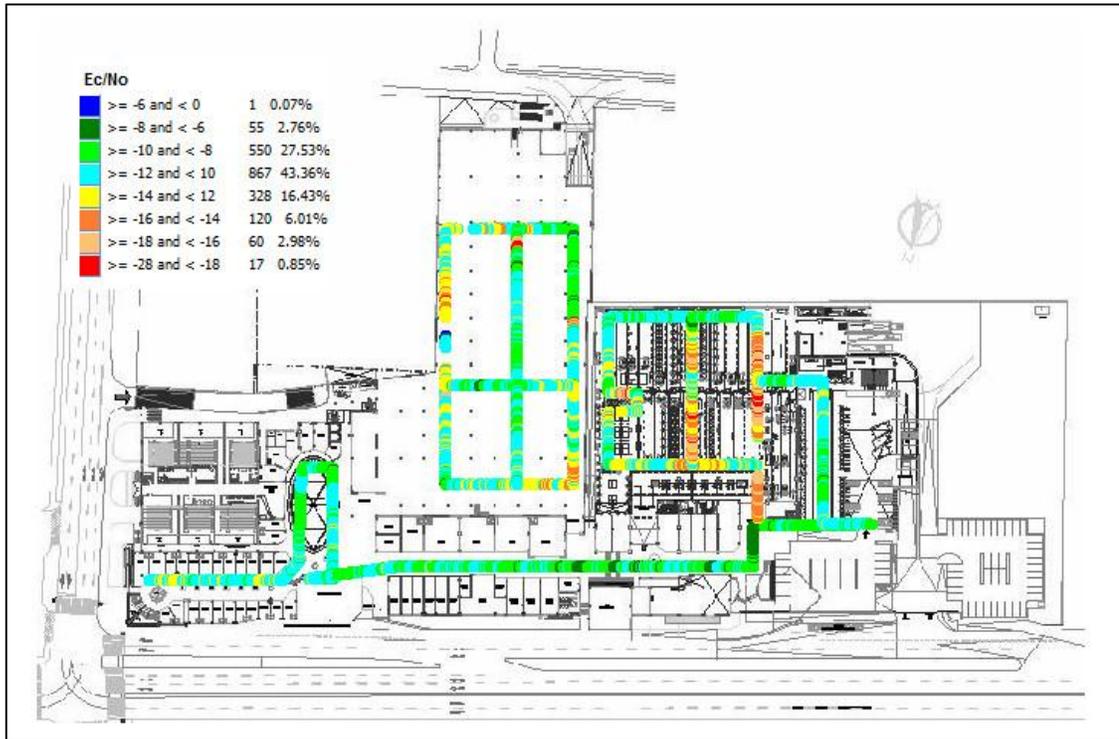


FIGURA 2-21: MEDICIÓN DE EC/NO  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Se observa que el 97.16% de las medidas tomadas tienen niveles menores a -8dB siendo en su mayoría menores a -10dB. Según el rango permitido ( $Ec/No > -8dB$ ), los valores obtenidos están muy por debajo de lo mínimo aceptable para que la energía de *chip* sea mayor a la interferencia (ruido). Estos valores son consecuencia de una baja intensidad de señal CPICH o canal piloto; esto afecta la calidad de la señal y la evaluación del *handover* teniendo como consecuencia mayor posibilidad de caída de la llamada.

- **Tx Power**

Se observa que el 99.87% de las medidas tomadas tienen niveles mayores a -10dBm. Según el rango permitido ( $Tx Power < -20dBm$ ), los valores obtenidos están muy por encima del rango recomendable permitido de potencia que el móvil debe transmitir en UL para establecer una llamada. Estos valores obligan a que los móviles dentro del centro comercial emitan altas potencias para conectarse a la estación y así establecer una llamada; trae como consecuencias carga del enlace *uplink*, mayor consumo de batería y uso de recursos del móvil.

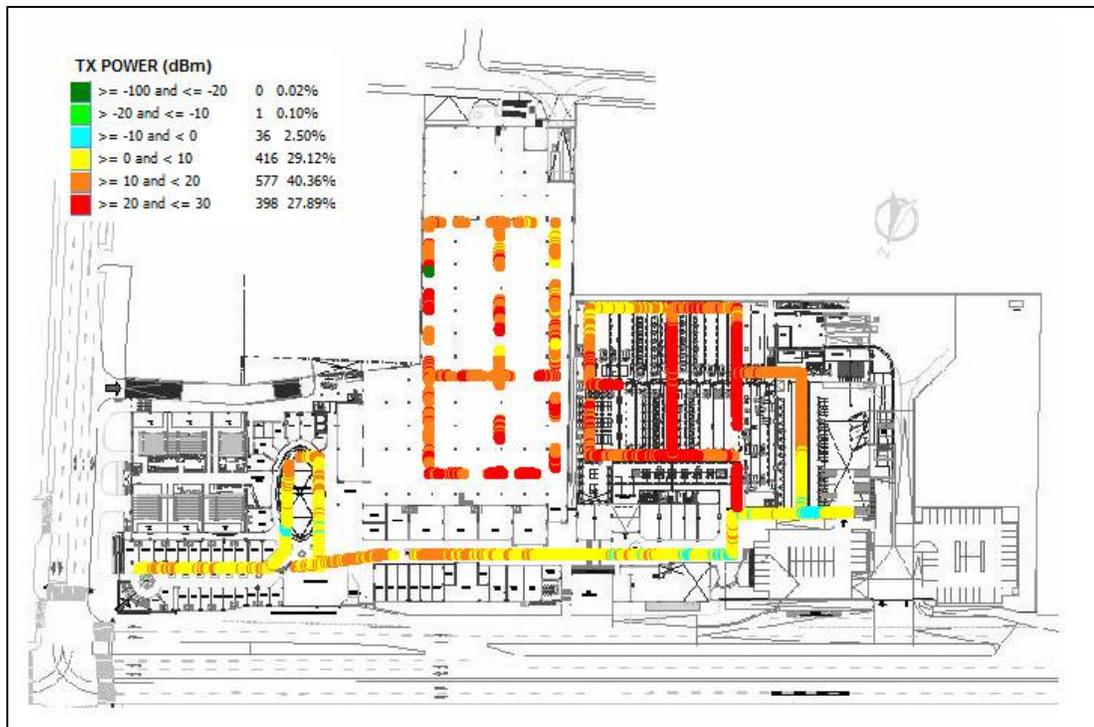


FIGURA 2-22: MEDICIÓN DE TX POWER  
 FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

- **Scrambling Code**

Se observa que dentro del centro comercial se registran 7 *scrambling codes* que implica la presencia de señal de 7 sectores diferentes. Esto causa polución de señal, como también, mal uso de recursos compartidos de sectores en el *soft handover* para un único móvil. Al analizar se concluye que en la mayoría del área del establecimiento el celular esta pimponeando o saltando entre dos sectores al movilizarse cortas distancias. Son justamente estos dos sectores predominantes (S1: 92 y S2: 261) los que pertenecen a las estaciones base mencionadas anteriormente en la Tabla 2-2. Se comprueba que la ubicación del centro comercial justo al borde de ambas estaciones genera interferencia. Esto reduce la duración de la batería del móvil, genera mayor señalización y uso de recursos continuos para realizar el *handover* en cortas distancias.

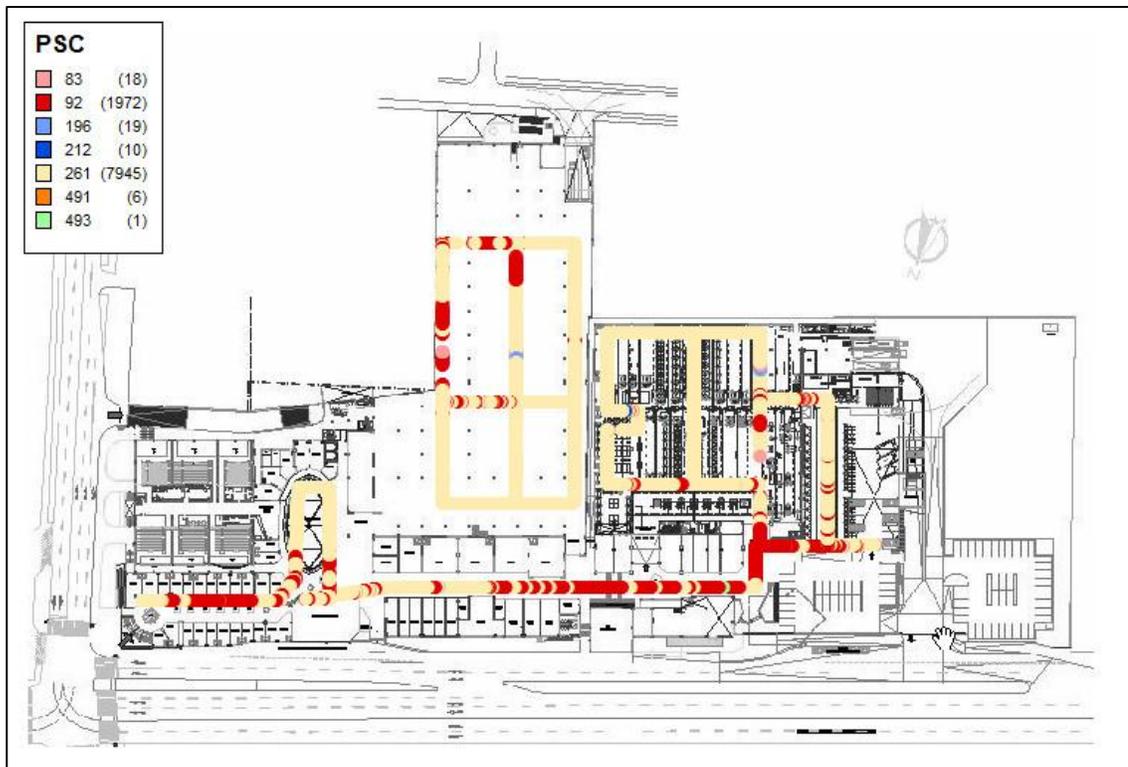


FIGURA 2-23: MEDICIÓN DE SCRAMBLING CODE

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Según todo lo analizado, se puede concluir que existe una inadecuada cobertura 3G dentro del CC. Real Plaza Santa Clara. Esto genera pérdidas económicas en la operadora y molestias por parte de los usuarios. Es necesario una solución que garantice una buena cobertura y brinde alta velocidad de acceso.

La solución seleccionada para este proyecto es una solución *INDOOR*, es decir, no se modifica la red *OUTDOOR* sino que se implementa un sistema distribuido de antenas (DAS) al interior del establecimiento distribuyendo las zonas por sectores. Además, el sistema DAS elegido es uno pasivo; usa elementos pasivos para distribuir la potencia suministrada por un equipo central. Esta solución busca brindar una buena cobertura, descongestionar la red *outdoor* y hacer rentable el proyecto.

Por último, se escoge la tecnología 4G que brinda alta velocidad de internet móvil. Estos beneficios además de solucionar el problema de cobertura, buscan garantizar que los usuarios experimenten mayores velocidades de transmisión que incrementen el consumo de datos.

## Capítulo 3

# INGENIERÍA DEL PROYECTO

### 3.1 Introducción

En este capítulo se desarrolla el diseño de la red 4G-LTE *Indoor* para el CC. Real Plaza Santa Clara con la solución DAS escogida. Se tiene en consideración la información recabada en capítulos anteriores así como los valores de KPI óptimos a los que se desea llegar.

### 3.2 Diseño de red

El sistema capta la señal por medio de una antena microondas que sirve como medio de transmisión al *backhaul*. Esta señal llega al *Base Band Unit* (BBU) que la procesa en banda base para luego pasarla al *Remote Radio Unit* (RRU) que la amplifica y la modula a la banda elegida; además, brinda la potencia que será distribuida por los elementos pasivos hacia las antenas.

Se busca cubrir las zonas elegidas para el proyecto dividiéndolas por sectores. Esto se debe a que por RRU tanto la potencia (43-49dBm máximo) como la capacidad (entre 70 a 80 usuarios máximo) es limitada y al querer cubrir todo un centro comercial con un sólo equipo involucraría tener zonas sin cobertura y de baja capacidad.

El siguiente diagrama muestra la arquitectura ejemplo de la solución DAS pasiva:

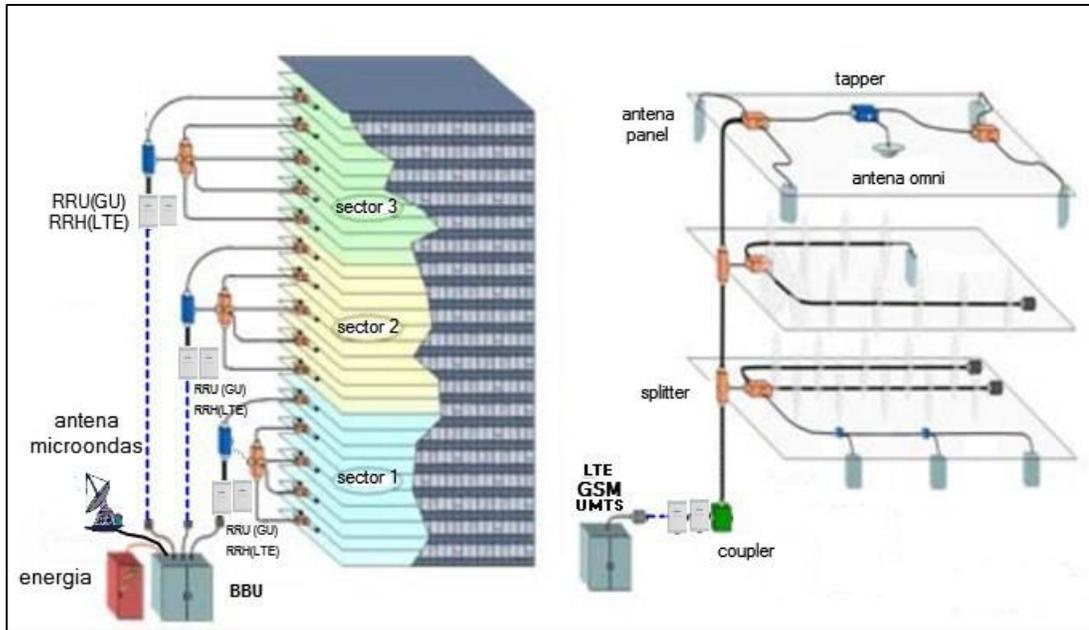


FIGURA 3-1: DIAGRAMA DEL DAS

FUENTE: ALCATEL LUCENT [34] - ELABORACIÓN PROPIA

Para el diseño de la red se usa el *software iBwave* en su versión 6.4.6. Este programa es exclusivo para diseño de redes *indoor* y posee las siguientes ventajas:

- Permite aplicar soluciones DAS, repetidores y *small cells*
- Permite el diseño en base a multi-operadoras y multi-tecnologías
- Permite la separación por pisos y genera vistas en 3D del lugar
- Permite simulaciones de cobertura, mejor servidor y principales KPI
- Permite el diseño de redes WiFi
- Permite la importación de planos reales y la selección de múltiple tipos de material
- Posee y acepta una amplia base de datos con componentes de diferentes proveedores.
- Usa los modelos de propagación *Fast Ray Tracing* y *Cost 231* para el *link budget*
- Genera reportes de materiales, *link budget*, campo magnético, etc.

La banda elegida para el diseño 4G es la recientemente subastada por el estado (banda AWS) que soporta dicha tecnología. Específicamente se usa en UL: 1730-1750MHz y en DL: 2130-2150MHz, lo que nos da un ancho de banda de 2x20MHz.

### 3.2.1 Procedimiento

Una vez instalado el *software* de diseño con la licencia autorizada por la compañía, se carga la base de datos de los componentes a usar. Para los componentes pasivos (*tappers*, *splitters*, antenas, cables, etc.) se ha escogido al proveedor RFS (*Radio Frequency System*) que es un diseñador y productor mundialmente reconocido de componentes pasivos. Esta base de datos de los componentes en digital es solicitada a la compañía del *software* la cual la ha adaptado con los parámetros reales para su uso en el diseño. Una vez cargada la base de datos ya se puede comenzar a diseñar.

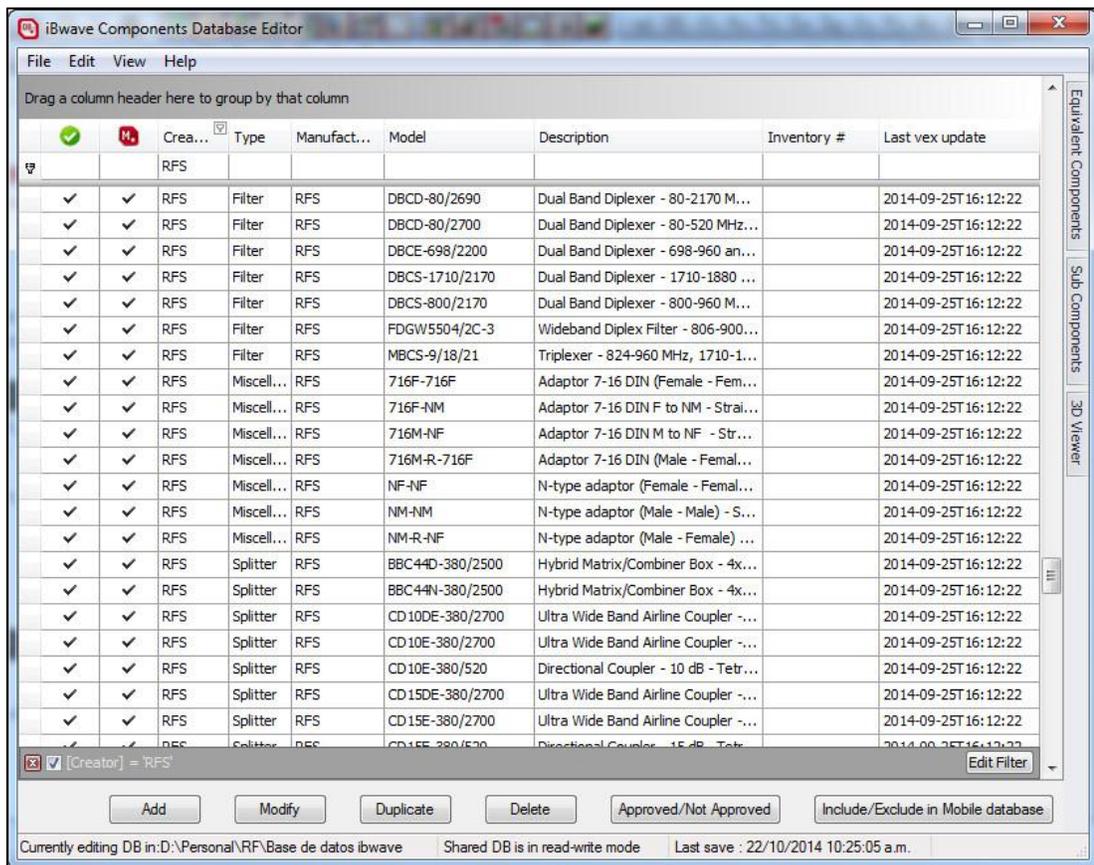


FIGURA 3-2: BASE DE DATOS DE LOS COMPONENTES  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Para empezar el diseño se tiene que importar el plano original del centro comercial. El programa nos da la opción de asignarle el tipo de material y la altura antes de importarlo. Es importante tener cuidado con la asignación de materiales ya que debe

ser lo más cercano a la realidad y lo visto en la visita al sitio. Esta asignación influirá en las simulaciones de cobertura.

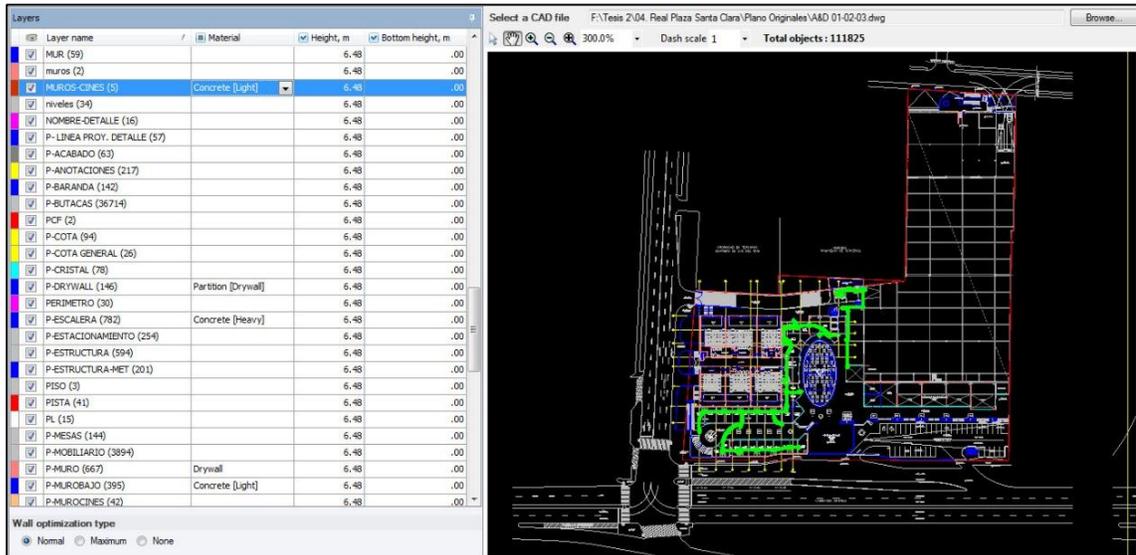


FIGURA 3-3: IMPORTACIÓN DE PLANO AL IBWAVE

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Ya importado el plano se puede usar la vista 3D para verificar si ha sido correcta la asignación de materiales y sus dimensiones. Si se necesita algún cambio se puede usar las opciones de dibujo que tiene el programa.

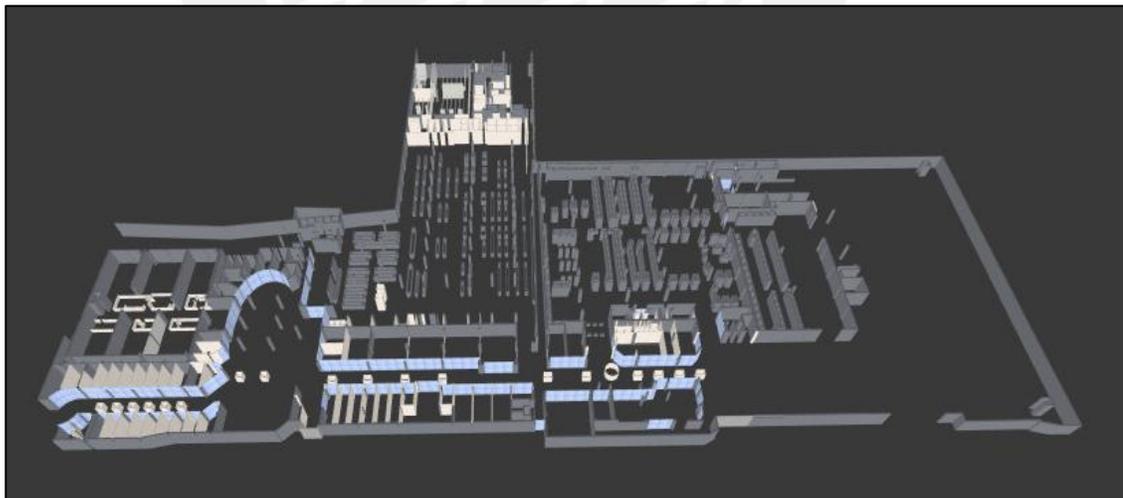


FIGURA 3-4: VISTA 3D DEL CENTRO COMERCIAL

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Para el diseño se considera la distribución del centro comercial en 4 sectores. Esto debido a la magnitud del establecimiento y a que se dispone de un sector para cada tienda ancla. La sectorización es la siguiente:

TABLA 3-1: SECTORIZACIÓN DEL PROYECTO  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Área / Piso	Sector
Pasillos izquierda y patio de comidas	Sector 1
Pasillos de Cineplanet	
Pasillos derecha	Sector 2
Plaza Vea	Sector 3
Promart	Sector 4

Como se sabe, esta nueva tecnología 4G es nativa IP; es decir, todo el tráfico circula en datos. ¿Qué pasaría si se desea llamar o recibir una llamada dentro del establecimiento? Pues al ser una tecnología de datos, la llamada de voz es tratada de manera diferente surgiendo así dos posibilidades: usar una red IMS o CSFB que se ha detallado anteriormente. Para efectos de la presente tesis se usará CSFB.

En CSFB al realizar o recibir una llamada la red 4G traslada esta llamada a la red 3G o 2G para que se ejecute.

Es así que surge un nuevo problema ya que al pasar una llamada de 4G a 3G dentro del centro comercial se caería o tendría problemas para ejecutarse debido a los niveles inadecuados de 3G mostrados en el capítulo 2. El proyecto necesita también asegurar buena cobertura 3G e incluso 2G, es por ello que se contemplará un diseño para 4G, 3G y 2G.

Se despliega la red 2G-3G en la banda 1900MHz (banda D y E). El diseño considera tener por un *path* 2G, 3G y 4G con un sistema SISO gracias al rango de frecuencias que soportan las antenas y componentes pasivos escogidos; y en el otro *path* sólo se tiene el sistema MIMO de 4G. Esto muestra que el diseño puede ser escalable y multi-tecnología ya que soporta 3 sistemas de comunicación móvil. Para el correcto despliegue de la red 2G-3G se añade 1 RRU 2G y 1 RRU 3G a la RRH 4G por sector debido a que son equipos especiales para soportar estas tecnologías.

Para lograr el funcionamiento de tres tecnologías en simultáneo se incluye un *coupler* de bajo PIM que permite combinar las señales de 2G y 3G que trabajan en la misma banda PCS. Luego se combina la señal resultante con un *path* de 4G mediante un *diplexer* que combina señales en bandas diferentes (PCS y AWS). La señal final será la que transmite 2G, 3G y 4G en SISO. Para completar el arreglo MIMO se usa el segundo *path* de las RRH.

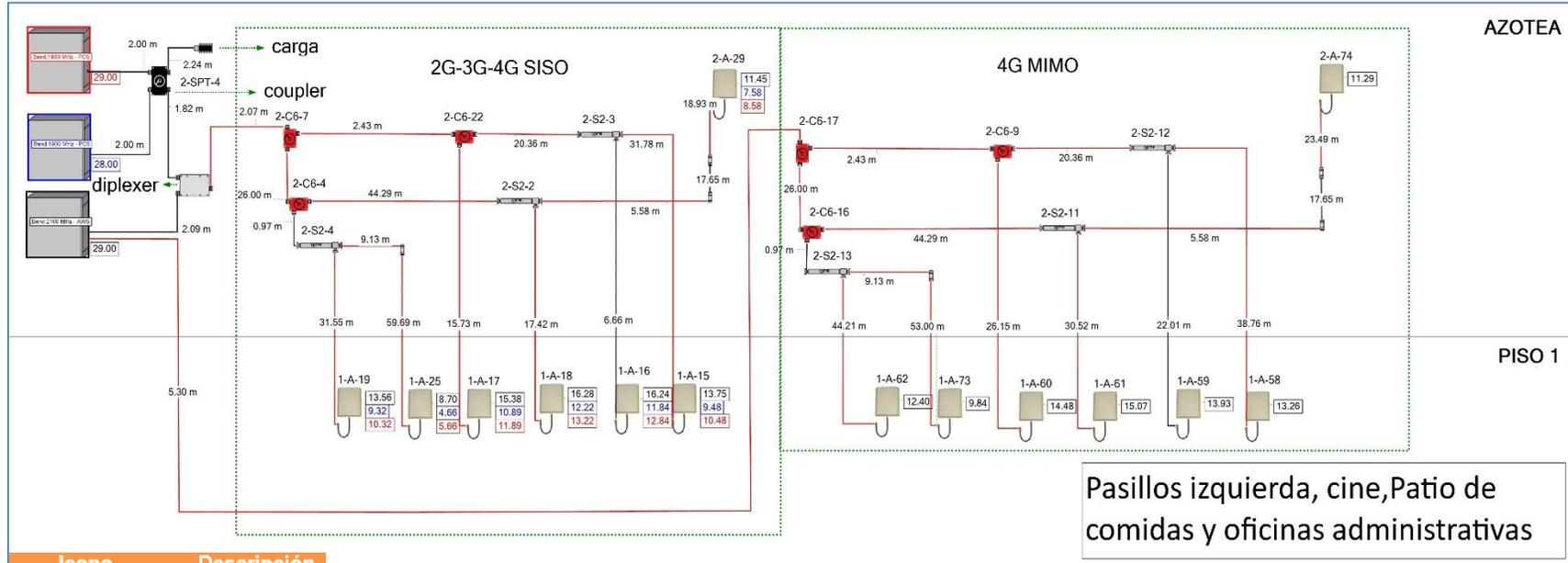
A continuación se presenta el diagrama unilineal final de cada sector, estos diagramas dan la simplicidad de ver que equipos se usan por cada sector. Los cuadros en colores nos dan la potencia de salida de cada antena por tecnología. Lo que se busca en el diseño es tener una uniformidad en potencia para cada antena, esto facilita realizar algún cambio de potencia ya que si se desea aumentar o disminuir se mantendrá la uniformidad. Además, se brinda una nomenclatura a cada componente para etiquetarlos, diferenciarlos y facilitar futuros cambios.

TABLA 3-2: LEYENDA DE ETIQUETADO

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Etiqueta	Descripción
<b>#Piso-Componente- #ID</b>	La etiqueta está compuesta por tres partes. La primera identifica en que piso se encuentra, la segunda que tipo de componente es y la tercera un ID único.
<b>1-A-1</b>	Antena omni o panel en primer piso con ID 1
<b>1-S2-1</b>	<i>Splitter</i> de 2 vías en primer piso con ID 1
<b>2-S3-2</b>	<i>Splitter</i> de 3 vías en segundo piso con ID 2
<b>1-C6-1</b>	<i>Tapper</i> de 6dB en primer piso con ID 1
<b>2-C10-2</b>	<i>Tapper</i> de 10dB en segundo piso con ID 2

Sector 1:



Icono	Descripción
	Potencia de salida de 4G
	Potencia de salida de 3G
	Potencia de salida de 2G

FIGURA 3-5: UNILINEAL DEL SECTOR 1  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Sector 2:

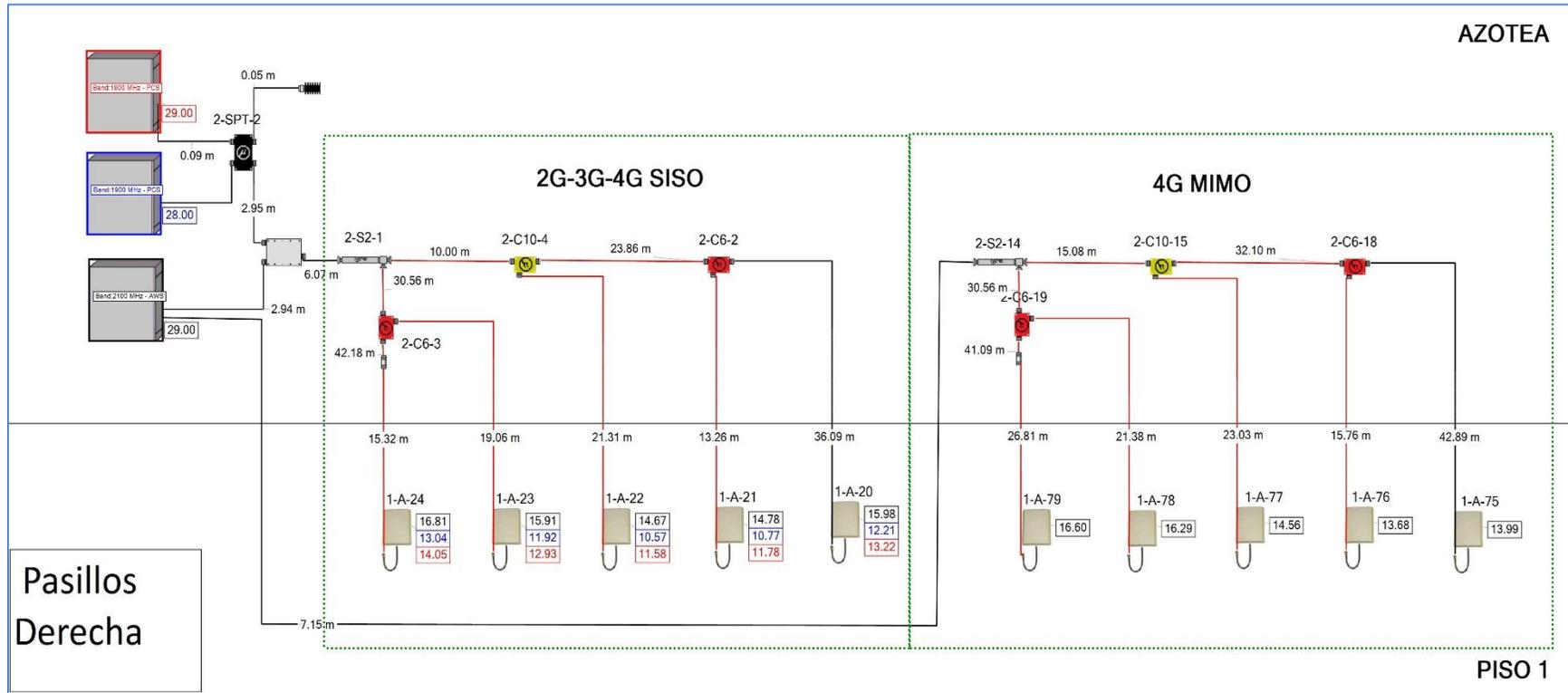


FIGURA 3-6: UNILINEAL DEL SECTOR 2  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Sector 3:

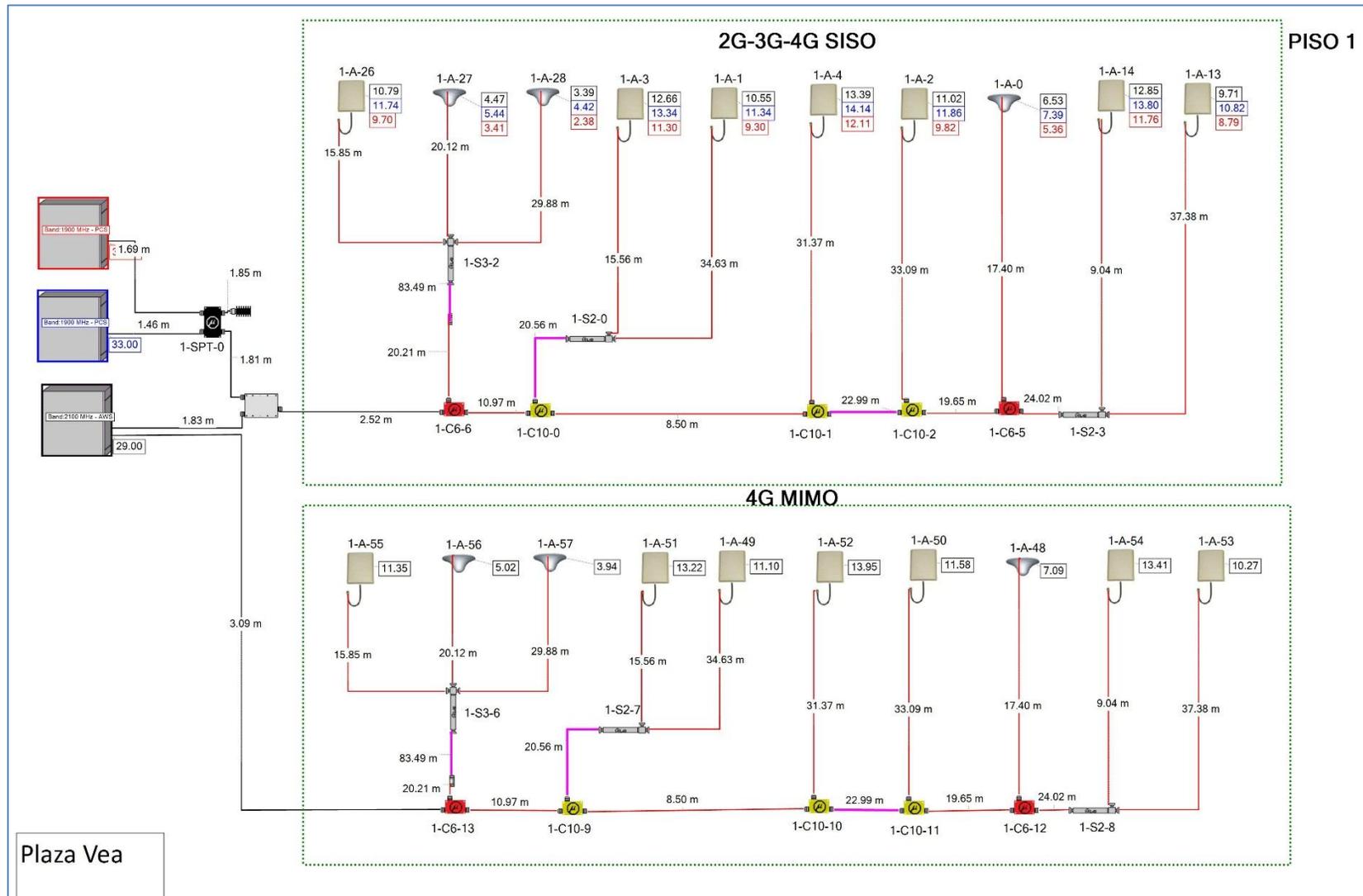


FIGURA 3-7: UNILINEAL DEL SECTOR 3  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Sector 4:

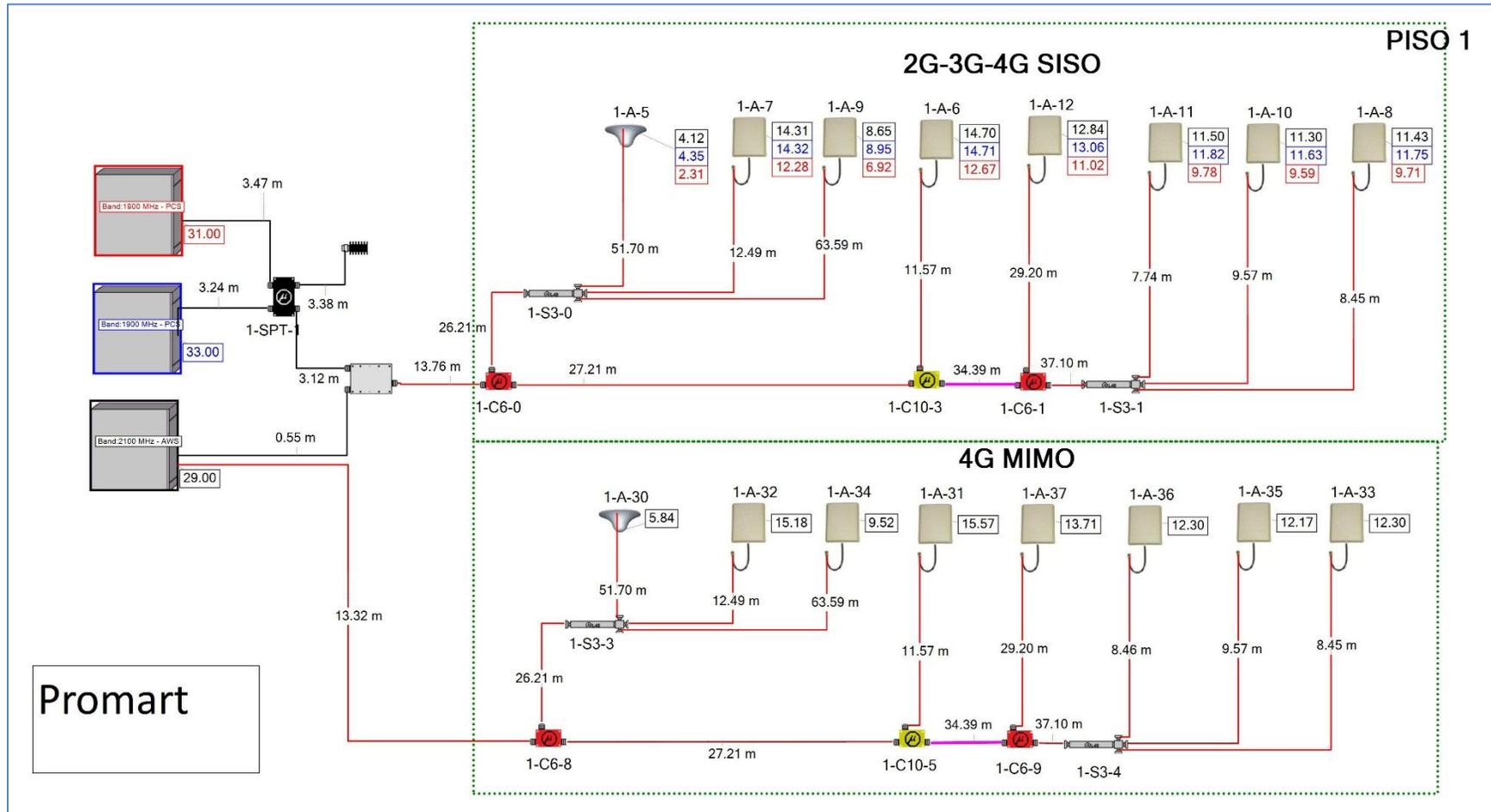
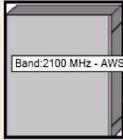
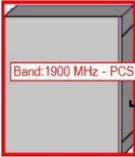
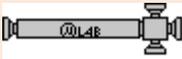
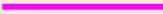
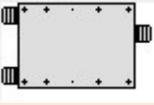


FIGURA 3-8 UNILINEAL DEL SECTOR 4  
 FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

TABLA 3-3: LEYENDA DE COMPONENTES TOTALES

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Componente	Descripción	Componente	Descripción
	RRH LTE		RRU 3G
	Antena Panel		RRU 2G
	Antena Omni		Cable coaxial flexible de ½
	Splitter de 2 vías		Cable coaxial rígido de ½
	Splitter de 3 vías		Cable coaxial rígido de 7/8
	Adaptador Hembra-Hembra		Carga de 100Watts
	Tapper de 10dB		Diplexer
	Tapper de 6dB		Coupler de bajo PIM

## Comentarios

- Para mayor detalle de los componentes usados, revisar el Anexo 5
- Se puede visualizar que hay un espejo en cuanto a los componentes, esto representa la presencia de 2 *paths* que hacen el MIMO 2x2.
- Las medidas de los cables y las dimensiones mostradas no tienen relación, la relación real se visualiza en el plano del centro comercial. En el unilineal se han alargado los cables mas no su medida con fines de dar un mejor orden y visualización.
- El valor encerrado en un cuadro negro muestra las potencias de 4G en dBm de las antenas y del equipo central RRH.
- El valor encerrado en un cuadro azul muestra las potencias de 3G en dBm de las antenas y del equipo central RRU.
- El valor encerrado en un cuadro rojo muestra las potencias de 2G en dBm de las antenas y del equipo central RRU.
- Cada componente tiene una etiqueta que lo identifica y lo registra para futuras modificaciones; además, da un orden y facilita la instalación.
- Físicamente la RRU 2G y la RRU 3G están integradas en un mismo equipo, para términos de diseño se separan de la manera mostrada.
- Las 4 RRH 4G pertenecientes a los sectores están configuradas a 29dBm.
- Las RRU 3G pertenecientes a los sectores 1 y 2 están configuradas a 38dBm y las de los sectores 3 y 4 están configuradas a 43dBm.
- Las RRU 2G pertenecientes a los sectores 1 y 2 están configuradas a 29dBm y las de los sectores 3 y 4 están configuradas a 31dBm.

Los siguientes diagramas muestran la ubicación de los componentes en el plano real diferenciados por colores según el sector al que corresponden.

La duplicidad de antenas es por el uso de MIMO para LTE, en dimensiones reales la separación para la frecuencia central de 2140 MHz en DL es de 0.7m ( $5\lambda$ ). Se puede observar exactamente cuál es el par MIMO para cada antena.

El cableado para los sectores 1 y 2 se da por las bandejas de la azotea que bajan hacia el piso 1 mediante los montantes. Para los sectores 3 y 4 se da por el falso techo que tienen las tiendas ancla del piso 1.

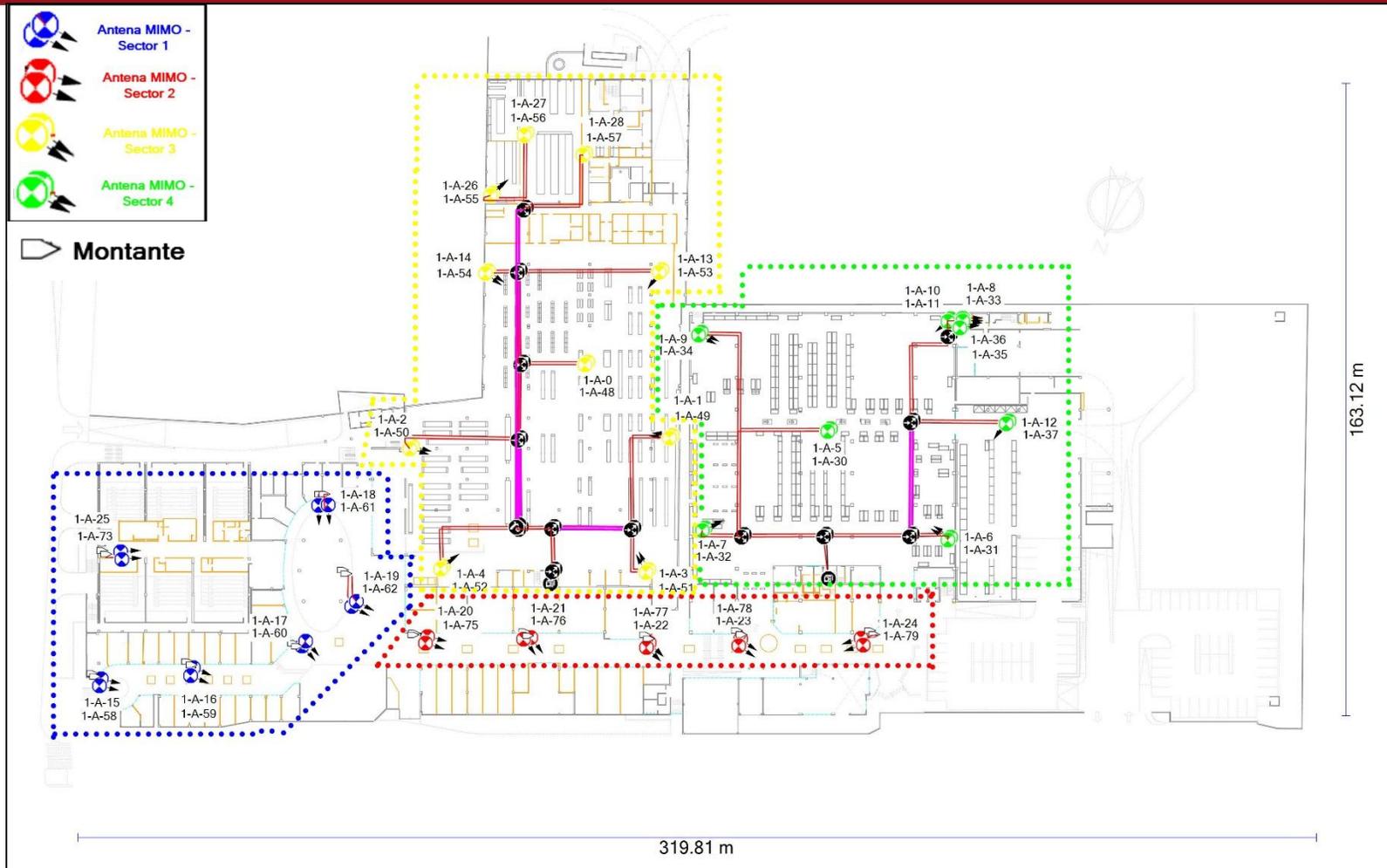


FIGURA 3-9: POSICIÓN DE ANTENAS Y CABLEADO EN PISO 1  
 FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

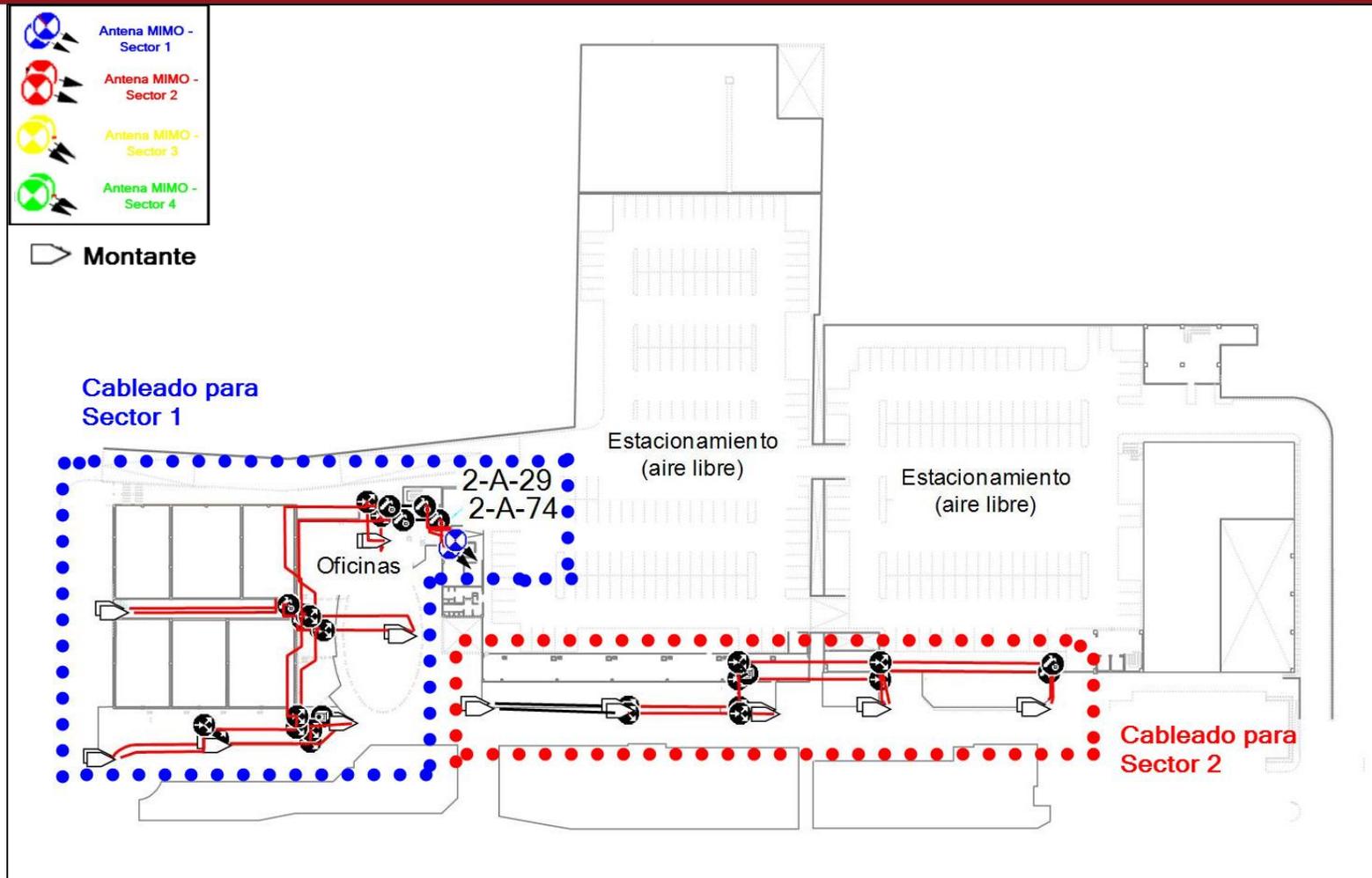


FIGURA 3-10: POSICIÓN DE CABLEADO EN AZOTEA  
 FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

En cuanto a la posición de los equipos centrales, estos se ubican de la siguiente manera:

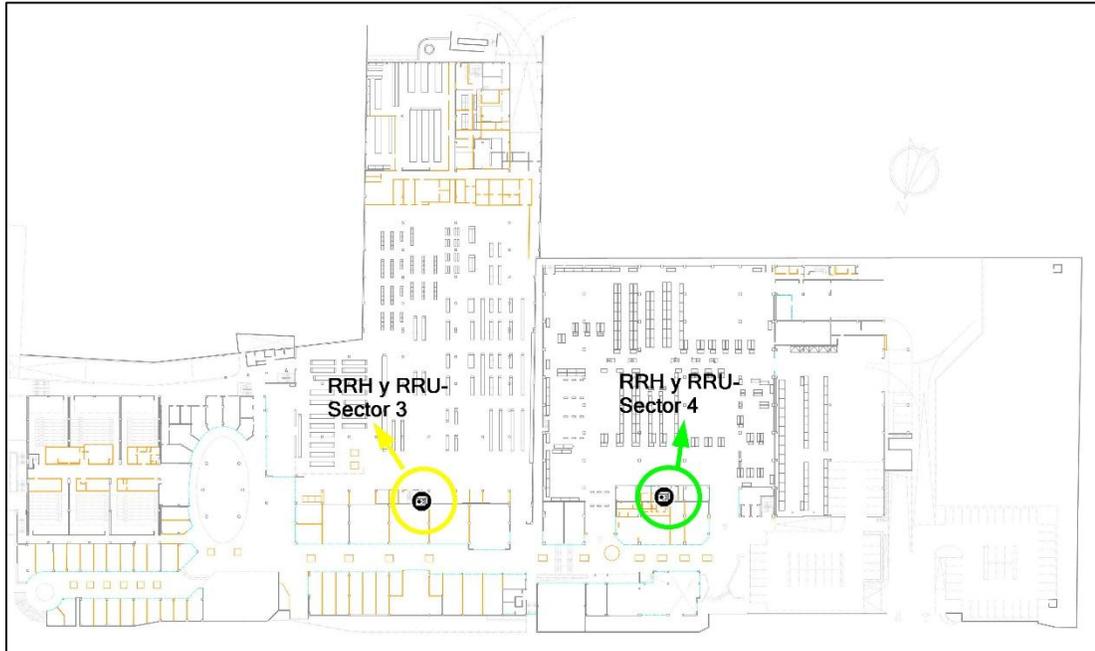


FIGURA 3-11: UBICACIÓN DE EQUIPOS PRINCIPALES EN PISO 1

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

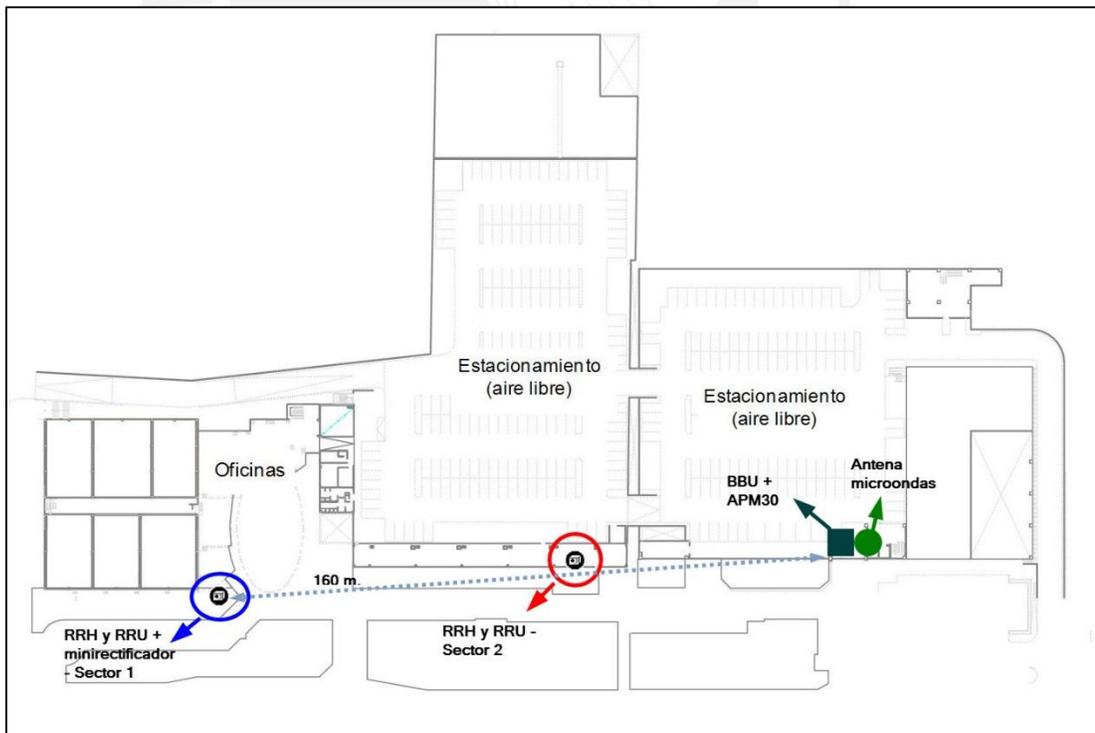


FIGURA 3-12: UBICACIÓN DE EQUIPOS PRINCIPALES EN AZOTEA

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

La ubicación de las RRH y RRU por sector se da en los cuartos de equipos mostrados. Se necesita sólo una BBU ya que soporta máximo 6 sectores por tecnología y en el proyecto se usan únicamente 4 sectores. La BBU, situada dentro del gabinete de transmisión, es ubicada en la azotea junto a la antena microondas y al gabinete de energía APM30. El APM30 convierte energía de AC a DC estables, alimenta a la BBU y a las RRH-RRU del sector 2, sector 3 y sector 4 por su cercanía. En cuanto a la energización de las RRH-RRU del sector 1, se instala un mini-rectificador adicional debido a que supera los 150 metros de distancia permitidos al APM30 como muestra la Figura 3-12.

Para una visualización de referencia se muestra un gráfico en 3D de los componentes. Estos son instalados a una altura de 4.8m.

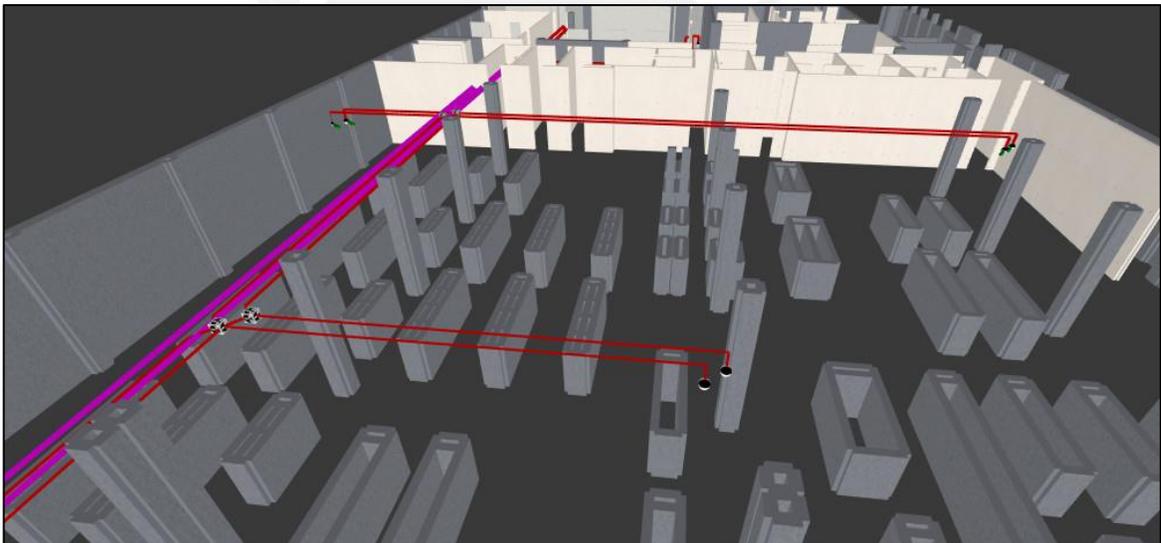


FIGURA 3-13: VISTA INTERNA EN 3D DEL CABLEADO

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

### 3.2.2 Simulaciones de 4G

Durante el diseño se verifica la correcta posición o no de las antenas según la simulación de cobertura. Dependiendo de las dimensiones del proyecto estas simulaciones pueden durar horas e incluso días.

Los principales KPI y sus rangos óptimos son resumidos en la siguiente tabla.

TABLA 3-4: KPI DE LTE Y RANGOS ACEPTABLES  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Nombre	Rango Aceptable
RSRP	$\geq -100\text{dBm}$
RSRQ	$\geq -15\text{dB}$
<i>Data Rate</i>	$> 60\text{Mbps}$
RS SNIR	$\geq 20\text{dB}$
UE Tx Power	$< 0\text{dBm}$

Las simulaciones se realizan en un plano establecido a una altura de 1.5m debido a que se considera la posición del celular a la altura promedio de una persona parada. Esto nos permite acercar las simulaciones a la realidad. Se considera el *Body Loss* en 3dB, el *Fast Fading* en 2dB y la carga de celda en 50%.

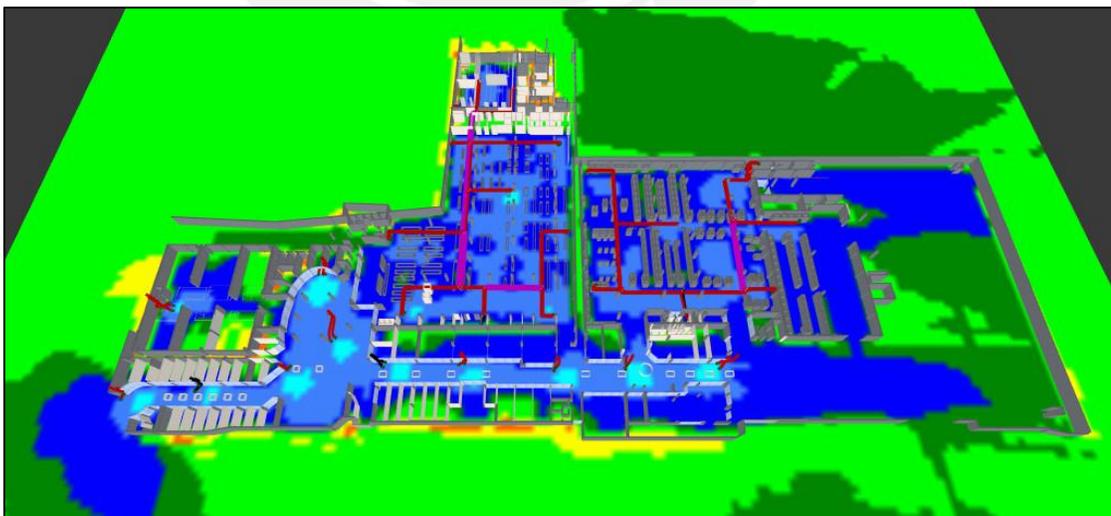


FIGURA 3-14: VISTA EN 3D CON PREDICCIÓN A 1.5m

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

El modelo de propagación que usa el programa es el *Fast Ray Tracing*, modelo determinístico que considera tanto la reflexión como la difracción de la señal. Usa un algoritmo modificado de trazado de rayos para calcular la intensidad de señal en cada pixel del plano de simulación [35]. Este modelo no es ni muy optimista ni muy pesimista, busca acercarse más a la realidad.

El modelo presenta los siguientes 5 factores en consideración:

- Factor de pérdida de pared 1 (P1): factor de corrección de pérdida para multi paredes, al aumentar P1 se disminuye la pérdida por penetración multi pared.
- Factor de pérdida de pared 2 (P2): factor de corrección de pérdida para multi paredes, al aumentar P2 se disminuye la pérdida por penetración multi pared.
- DLOS (Y1): exponente aplicado al camino con línea de vista directa, aumentar este valor incrementa la pérdida por trayecto.
- RP (Y2): exponente aplicado al camino reflejado, aumentar este valor incrementa la pérdida por trayecto.
- DNLOS (Y3): exponente aplicado al camino sin línea de vista directa, aumentar este valor incrementa la pérdida por trayecto.

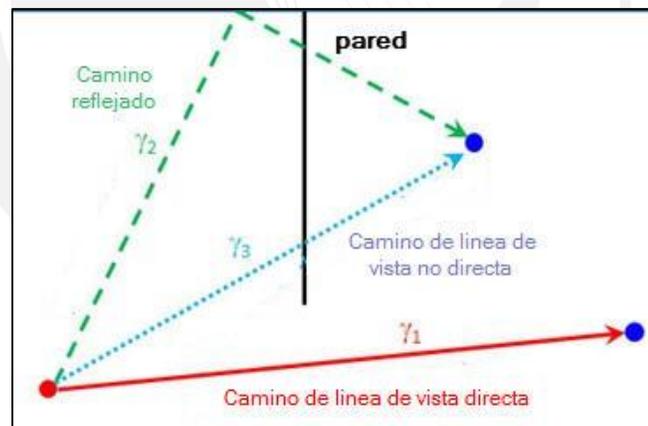


FIGURA 3-15: FACTORES DE *FAST RAY TRACING*

FUENTE: IBWAVE [35]

Se presentan las simulaciones del proyecto, recordar que las zonas en líneas punteadas son las que se cubrirá en el proyecto como se planteó en la Figura 2-9.

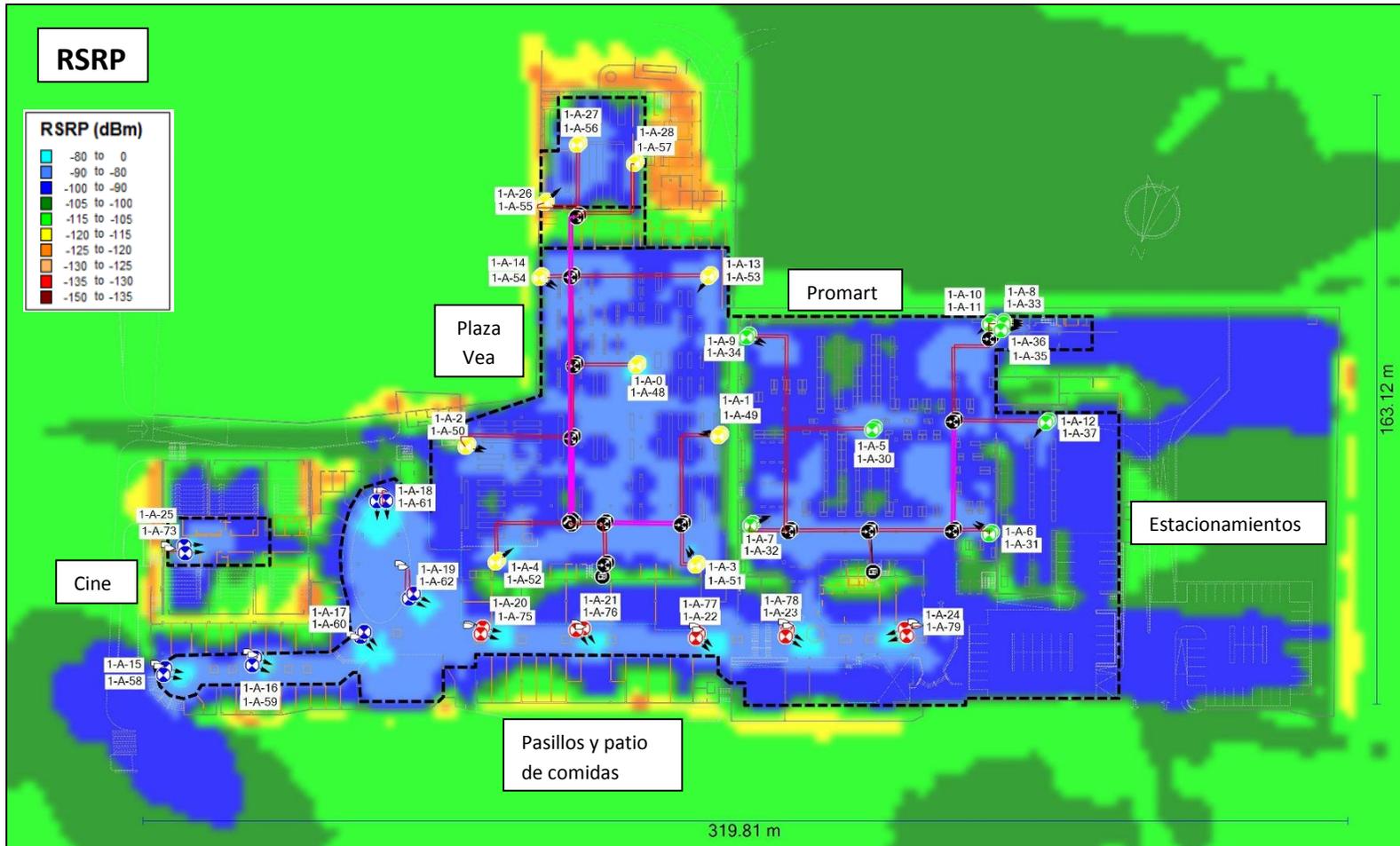


FIGURA 3-16: PREDICCIÓN DE RSRP

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Se observa que se obtienen niveles mayores a  $-100\text{dBm}$  en la mayoría del área cubierta por el proyecto, las zonas en verde corresponden a zonas de doble muro, vigas y pasadizos internos que atenúan la señal. Inclusive se tienen zonas que se ven beneficiadas como los estacionamientos.

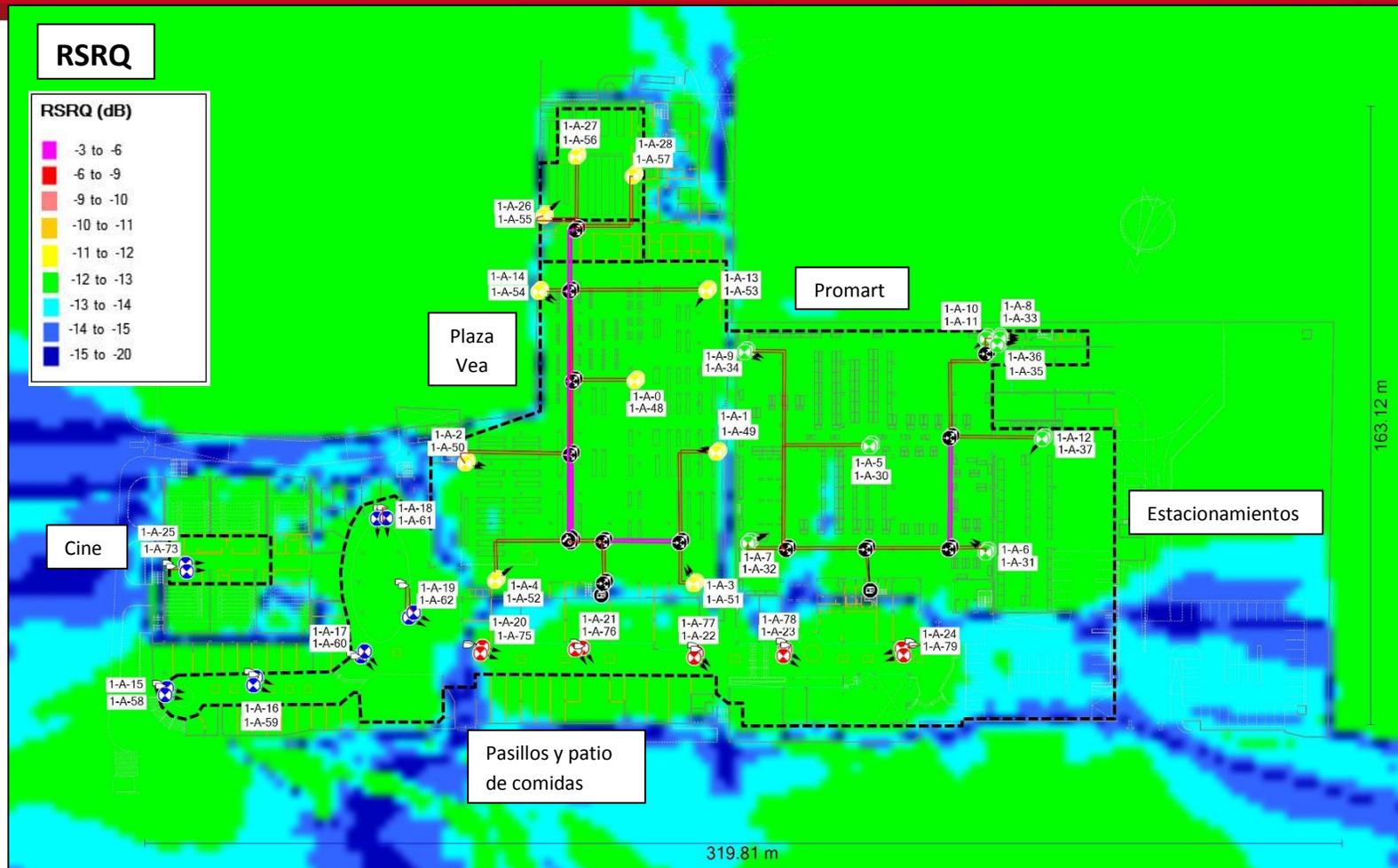


FIGURA 3-17: PREDICCIÓN DE RSRQ

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Se observa que se obtienen niveles mayores a -15dB en la mayoría del área cubierta por el proyecto.

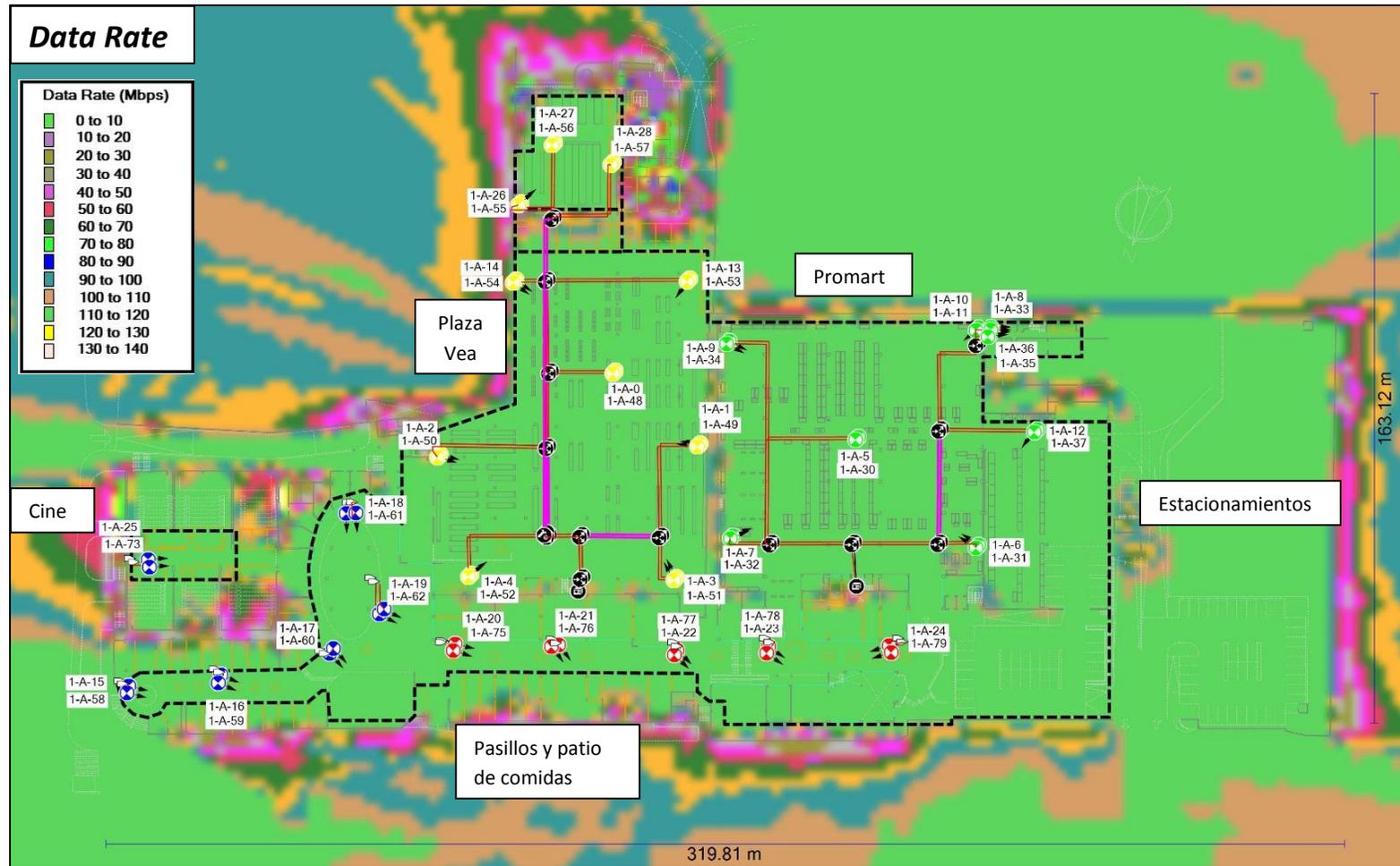


FIGURA 3-18: PREDICCIÓN DE TASA DE DATOS

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Se observa que se obtienen niveles de entre 110 a 120 Mbps (exactamente 116.8 Mbps) en la totalidad del área cubierta por el proyecto.

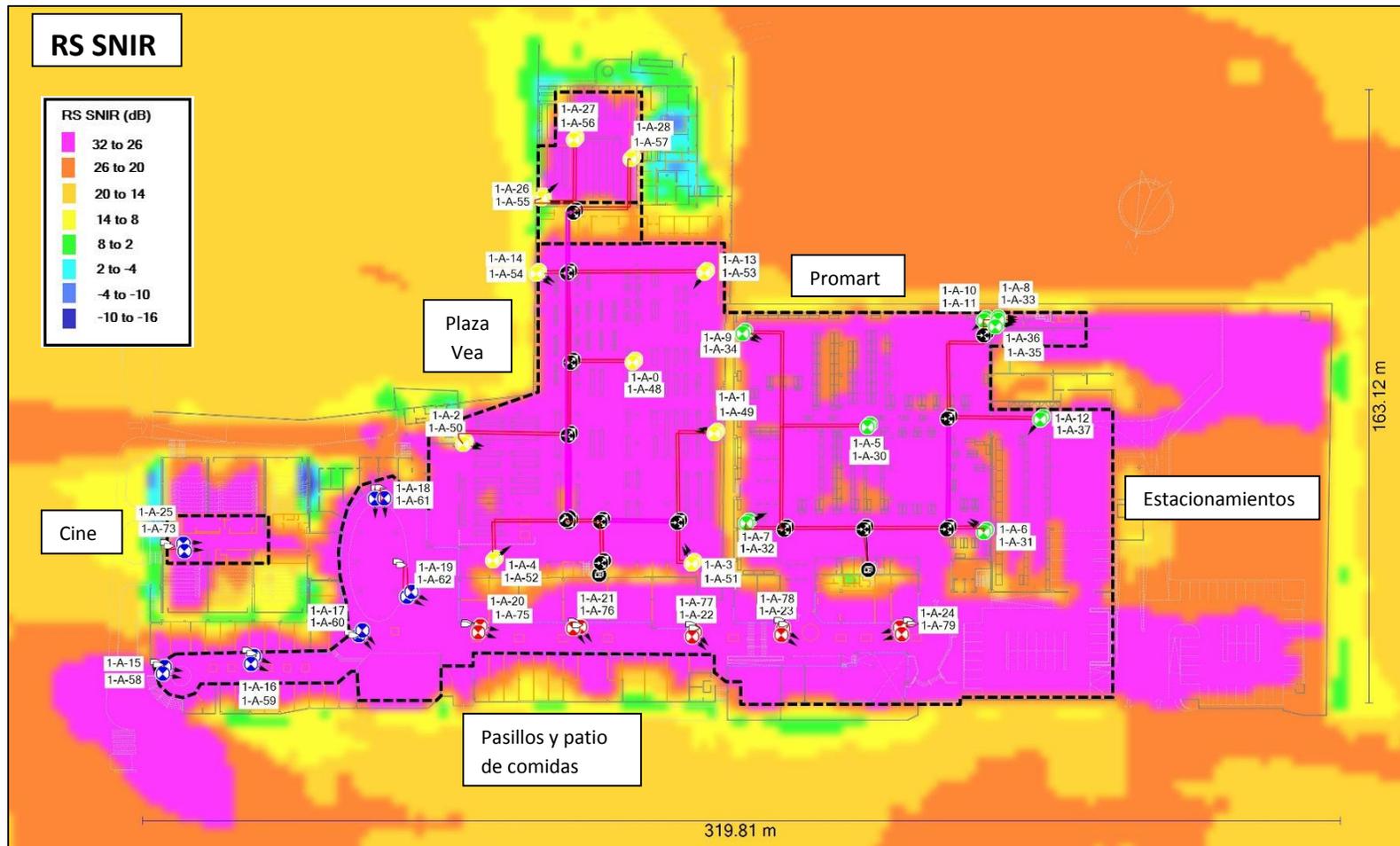


FIGURA 3-19: PREDICCIÓN DE RS SNIR

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Se observa que se obtienen niveles mayores a 32dB en la mayoría del área cubierta por el proyecto.

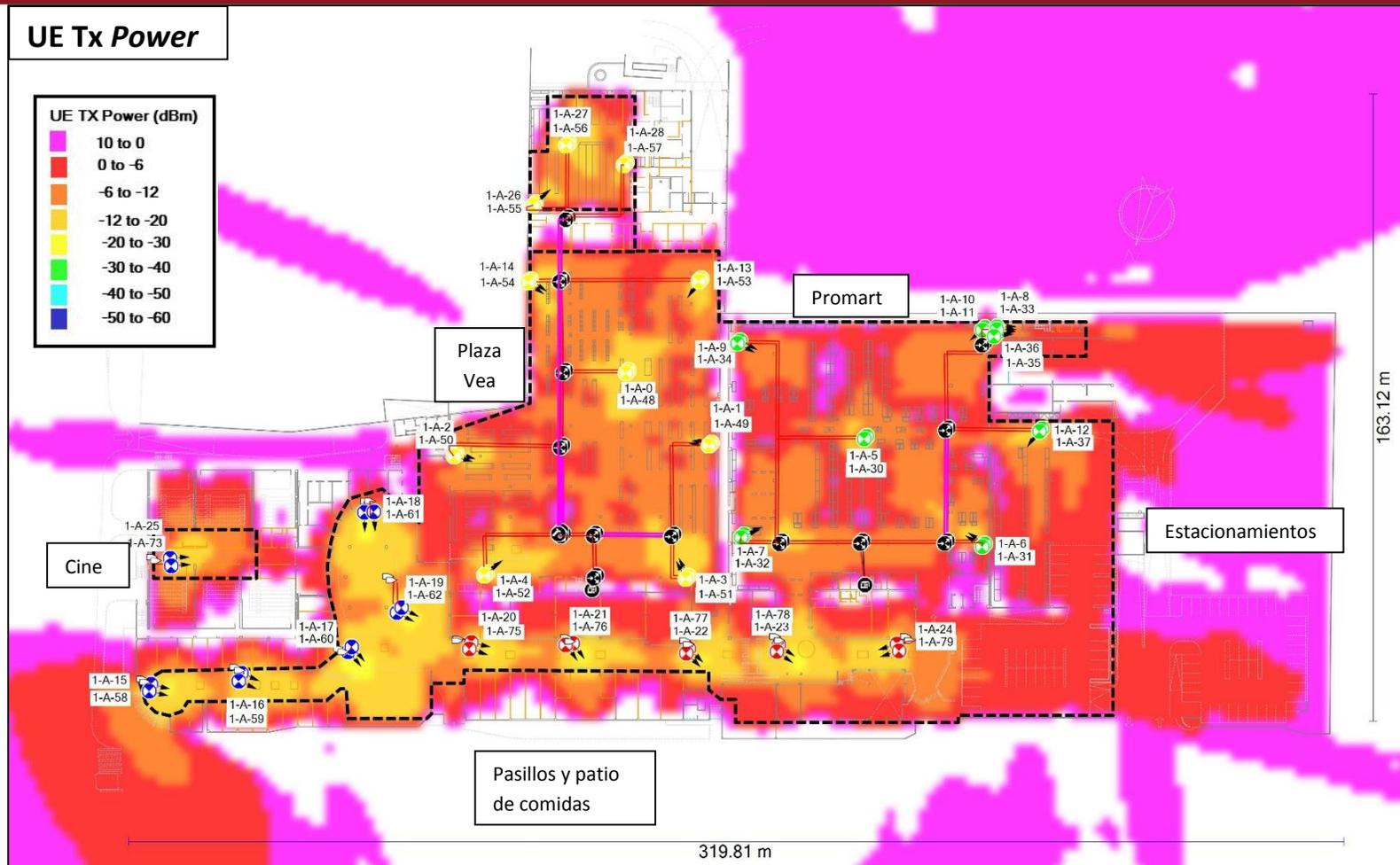


FIGURA 3-20: PREDICIÓN DE UE TX POWER

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Se observa que se obtienen niveles menores a 0dBm en la mayoría del área cubierta por el proyecto.

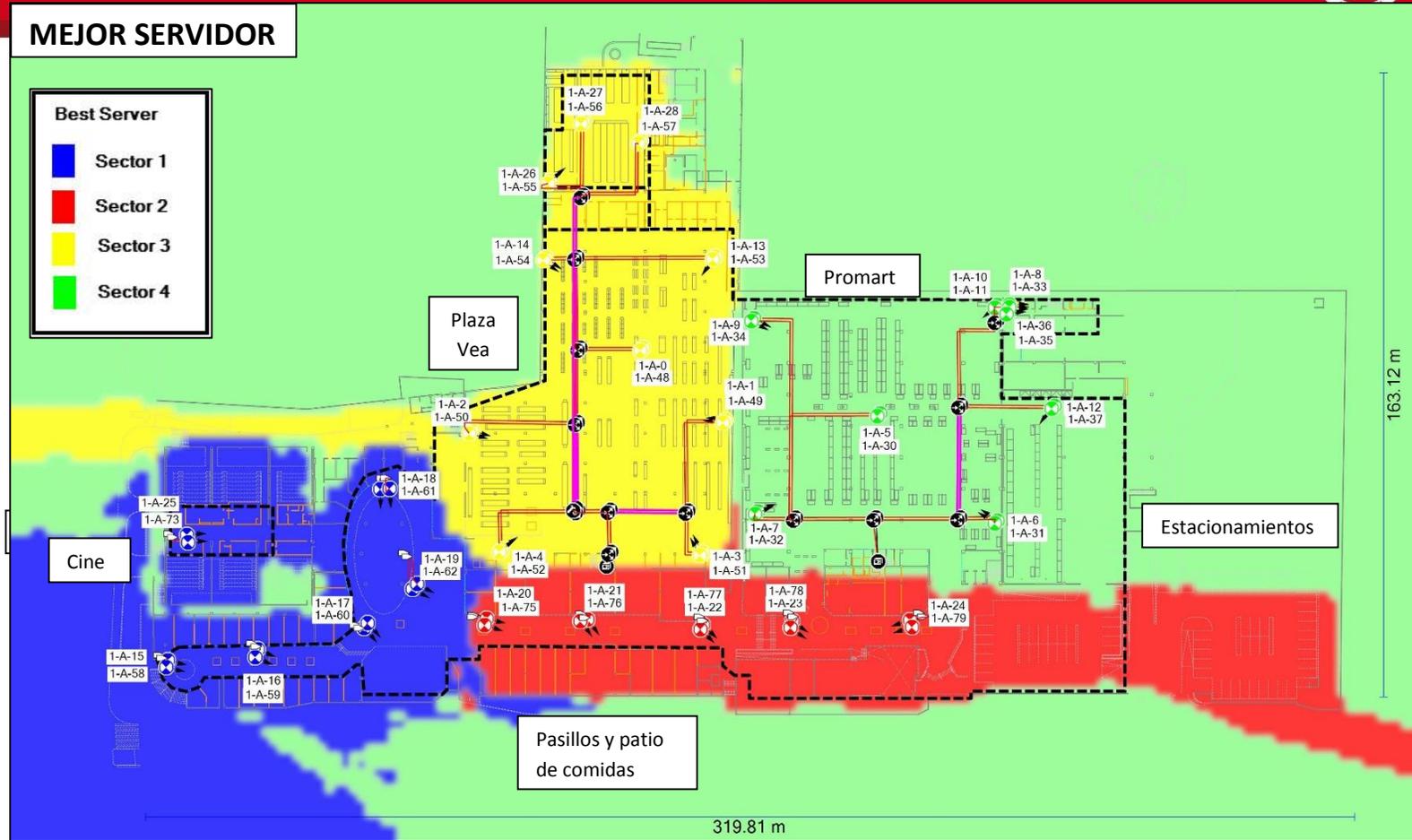


FIGURA 3-21: PREDICCIÓN DE MEJOR SERVIDOR

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Se observa que se obtiene como mejor servidor en cada sector al servidor correspondiente representado por su color.

### 3.2.3 Simulaciones de 2G y 3G

Solo se considera un parámetro para cada tecnología adicional con el cual se busca mostrar la buena cobertura que se logra.

TABLA 3-5: KPI DE 3G-2G Y RANGOS ACEPTALES

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

	Nombre KPI	Rango Aceptable
3G	RSCP	> -75dBm
2G	Rx Level	> -75dBm

Al terminar el diseño se comprueba que se tiene un nivel óptimo de cobertura en las zonas cubiertas por el proyecto.

Las simulaciones para la azotea se muestran en el Anexo 1.

A continuación se muestran las simulaciones obtenidas.

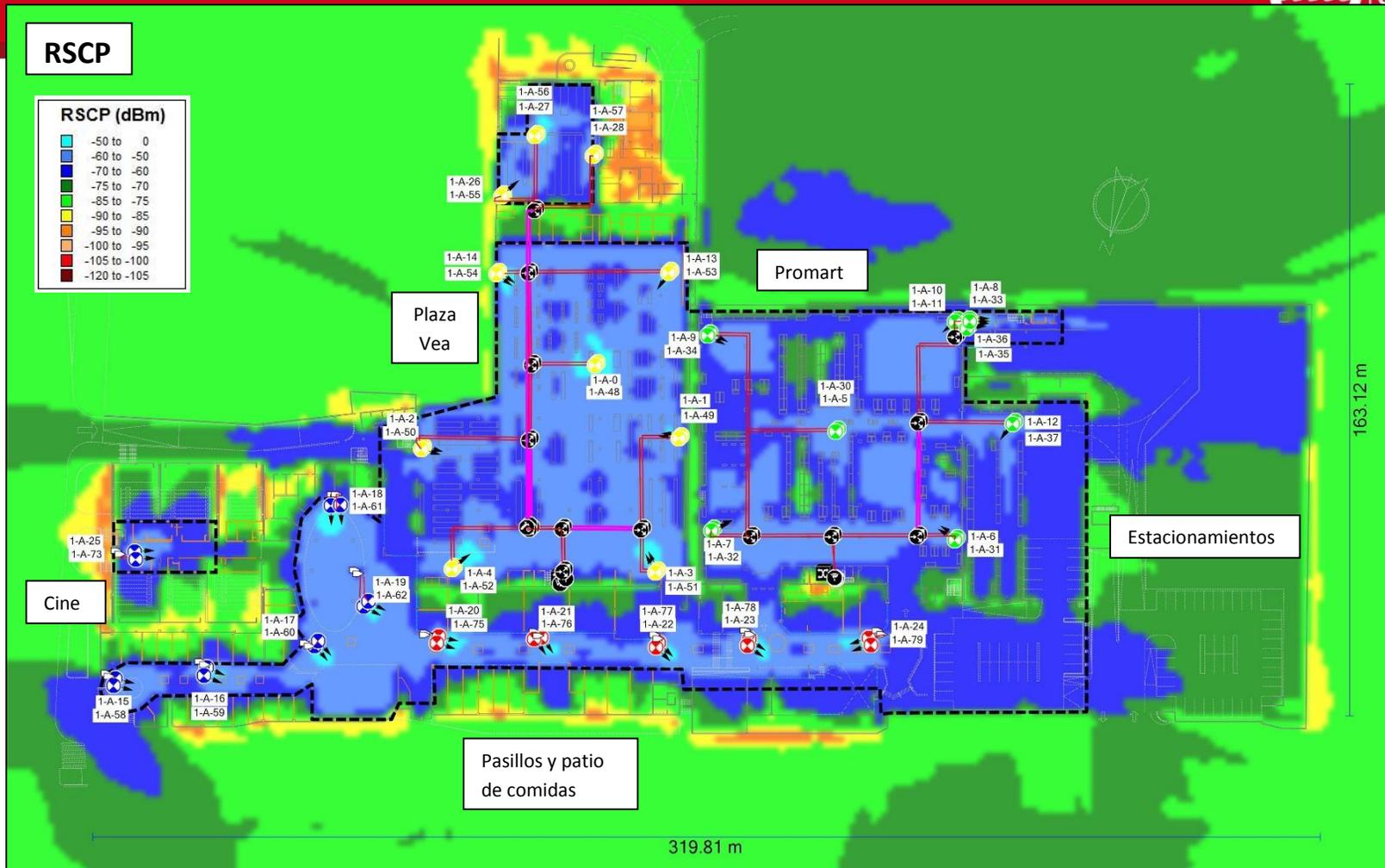


FIGURA 3-22: PREDICCIÓN DE RSCP

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Se observa que se obtienen niveles mayores a -75dBm en la mayoría del área cubierta por el proyecto.

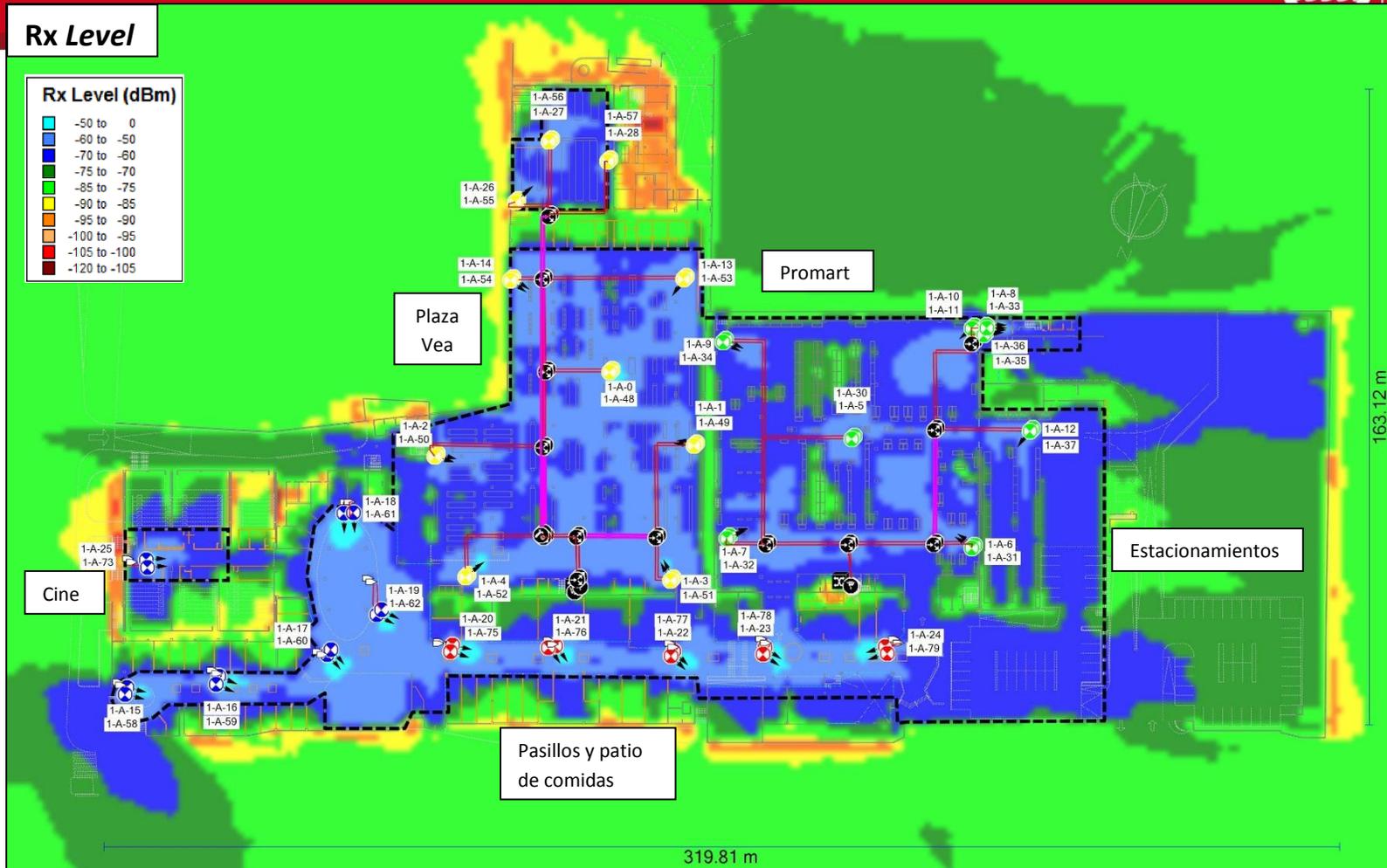


FIGURA 3-23: PREDICCIÓN DE RX LEVEL

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Se observa que se obtienen niveles mayores a -75dBm en la mayoría del área cubierta por el proyecto.

### 3.2.4 Mediciones Post Instalación

Una vez instalado el sistema se presentan las mediciones de los principales KPI. Cabe mencionar que sólo se instalaron los sectores 1, 2 y 3. El sector 4 no se instaló por pedido expreso de la tienda Promart.

- RSRP

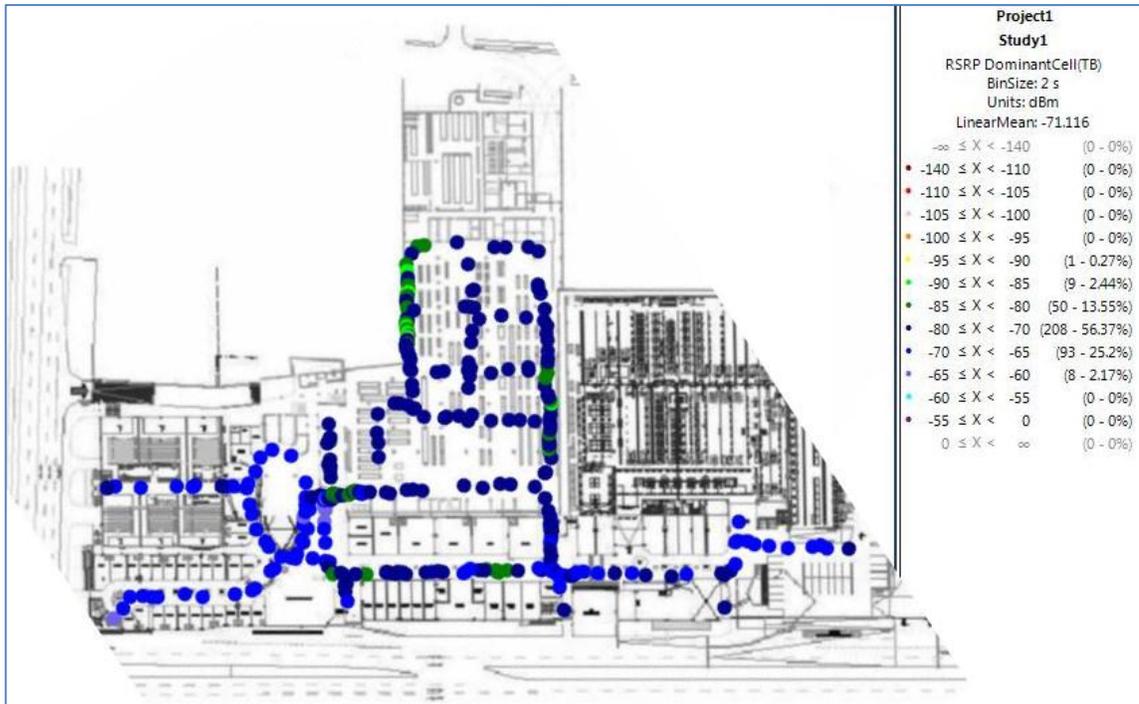


FIGURA 3-24: MEDICIÓN DE RSRP  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Se observa que el 100% de las medidas tomadas tienen niveles mayores a -95dBm. Según el rango permitido (RSRP > - 100dBm), los valores obtenidos están en su totalidad dentro de este rango. Ello asegura una óptima cobertura 4G dentro del CC con niveles que superan los obtenidos en las simulaciones.

- RSRQ



FIGURA 3-25: MEDICIÓN DE RSRQ  
 FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Se observa que el 100% de las medidas tomadas tienen niveles mayores a -8dB. Según el rango permitido ( $RSRQ > -15\text{dB}$ ), los valores obtenidos están en su totalidad dentro de este rango. Los niveles muy altos de RSRQ aseguran óptima calidad de la señal dentro del CC.

- TASA DE DATOS



FIGURA 3-26: MEDICIÓN DE TASA DE DATOS

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Se observan niveles de hasta 120Mbps lo cual es resultado de aplicar la tecnología LTE y el arreglo MIMO. Los valores mostrados garantizan alta velocidad de acceso a internet que se traduce en buen servicio y satisfacción de usuario. Si bien teóricamente se puede llegar hasta 200Mbps con la aplicación de MIMO, se muestra que en la realidad esto no es así ya que influyen factores como el tipo de backhaul, congestión, tipo de terminal, etc.

- SNIR

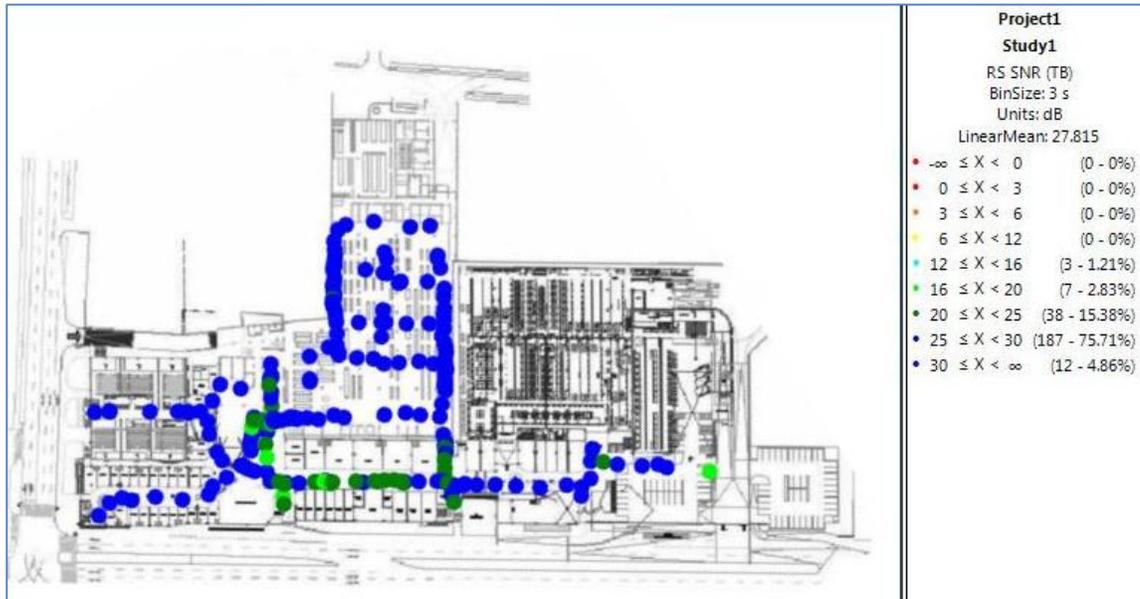


FIGURA 3-27: MEDICIÓN DE SNIR  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Se observa que el 95.96% de las medidas tomadas tienen niveles mayores a 20dB. Según el rango permitido (SNIR > 20dB), la mayoría de los valores obtenidos están dentro de este rango. Esto significa que la relación de potencias entre señal de referencia y la interferencia de los vecinos es alta; por ello se tendrá poca interferencia.

- MEJOR SERVIDOR



FIGURA 3-28: MEDICIÓN DE MEJOR SERVIDOR

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Se puede observar claramente la sectorización dentro del centro comercial y la dominancia de cada servidor en el área asignada en el diseño. El operador asignó un *Physical Cell ID* de 489 al sector 1, 471 al sector 2 y 500 al sector 3. Se tiene cobertura al 100% del sistema instalado dentro del centro comercial; es decir, no se nota la presencia de sectores *outdoor* que interfieran al sistema proyectado.

- RSCP

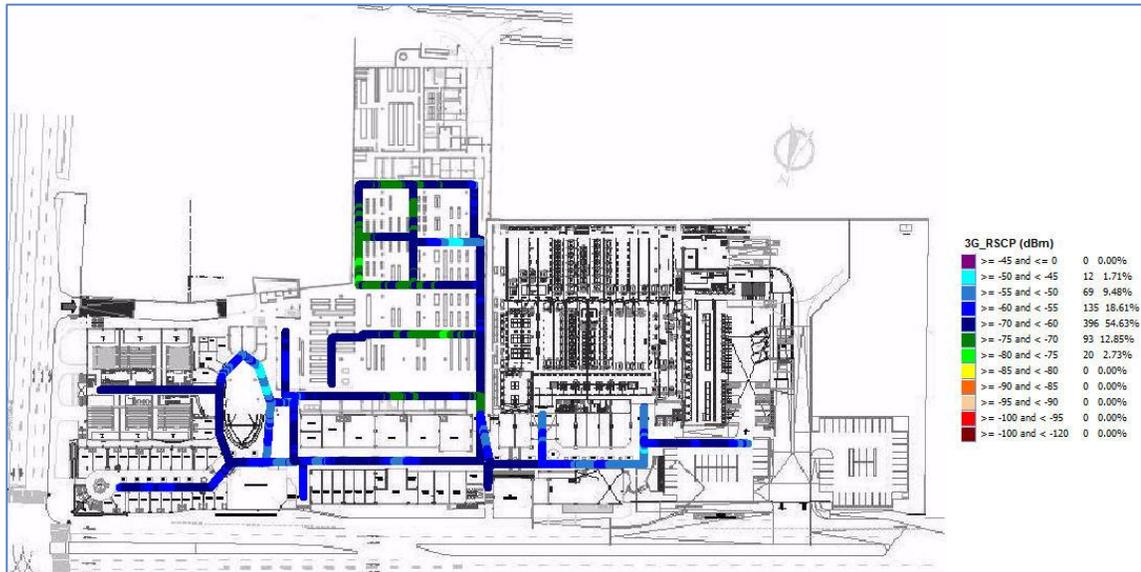


FIGURA 3-29: MEDICIÓN DE RSCP  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Se observa que el 97.27% de las medidas tomadas tienen niveles mayores a -75dBm. Según el rango permitido (RSCP > -75dBm), la mayoría de los valores obtenidos están dentro de este rango. Esto asegura una óptima cobertura 3G dentro del CC permitiendo ejecutar las llamadas en 4G usando el método CSFB.

- **RX LEVEL**

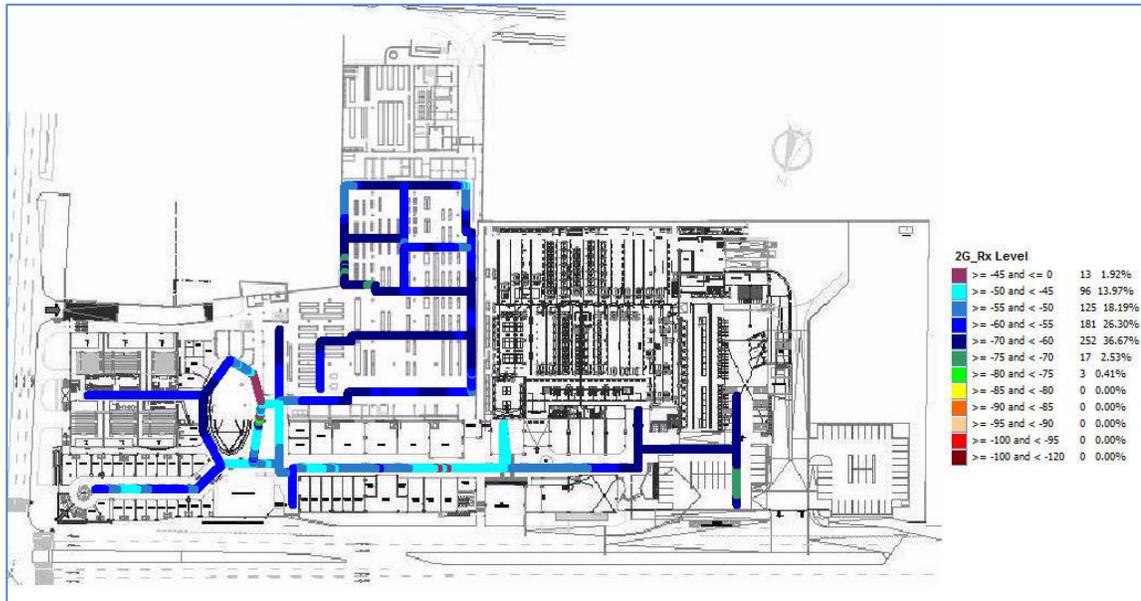


FIGURA 3-30: MEDICIÓN DE RX LEVEL  
 FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Se observa que el 99.51% de las medidas tomadas tienen niveles mayores a -75dBm. Según el rango permitido (*Rx Level* > -75dBm), la mayoría de los valores obtenidos están dentro de este rango. Esto asegura una óptima cobertura 2G dentro del CC permitiendo ejecutar las llamadas en 4G usando el método CSFB.

Para mayor detalle sobre las mediciones finales revisar el Anexo 8.

## Capítulo 4

# ANÁLISIS FINANCIERO DEL PROYECTO

### 4.1 Introducción

En el presente capítulo se analiza la rentabilidad del proyecto tomando como datos principales los costos del mercado actual tanto para los egresos como para los ingresos.

### 4.2 Análisis financiero

El análisis financiero nos ayuda a saber si el proyecto es rentable o no, es decir, si genera ganancias o beneficios en cuanto a lo invertido para el desarrollo del mismo. Básicamente este análisis compara lo invertido (costos) y lo que se ganará (ganancias) en un determinado tiempo, teniendo en consideración los cambios que surgen durante ese periodo. Se usan dos criterios para evaluar la rentabilidad del proyecto:

#### **VAN (Valor actual Neto)**

Es un monto que nos da la idea del valor actual que tienen unos futuros flujos de caja (ganancias – costos) para el proyecto.

#### **TIR (tasa interna de retorno)**

Tasa de interés que hace cero al VAN y nos indica la rentabilidad del proyecto.

**Consideraciones:**

- Para que el proyecto sea considerado rentable se busca un VAN > 0 y un TIR > tasa de interés del mercado.
- El tiempo en el que se evalúa el proyecto es de 5 años. Considerando el año de inversión como año 0.
- Se tiene una tasa de mercado del 15% y se considera que el OpEx es el 15% del CapEx.
- Se tienen cálculos diferentes tanto para el servicio de voz como para datos.
- Del aforo total, se considera que en promedio se tiene un 50% de asistentes diarios de los cuales el 25% son considerados usuarios potenciales. Según la INEI, el 87.7% de estos usuarios tiene un equipo celular [36]. Además, de acuerdo a OSIPTEL, la distribución de líneas móviles es la siguiente: 17.7% son líneas postpago, 10.3% son líneas control y 72% son líneas prepago [37]. La población efectiva que cubre el proyecto queda de la siguiente manera.

TABLA 4-1: POBLACIÓN EFECTIVA DEL PROYECTO

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

	Consideraciones	Cantidad
<b>Aforo permitido</b>		12858
<b>Asistentes</b>	50% del total	6429
<b>Usuarios potenciales</b>	25% de asistentes	1608
<b>Asistentes con equipo celular</b>	87.70%	<b>1411</b>
<b>Líneas Post-Pago</b>	17.70%	250
<b>Líneas Pre-Pago</b>	72%	1016
<b>Líneas Control</b>	10.30%	146

Con un crecimiento poblacional del 1.3% anual, según INEI, se tiene la siguiente población efectiva para los 5 años de evaluación del proyecto. Se considera que la totalidad de clientes control y postpago tienen acceso a internet móvil, para el caso de clientes prepago sólo el 70% [38].

TABLA 4-2: CRECIMIENTO DE POBLACIÓN EFECTIVA PARA VOZ

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
<b>Total</b>	1411	1430	1449	1468	1488
<b>postpago</b>	250	254	257	260	264
<b>prepago</b>	1016	1030	1044	1057	1072
<b>control</b>	146	148	150	152	154

TABLA 4-3: CRECIMIENTO DE POBLACIÓN EFECTIVA PARA DATOS

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
<b>Total</b>	1108	1123	1138	1152	1169
<b>postpago</b>	250	254	257	260	264
<b>prepago</b>	712	721	731	740	751
<b>control</b>	146	148	150	152	154

Se aplica las siguientes consideraciones en el CC para el cálculo de las ganancias.

TABLA 4-4: CONSIDERACIONES PARA LAS GANANCIAS

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

<b>Margen de ganancia</b>	<b>70%</b>
<b>Tarifa voz prepago x minuto [39]</b>	S/. 0.49
<b>Tarifa voz post pago/control x minuto</b>	S/. 0.20
<b>Tarifa de datos (10MB) prepago</b>	S/. 1.00
<b>Tarifa de datos (10MB) postpago/control</b>	S/. 0.60
<b>Duración promedio de llamada (segundos)</b>	60
<b>Llamadas promedio por usuario</b>	2
<b>MB consumidos en promedio x usuario al día</b>	10 MB

Ahora se calcula las ganancias, estas son mostradas en nuevos soles y de manera anual para voz y datos.

TABLA 4-5: GANANCIAS DEL SERVICIO DE VOZ

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
<b>postpago</b>	S/. 25,200.00	S/. 25,603.20	S/. 25,905.60	S/. 26,208.00	S/. 26,611.20
<b>prepago</b>	S/. 250,911.36	S/. 254,368.80	S/. 257,826.24	S/. 261,036.72	S/. 264,741.12
<b>control</b>	S/. 14,716.80	S/. 14,918.40	S/. 15,120.00	S/. 15,321.60	S/. 15,523.20
<b>TOTAL</b>	S/. 290,828.16	S/. 294,890.40	S/. 298,851.84	S/. 302,566.32	S/. 306,875.52

TABLA 4-6: GANANCIAS DEL SERVICIO DE DATOS

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
<b>postpago</b>	S/. 37,800.00	S/. 38,404.80	S/. 38,858.40	S/. 39,312.00	S/. 39,916.80
<b>prepago</b>	S/. 179,424.00	S/. 181,692.00	S/. 184,212.00	S/. 186,480.00	S/. 189,252.00
<b>control</b>	S/. 22,075.20	S/. 22,377.60	S/. 22,680.00	S/. 22,982.40	S/. 23,284.80
<b>TOTAL</b>	S/. 239,299.20	S/. 242,474.40	S/. 245,750.40	S/. 248,774.40	S/. 252,453.60
<b>Total General</b>	S/. 530,127.36	S/. 537,364.80	S/. 544,602.24	S/. 551,340.72	S/. 559,329.12

Para el cálculo de los gastos (CapEx) se consideran los materiales y equipos a usar, los costos de diseño y los costos de instalación. Además, se tendrá gastos de operación y mantenimiento.

TABLA 4-7: GASTOS EXTERNOS

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

<b>CapEx</b>	Gastos de equipos	\$210,950.88
	Gastos de diseño	\$20,000.00
	Gastos varios	\$8,000.00
<b>OpEx</b>		15% de CapEx
<b>Mantenimiento</b>		5% de CapEx

Los gastos se evalúan a la moneda del mercado internacional, el dólar americano, el tipo de cambio equivalente a la moneda local es de S/. 3.150 nuevos soles [40].

Para mayor detalle se muestra la lista de materiales y equipos a usar en el presente proyecto con su respectivo costo de suministro e instalación en el Anexo 4.

Ya se cuenta con todo lo necesario para el desarrollo del flujo de caja. Este flujo proyectado para 5 años nos permite tener un balance entre ganancias y costos anuales para el cálculo del VAN y el TIR. El cálculo se desarrolla en la moneda nacional.

TCO	15%					
	año 0	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5
CapEx	-S/. 664,495.27	S/. 0.00				
OpEx		-S/. 99,674.29				
Mantenimiento		-S/. 33,224.76				
Ganancias		S/. 530,127.36	S/. 537,364.80	S/. 544,602.24	S/. 551,340.72	S/. 559,329.12
<b>Flujo Total</b>	<b>-S/. 664,495.27</b>	<b>S/. 397,228.31</b>	<b>S/. 404,465.75</b>	<b>S/. 411,703.19</b>	<b>S/. 418,441.67</b>	<b>S/. 426,430.07</b>
<b>VAN</b>	<b>S/. 708,712.87</b>					
<b>TIR</b>	<b>54%</b>					

FIGURA 4-1: FLUJO DE CAJA  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Se obtiene como VAN S/. 708,712.87 nuevos soles, esto significa tener un saldo positivo del proyecto. Se observa que se recupera la inversión en el segundo año. Se obtiene un TIR de 54%, un valor muy por encima de la tasa de mercado. Esto muestra que el proyecto resulta altamente rentable.

## Conclusiones

- Las mediciones mostradas en el segundo capítulo evidencian una inadecuada cobertura de la red 3G *outdoor*. La ubicación del centro comercial al borde de dos estaciones base conlleva a tener bajos niveles de señal y altos niveles de interferencia. Como consecuencia se presentan caídas de llamadas generando incomodidad en los usuarios y pérdidas económicas al operador.
- La tecnología LTE con la implementación del arreglo MIMO 2x2 genera velocidades de acceso mayores a 100Mbps, esto se observa en las simulaciones presentadas en el capítulo 3 (Figura 3-18) y se comprueba con las mediciones finales obtenidas luego de instalar el sistema (Figura 3-26). Se pueden obtener mayores velocidades si se cambia el *backhaul* actual de microondas por fibra óptica.
- Si bien se sabe que el uso del *software* para el diseño de la red *indoor* no es 100% exacto, se acerca a la realidad y sirve de referencia para garantizar un diseño correcto y con todas las condiciones para presentar una óptima red. Esto lo demuestran los niveles de cobertura y velocidad de acceso obtenidos en la realidad tomando como base el diseño en *software*. Cabe recordar que es en la etapa de optimización que se ajustan todos los errores, pero un buen diseño hace más fácil la optimización.
- Se tiene que entender que en comunicaciones móviles se trabaja con radiación y ondas que no se pueden controlar o contener como el agua. En ciertas zonas del proyecto se observa que la cobertura se desborda, esto es inherente a la naturaleza de la radiofrecuencia. Lo que se busca es tratar de controlar esta radiación con el uso de diversas antenas directivas.
- Con las simulaciones mostradas tanto en 4G, 3G y 2G se obtiene una óptima cobertura de señal celular dentro del centro comercial Real Plaza Santa Clara. Esto lo respaldan los niveles de KPI obtenidos luego de la instalación que están dentro del rango aceptable impuesto por las operadoras (Ver anexo 8).

- El método seguido durante todo el proyecto muestra al final buenos resultados, se puede tomar como base para futuros diseños adaptándose al criterio de cada diseñador.
- Tanto los valores de VAN como de TIR obtenidos indican que el proyecto es altamente rentable. Ya en el segundo año se recupera la inversión y se comienza a generar ganancias.
- Los niveles de rentabilidad obtenidos en el proyecto pueden atraer la inversión por parte de las operadoras en Perú. Se abre una nueva oportunidad de generar ganancias.
- Las redes *indoor* mejoran la cobertura dentro de edificaciones, además, descongestionan las redes *outdoor*. Un correcto despliegue de redes *indoor* en lugares con gran afluencia de usuarios hace que las redes *outdoor* se liberen y reduzcan su radio de cobertura emitiendo menores niveles de potencia. Los usuarios deben entender que el aumento de estaciones base y redes *indoor* en vez de generar mayor radiación y niveles de potencia las disminuye.

## Recomendaciones

- Es primordial que antes de empezar el diseño se asigne de manera correcta las dimensiones y los tipos de materiales para cada división existente en la edificación. Un error o evasión puede modificar severamente las simulaciones finales.
- Se recomienda el uso de antenas panel directivas en los bordes de la edificación con el haz dirigido hacia el interior y un *tilt* de 30. Con esto se busca controlar la radiación hacia el exterior para que no interfiera en gran medida a las redes *outdoor*.
- El trayecto que tiene la señal hasta llegar a la antena no debe superar los 6 o 7 saltos, ya que a más cantidad de saltos (elementos pasivos) se introduce más interferencia intermodular que es perjudicial para el rendimiento de la red.
- La instalación del arreglo MIMO debe tener la correcta distancia entre ambas antenas. Una menor o mayor distancia entre antenas hace que se pierdan los beneficios de esta configuración de antenas.
- La tendencia actual es implementar redes *indoor* en edificaciones con alto nivel de capacidad de usuarios. Pero se espera que estas redes sean aplicadas en hogares, oficinas e inclusive en calles. Para facilitar el despliegue e instalación es recomendable que las nuevas edificaciones cuenten con infraestructura especial para telecomunicaciones así como ya es común tenerlo para redes eléctricas.
- La solución DAS es aplicada de mejor manera en áreas medianas. Su uso para áreas de mayor dimensión implica necesariamente el uso de la sectorización. Esto debido al límite de potencia y capacidad de los equipos centrales. Otra opción puede ser el uso de una solución híbrida que combine elementos pasivos y elementos activos para el despliegue disminuyendo así las pérdidas de potencia.

- Trabajos futuros pueden considerar modificar la estructura del arreglo MIMO para no tener 2 antenas juntas; estas se separan colocándose una frente a la otra. Con ello se logra tener la zona LTE en la intersección de las coberturas de ambas antenas y ahorrar significativamente el número de antenas aunque también se ve afectado la cobertura final; esta solución es denominada *Smart MIMO*. Otra opción sería el uso de las nuevas antenas duales que ya tienen el arreglo MIMO incorporado en una sola antena.
- Trabajos futuros pueden incluir el uso de redes IMS con VoLTE para cursar las llamadas de voz en LTE y aprovechar las ventajas de estas redes como: interrupción de la conexión IP nula, uso de multimedia, reducción de costos de OPEX y mejor calidad de llamada.
- Diversas soluciones nuevas como las *small cells* y los cables radiantes surgen con mayor fuerza debido a su bajo costo y diversos beneficios. Se recomienda estar actualizados con estas nuevas tecnologías y sus facilidades de despliegue a futuro en el país.

## Bibliografía

- [1] Organización Internet Society.  
n.d "Breve historia de Internet". Tipo: Web. Consulta: 7 de mayo de 2014.  
URL: <<http://www.internetsociety.org/es/breve-historia-de-internet>>
- [2] DAHLMAN, Erik  
2011 *4G LTE / LTE-Advanced for Mobile Broadband*. Primera edición. Oxford:  
Elsevier, Fondo Editorial.
- [3] COX, Christopher  
2012 *An introduction to LTE*. Primera edición. UK: John Wiley & Sons Ltd,  
Fondo Editorial.
- [4] VELARDE, Edgar  
2013 *Introducción a GSM* [diapositivas de clase]. Lima: Autor.  
Consulta: 13 de junio de 2014.
- [5] VELARDE, Edgar  
2013 *Evolución de los sistemas móviles* [diapositivas de clase]. Lima: Autor.  
Consulta: 13 de junio de 2014.
- [6] VELARDE, Edgar  
2013 *Introducción a 3G* [diapositivas de clase]. Lima: Autor.  
Consulta: 11 de junio de 2014.
- [7] VELARDE, Edgar  
2014 *Introducción a LTE* [diapositivas de clase]. Lima: Autor.  
Consulta: 11 de Junio de 2014.
- [8] Organización 3GPP.  
n.d "LTE". Tipo: Web. Consulta: 14 de mayo de 2014.  
URL: <<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>>

- [9] Organización 4G Américas.  
n.d "LTE and LTE-Advanced Deployments". Tipo: Web. Consulta: 22 de mayo de 2015.  
URL: <<http://www.4gamericas.org/en/resources/>>
- [10] Compañía Movistar.  
2014 "4G LTE Vuela". Tipo: Web. Consulta: 1 de mayo de 2014.  
URL: <<http://www.movistar4glte.pe/>>
- [11] CUADROS, Juan Carlos  
2013 "Telefónica y Americatel ganaron la licitación por las dos bandas 4G".  
*El Comercio*. Lima, 22 de julio. Consulta: 19 de mayo de 2014.  
<<http://elcomercio.pe/economia/negocios/ultimo-minuto-telefonica-amicatel-ganaron-dos-bandas-4g-noticia-1607386>>
- [12] Global TD-LTE Initiative.  
2015 "Publications". Tipo: Web. Consulta: 22 de mayo de 2015.  
URL: <<http://www.lte-tdd.org/Resources/pub/>>
- [13] ERICSSON  
2011 *LTE: an introduction. Informe*. Stocolmo: Ericsson AB, 2011. pp. 5.
- [14] VELARDE, Edgar  
2013 *Acceso múltiple OFDMA* [diapositivas de clase]. Lima: Autor.  
Consulta: 1 de junio de 2014.
- [15] ALCATEL-LUCENT  
2009 *ALU LTE Tranning* [diapositivas]. Lima: ALU. Consulta: 28 de agosto.
- [16] ALCATEL-LUCENT  
2009 *LTE Solution* [diapositivas]. Lima: ALU. Consulta: 28 de agosto.

## [17] EXPLOREGATE

2012 "Circuit Switched Fall Back". s/l: Exploregate Ltd.

Consulta: 7 de octubre de 2014

<[http://www.exploregate.com/Sec60Video.aspx?sec\\_id=129#.VFrePRa9\\_jk](http://www.exploregate.com/Sec60Video.aspx?sec_id=129#.VFrePRa9_jk)>

## [18] RADIO FREQUENCY SYSTEMS

2013 *RFS In-Building Solutions* [diapositivas]. Lima: RFS.

Consulta: 14 de noviembre.

## [19] TOLSTRUP, Morten

2011 *Indoor radio planning: a practical guide for GSM, DCS, UMTS, HSPA and LTE*. Segunda edición. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.

## [20] SESIA, Stefania, TOUFIK, Issam y BAKER, Matthew

2011 *LTE-the UMTS Long Term Evolution: from theory to practice*. Segunda edición. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.

## [21] OSIPTEL.

2014 "Indicadores de Servicio de Internet Móvil". Tipo: Web.

Consulta: 17 de mayo de 2014.

URL: <[http://www.osiptel.gob.pe/WebSiteAjax/WebFormGeneral/sector/wfrm\\_Consulta\\_Informacion\\_Estadisticas.aspx?CodInfo=71656&CodSubCat=864&TituloInformacion=6.%20Indicadores%20del%20Servicio%20de%20Internet%20M%C3%B3vil&DescripcionInformacion=>](http://www.osiptel.gob.pe/WebSiteAjax/WebFormGeneral/sector/wfrm_Consulta_Informacion_Estadisticas.aspx?CodInfo=71656&CodSubCat=864&TituloInformacion=6.%20Indicadores%20del%20Servicio%20de%20Internet%20M%C3%B3vil&DescripcionInformacion=>)>

## [22] COMPAÑÍA CLARO

2014 "Cobertura". Tipo: Web. Consulta: 28 de octubre de 2014.

URL: <<http://www.claro.com.pe/wps/portal/pe/sc/personas/movil/4glte#cobertura>>

## [23] COMPAÑÍA ENTEL

2014 "Cobertura". Tipo: Web. Consulta: 28 de octubre de 2014.

URL: <<http://www.entel.pe/personas/ayuda-y-soporte/cobertura/>>

## [24] REAL PLAZA

2015 "Sobre Real Plaza". Tipo: Web. Consulta: 23 de mayo de 2015.

URL :< <http://realplaza.pe/centros-comerciales>>

## [25] REAL PLAZA

2014 "Brochure 2014". Tipo: Web. Consulta: 23 de mayo de 2015.

URL :< <http://realplaza.pe/resources/inversionistas/brochure2014realplaza.pdf>>

## [26] GOOGLE MAPS.

2014 "Real Plaza Santa Clara". Tipo: Web. Consulta: 10 de septiembre de 2014. URL:

<<https://www.google.com.pe/maps/place/Centro+Comercial+RealPlaza+Santa+Clara/@-12.015278,-6.885518,737m/data=!3m1!1e3!4m2!3m1!1s0x9105c3c64461454b:0x7a49c8baa5d4bdc1?hl=es>>

## [27] PERU.COM.

2012 "Real Plaza amplía sus instalaciones en Santa Clara". Tipo: Web. Consulta: 4 de octubre de 2014.

URL: <<http://peru.com/2012/01/09/actualidad/economia-y-finanzas/real-plaza-amplia-sus-instalaciones-santa-clara-noticia-37239>>

## [28] REAL PLAZA.

2012 "Real Plaza Santa Clara". Tipo: Web.

Consulta: 10 de septiembre de 2014. URL: <<http://realplaza.pe/>>

## [29] BOSCH.

2014 "Medidor de distancia a láser DLR130K". Tipo: Web.

Consulta: 5 de octubre de 2014.

URL: <<http://es.boschtools.com/Products/Tools/Pages/BoschProductDetail.aspx?pid=DLR130K>>

## [30] PUCP

2013 *Introducción al planeamiento y optimización RF de una red móvil.*

Material de enseñanza. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú

- [31] ANITE  
2014 *Nemo Handy*. Informe. Finlandia: Anite Finland Ltd, 2014. pp. 2.
- [32] ANITE  
2014 *Nemo Analyze*. Informe. Finlandia: Anite Finland Ltd, 2014. pp. 2.
- [33] ALCATEL-LUCENT  
2013 *Sites 3G registrados*. Documento de trabajo. Lima.
- [34] ALCATEL-LUCENT  
2013 *Memoria descriptiva del proyecto DAS* [diapositivas]. Lima: ALU.  
Consulta: 31 de agosto.
- [35] IBWAVE  
2014 Modelos de propagación. Documentación del Software. Lima.
- [36] INEI  
2013 *Hogares con al menos un miembro que tiene teléfono celular, por años, según ámbitos geográficos*. Informe Estadístico. Lima: INEI, 2013.
- [37] OSIPTEL  
2014 "Líneas en servicio por modalidad y por empresa". Tipo: Web.  
Consulta: 29 de octubre de 2014. URL: <<https://www.osiptel.gob.pe/articulo/25-lineas-en-servicio-por-modalidad-y-por-empresa>>
- [38] OSIPTEL  
2014 "Suscripciones de internet móvil, según modalidad contractual". Tipo: Web.  
Consulta: 29 de octubre de 2014. URL: <<https://www.osiptel.gob.pe/articulo/62-suscripciones-de-internet-movil-segun-modalidad-contrac>>
- [39] COMPAÑÍA MOVISTAR  
2014 "Tarifas". Tipo: Web. Consulta: 29 de octubre de 2014.  
URL: <<http://www.movistar.com.pe/movil/prepago/tarifas-prepago>>
- [40] SUNAT  
2015 "Tipo de Cambio". Tipo: Web. Consulta: 23 de mayo de 2015.  
URL: <<http://www.sunat.gob.pe/cl-at-ittipcam/tcS01Alias>>

## Anexos

### **Anexo 1: Simulaciones para Azotea**

Se presenta las simulaciones de los KPI para la azotea del centro comercial.

### **Anexo 2: Reporte de Campo Electromagnético**

Se presenta el reporte de radiación de las antenas del proyecto; así como, la evaluación de acuerdo a ley de los valores permisibles de radiación en Perú.

### **Anexo 3: Reporte de *Link Budget***

Se presenta el *link Budget* de cada antena de acuerdo al modelo de propagación *Fast Ray Tracing*.

### **Anexo 4: Lista de Materiales**

Se presenta la lista de materiales usados en el proyecto con sus costos.

### **Anexo 5: Equipos**

Se presenta las especificaciones técnicas y físicas de los equipos usados en el diseño

### **Anexo 6: Diagrama Eléctrico**

Se presenta la distribución eléctrica de los principales equipos del proyecto.

### **Anexo 7: Fotografías**

Se presenta las fotografías obtenidas en el TSS; así como, algunos fotomontajes de la ubicación de las antenas.

### **Anexo 8: Mediciones Finales**

Se presenta las mediciones finales post-instalación del centro comercial.