



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA TELECOMUNICACIONES

“ESTUDIO DE PROPAGACIÓN DE SISTEMAS DE TELEFONÍA MÓVIL EN LA BANDA 1900 MHZ (LTE) MEDIANTE MEDICIONES DE CAMPO ELÉCTRICO PARA ESTABLECER UNA RECOMENDACIÓN DE UN MODELO DE PROPAGACIÓN EXISTENTE”

Trabajo de titulación

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERA EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y REDES

AUTORA:

PAOLA MISHÉL BENÍTEZ BASANTES

Riobamba – Ecuador

2022



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA TELECOMUNICACIONES

“ESTUDIO DE PROPAGACIÓN DE SISTEMAS DE TELEFONÍA MÓVIL EN LA BANDA 1900 MHZ (LTE) MEDIANTE MEDICIONES DE CAMPO ELÉCTRICO PARA ESTABLECER UNA RECOMENDACIÓN DE UN MODELO DE PROPAGACIÓN EXISTENTE”

Trabajo de titulación

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERA EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y REDES

AUTORA: PAOLA MISHEL BENÍTEZ BASANTES

DIRECTOR: Ing. PAÚL DAVID MORENO AVILÉS PhD.

Riobamba – Ecuador

2022

© 2022, Paola Mishel Benítez Basantes

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Paola Mishel Benítez Basantes, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 04 de febrero de 2022




Paola Mishel Benítez Basantes
060443216-1

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA TELECOMUNICACIONES

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación; tipo: Proyecto de Investigación, “**ESTUDIO DE PROPAGACIÓN DE SISTEMAS DE TELEFONÍA MÓVIL EN LA BANDA 1900 MHZ (LTE) MEDIANTE MEDICIONES DE CAMPO ELÉCTRICO PARA ESTABLECER UNA RECOMENDACIÓN DE UN MODELO DE PROPAGACIÓN EXISTENTE**”, realizado por la señorita: **PAOLA MISHEL BENÍTEZ BASANTES**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Jefferson Ribadeneira Ramírez PhD. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	 firmado electrónicamente por: JEFFERSON ALEXANDER RIBADENEIRA RAMIREZ	2022-02-04
Ing. Paúl David Moreno Avilés PhD. DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN	PAUL DAVID MORENO AVILES Firmado digitalmente da PAUL DAVID MORENO AVILES DN: cn=PAUL DAVID MORENO AVILES, serialNumber=190721102300, ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION DE INFORMACION, o=SECURITY DATA S.A.2, c=EC Data: 2022.02.04 15:17:15 -05'00'	2022-02-04
Ing. Pedro Severo Infante Moreira MIEMBRO DEL TRIBUNAL	 Firmado electrónicamente por: PEDRO SEVERO INFANTE MOREIRA	2022-02-04

DEDICATORIA

A mis padres, Liliam Basantes y Fabián Benítez quienes son el pilar fundamental en mi vida, que, con sus palabras de aliento, apoyo y cariño me han enseñado a no rendirme y persistir para lograr lo que me proponga. Son mi ejemplo a seguir.

A mi hermana Vanesa por su cariño y por ser una fuente de apoyo y motivación en todo el transcurso de mi vida universitaria.

Paola

AGRADECIMIENTO

A mi abuela materna Ana que desde el cielo me ha iluminado en cada paso que he dado no solo en esta etapa universitaria, sino en cada momento de mi vida, gracias por ser mi ángel.

A mi familia por su ayuda. A mis padres y hermana por inculcarme valores como responsabilidad, respeto, perseverancia y superación que fueron de gran ayuda para mi desarrollo como persona universitaria.

A mis amigos por su amistad sincera y su constante apoyo para no desistir en los peores momentos.

A mi alma mater la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por abrirme sus puertas para formarme como profesional y a todos sus docentes que con su experiencia y sabiduría me han proporcionado los conocimientos necesarios para desenvolverme en la vida profesional.

A mi tutor el Ing. David Moreno PhD por apoyarme con sus conocimientos, su guía, sus consejos y paciencia en el desarrollo de este proyecto de tesis.

Paola

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS	xv
RESUMEN	xvi
ABSTRACT.....	xvii
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO	6
1.1. Radiocomunicaciones	6
<i>1.1.1. Espectro radioeléctrico</i>	<i>6</i>
<i>1.1.2. Servicios de radiocomunicación</i>	<i>7</i>
<i>1.1.3. Modos de explotación</i>	<i>7</i>
1.2. Propagación radioeléctrica.....	7
<i>1.2.1. Mecanismos de propagación.....</i>	<i>7</i>
<i>1.2.1.1. Onda de superficie</i>	<i>7</i>
<i>1.2.1.2. Onda ionosférica.....</i>	<i>8</i>
<i>1.2.1.3. Onda espacial.....</i>	<i>8</i>
<i>1.2.1.4. Onda de dispersión troposférica</i>	<i>9</i>
<i>1.2.2. Fenómenos de propagación.....</i>	<i>9</i>
<i>1.2.2.1. Reflexión</i>	<i>9</i>
<i>1.2.2.2. Refracción.....</i>	<i>9</i>
<i>1.2.2.3. Difracción.....</i>	<i>9</i>
<i>1.2.2.4. Dispersión.....</i>	<i>10</i>
<i>1.2.2.5. Absorción.....</i>	<i>10</i>
<i>1.2.3. Efecto multitrayecto</i>	<i>10</i>

1.2.4.	<i>Desvanecimiento</i>	11
1.2.4.1.	<i>Clasificación de los desvanecimientos</i>	11
1.3.	Modelos de propagación	13
1.3.1.	<i>Clasificación de los modelos de propagación</i>	13
1.3.2.	<i>Modelo Okumura-Hata</i>	13
1.3.3.	<i>Modelo Extendido de Hata (COST-231 Hata)</i>	18
1.3.4.	<i>Modelo Walfisch-Bertoni</i>	18
1.3.5.	<i>Modelo COST 231 Walfisch-Ikegami</i>	22
1.4.	Sistemas de comunicaciones móviles	25
1.4.1.	<i>Elementos de un sistema de comunicaciones móviles</i>	25
1.4.1.1.	<i>Estaciones Fijas</i>	26
1.4.1.2.	<i>Estaciones Móviles</i>	26
1.4.1.3.	<i>Equipos de control</i>	26
1.4.2.	<i>Servicios de los sistemas de comunicaciones móviles</i>	26
1.4.2.1.	<i>Redes Móviles Privadas</i>	27
1.4.2.2.	<i>Redes Móviles Públicas</i>	27
1.4.2.3.	<i>Telefonía Móvil Terrestre</i>	27
1.4.2.4.	<i>Telefonía Móvil por Satélite</i>	27
1.4.3.	<i>Tecnologías móviles</i>	27
1.4.3.1.	<i>Primera generación 1G</i>	27
1.4.3.2.	<i>Segunda generación 2G</i>	28
1.4.3.3.	<i>Tercera generación 3G</i>	28
1.4.3.4.	<i>Cuarta generación 4G</i>	28
1.4.3.5.	<i>Quinta generación 5G</i>	28
1.5.	LTE	29
1.5.1.	<i>Características</i>	29
1.5.2.	<i>Arquitectura LTE</i>	30
1.5.2.1.	<i>Equipo de Usuario</i>	31
1.5.2.2.	<i>Red de acceso: E-UTRAN</i>	31

1.5.2.3.	<i>Red Core: EPC</i>	31
1.5.2.4.	<i>Servicios</i>	31
1.6.	Telefonía Móvil en Ecuador	32
1.6.1.	<i>Asignación de Espectro SMA</i>	32
1.6.2.	<i>Radiobases</i>	34
1.7.	MATLAB	34
1.8.	Software R	35
1.9.	Trabajos relacionados	35
1.9.1.	<i>Estudio de modelos de propagación en el entorno de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas</i>	35
1.9.2.	<i>Comparación de los modelos de propagación electromagnética implementados en la telefonía móvil</i>	36
1.9.3.	<i>Comparación de modelos de radiopropagación en el área suburbana de la ciudad de Barranquilla</i>	36
1.9.4.	<i>Determinación de Modelos de Propagación ajustados a Zonas Representativas de la Ciudad de Cuenca en base a mediciones reales</i>	37

CAPITULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO	38
2.1.	Introducción	38
2.2.	Metodología utilizada	38
2.3.	Procedimiento para la elección de estaciones base	39
2.3.1.	<i>Ubicación radiobases</i>	39
2.3.2.	<i>Radio bases seleccionadas</i>	40
2.4.	Ubicación de los puntos de mediciones	41
2.5.	Equipos utilizados en las mediciones	44
2.5.1.	<i>Medidor Narda SRM-3006</i>	44
2.5.1.1.	<i>Partes del equipo</i>	45
2.5.1.2.	<i>Antenas</i>	45
2.5.2.	<i>Spectra Precision Mobile Mapper 50</i>	46
2.6.	Campaña de mediciones	46

2.6.1.	Configuración del equipo Narda SRM-3006.....	47
2.6.1.1.	Modo analizador de espectro.....	48
2.6.2.	Campo eléctrico medido.....	49
2.6.2.1.	RB1.....	49
2.6.2.2.	RB2.....	53
2.7.	Cálculo teórico de las pérdidas de propagación.....	56
2.7.1.	Modelo COST-231 Hata.....	56
2.7.2.	Modelo Walfisch-Bertoni.....	58
2.7.3.	Modelo COST-231 Walfisch-Ikegami.....	60
2.8.	Cálculo teórico del campo eléctrico	61

CAPITULO III

3. MARCO DE RESULTADOS.....	63
3.1. Introducción	63
3.2. Pérdidas de propagación	63
3.3. Campo eléctrico.....	66
3.4. Prueba estadística de comparación.....	68
3.5. Recomendación modelo de propagación	70

CONCLUSIONES.....	73
--------------------------	-----------

RECOMENDACIONES.....	74
-----------------------------	-----------

GLOSARIO

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Bandas de frecuencia	6
Tabla 2-1:	Tipos de desvanecimientos	12
Tabla 3-1:	Condiciones de aplicación modelo Okumura-Hata	18
Tabla 4-1:	Condiciones de aplicación modelo Walfisch-Bertoni	21
Tabla 5-1:	Condiciones de aplicación modelo COST 231 Walfisch-Ikegami	25
Tabla 6-1:	Evolución de las tecnologías móviles	29
Tabla 7-1:	Anchos de banda de canal soportados	30
Tabla 8-1:	Descripción general de las operadoras móviles en Ecuador	32
Tabla 1-2:	Radiobases Claro zona centro de la ciudad de Riobamba	40
Tabla 2-2:	Ubicación de los puntos de medición de la radiobase RB1	42
Tabla 3-2:	Ubicación de los puntos de medición de la radiobase RB2	43
Tabla 4-2:	Descripción de las partes del equipo Narda SRM-3006	45
Tabla 5-2:	Tipo de antenas	45
Tabla 6-2:	Canalización en la banda 1900 MHz de CONECEL S.A	46
Tabla 7-2:	Valores de campo eléctrico medidos del primer círculo RB1	50
Tabla 8-2:	Valores de campo eléctrico medidos del segundo círculo RB1	51
Tabla 9-2:	Valores de campo eléctrico medidos del tercer círculo RB1	52
Tabla 10-2:	Valores de campo eléctrico medidos del primer círculo RB2	54
Tabla 11-2:	Valores de campo eléctrico medidos del segundo círculo RB2	55
Tabla 12-2:	Valores de campo eléctrico medidos del tercer círculo RB2	56
Tabla 13-2:	Valores calculados para RB1 con el modelo COST-231 Hata	57
Tabla 14-2:	Valores calculados para RB2 con el modelo COST-231 Hata	58
Tabla 15-2:	Valores calculados para RB1 con el modelo Walfisch-Bertoni	58
Tabla 16-2:	Valores calculados para RB2 con el modelo Walfisch-Bertoni	59
Tabla 17-2:	Valores calculados para RB1 con el modelo COST-231 Walfisch-Ikegami	60
Tabla 18-2:	Valores calculados para RB2 con el modelo COST-231 Walfisch-Ikegami	61
Tabla 1-3:	Pérdidas básicas de propagación en los puntos de la radio base RB1	63

Tabla 2-3:	Pérdidas básicas de propagación en los puntos de la radio base RB2.....	64
Tabla 3-3:	Campo eléctrico en los puntos de la radio base RB1.....	66
Tabla 4-3:	Campo eléctrico en los puntos de la radio base RB2.....	67
Tabla 5-3:	Valores RMSE de cada modelo de propagación en RB1 y RB2	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Propagación por onda de superficie.....	8
Figura 2-1:	Propagación por onda ionosférica	8
Figura 3-1:	Propagación por onda ionosférica	9
Figura 4-1:	Mecanismos de propagación	10
Figura 5-1:	Efecto multitrayecto	11
Figura 6-1:	Desvanecimiento en la potencia recibida.....	11
Figura 7-1:	Señal recibida	12
Figura 8-1:	Intensidad de campo para la banda 450 MHz.....	13
Figura 9-1:	Intensidad de campo para la banda 900 MHz.....	14
Figura 10-1:	Intensidad de campo para una potencia radiada aparente de 1KW (450 MHz).....	16
Figura 11-1:	Intensidad de campo para una potencia radiada aparente de 1KW (900 MHz).....	17
Figura 12-1:	Geometría de difracción múltiple	19
Figura 13-1:	Trayectos por propagación de edificios	19
Figura 14-1:	Geometría del modelo Walfisch-Bertoni.....	20
Figura 15-1:	Parámetros considerados en el modelo COST-231 Walfisch-Ikegami	22
Figura 16-1:	Ángulo φ en el modelo COST-231 Walfisch-Ikegami.....	23
Figura 17-1:	Arquitectura LTE	30
Figura 18-1:	Canalización y asignación de bandas de frecuencia SMA	33
Figura 19-1:	Ancho de banda concesionado	33
Figura 1-2:	Esquema del desarrollo del proyecto	38
Figura 2-2:	Ubicación de las radiobases de Claro en la zona centro de la ciudad de Riobamba	39
Figura 3-2:	Radiobases seleccionadas: (a) RB1 y (b) RB2.....	41
Figura 4-2:	Puntos de medición de la radiobase RB1.....	41
Figura 5-2:	Puntos de medición de la radiobase RB1.....	43
Figura 6-2:	Equipo Narda SRM-3006.....	44

Figura 7-2:	Equipo Narda SRM-3006.....	45
Figura 8-2:	Equipo Spectra Precision.....	46
Figura 9-2:	Espectro Downlink.....	47
Figura 10-2:	Configuración del servicio	48
Figura 11-2:	Modo analizador de espectro.....	48
Figura 12-2:	Puntos del primer círculo RB1: (a) 13, (b) 19, (c) 14 y (d) 8.....	50
Figura 13-2:	Puntos del segundo círculo RB1: (a) 9, (b) 4, (c) 18 y (d) 20	51
Figura 14-2:	Puntos del tercer círculo RB1: (a) 11, (b) 25, (c) 7 y (d) 21	52
Figura 15-2:	Puntos del primer círculo RB2: (a) 14, (b) 15, (c) 7 y (d) 8.....	53
Figura 16-2:	Puntos del segundo círculo RB2: (a) 18, (b) 20, (c) 6 y (d) 10	54
Figura 17-2:	Puntos del tercer círculo RB2: (a) 4, (b) 2, (c) 12 y (d) 17	55
Figura 1-3:	RMSE entre el valor medido y estimado en RB1 Y RB2	69
Figura 2-3:	Entorno de la radio base RB1	70
Figura 3-3:	Entorno de la radio base RB2	71

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-1:	Radiobases instaladas por cada tecnología.....	34
Gráfico 1-3:	Pérdidas de cada modelo de propagación en los puntos de RB1	64
Gráfico 2-3:	Pérdidas de cada modelo de propagación en los puntos de RB2	65
Gráfico 3-3:	Campo eléctrico de cada modelo de propagación teórico y medido en los puntos de RB1.....	67
Gráfico 4-3:	Campo eléctrico de cada modelo de propagación teórico y medido en los puntos de RB2.....	68

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: BANDAS DE FRECUENCIAS DE OPERACIÓN LTE

ANEXO B: FOTOGRAFÍAS DE TOMA DE DATOS CON SPECTRA PRECISION MOBILE
MAPPER 50

ANEXO C: PLANO DE LA CIUDAD DE RIOBAMBA EN AUTOCAD

ANEXO D: CÓDIGO DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN EN MATLAB

ANEXO E: PARÁMETROS UTILIZADOS CON LA APLICACIÓN G-NETTRACK LITE

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de titulación fue el estudio de propagación de sistemas de Telefonía Móvil en la banda 1900 MHz de la tecnología LTE mediante mediciones de campo eléctrico para establecer una recomendación de un modelo de propagación existente en la zona centro de la ciudad de Riobamba. Se partió por el análisis de tres modelos de propagación más utilizados en servicios móviles: COST-231 Hata, Walfisch-Bertoni y COST-231 Walfisch-Ikegami con el fin de establecer entornos estratégicos para la evaluación de estos modelos, así se seleccionaron dos radio bases; la primera RB1 ubicada en pleno centro histórico perteneciente a un entorno urbano de construcción alta y la segunda RB2 ubicada en una zona alta representando a un entorno urbano de construcción media. Las mediciones de campo eléctrico se realizaron con el equipo Narda SRM-3006 alrededor de las dos radio bases teniendo un total de 48 puntos de medición cuyas ubicaciones se obtuvieron con el equipo Spectra Precision Mobile Mapper 50, asimismo se realizó un levantamiento de información necesaria para los modelos como alturas de antenas, alturas promedio de edificios, entre otros, con dicha información se realizó el cálculo teórico de las pérdidas básicas de propagación para estimar el valor de campo eléctrico con cada modelo utilizando el software Matlab. Para evaluar la efectividad de los modelos se realizó una comparación de los valores teóricos con los valores medidos mediante la prueba estadística RMSE, donde el modelo COST-231 Walfisch-Ikegami presentó los menores valores en las zonas analizadas. Se concluyó que dicho modelo es el que mejor aproximación tiene en los entornos estudiados de la zona centro de la ciudad, se recomienda ampliar la campaña de mediciones para tener en cuenta otros tipos de entornos incluso otros modelos de propagación que consideran más parámetros de análisis.

Palabras clave: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA> <MODELOS DE PROPAGACIÓN> <TELEFONÍA MÓVIL> <CAMPO ELÉCTRICO> <MATLAB (SOFTWARE)> <RIOBAMBA (CANTÓN)>.



2243-DBRA-UPT-2021

2021-12-13

ABSTRACT

The objective of the present titration work was the study of propagation of systems of Mobile Telephony in the 1900 MHz band of LTE technology, through field measurements to establish a recommendation of an existing propagation model in the area center of Riobamba. It was based on the analysis of three more propagation models used in mobile services: COST-231 Hata, Walfisch-Bertoni and COST-231 Walfisch-Ikegami in order to establish strategic environments for the evaluation of these models, so selected two radio bases; the first RB1 located in the historic center belonging to an urban environment of high construction and the second RB2 located in a high area representing to an urban environment of medium construction. Electric field measurements were made with the Narda SRM-3006 team around the two radio bases having a total of 48 points of measurement whose locations were obtained with the Spectra Precision Mobile Mapper 50 equipment, likewise, a survey of information necessary for the models was carried out, such as heights of antennas, average heights of buildings, among others; with this information the calculation was made theoretical basic propagation losses to estimate the electric field value with each model using Matlab software. To evaluate the effectiveness of the models, a comparison of theoretical values with values measured by statistical test RMSE, where the COST-231 Walfisch-Ikegami model presented the lowest values in the analyzed zones. It was concluded that this model is the one that has the best approximation in the environments studied in the downtown area of the city, it is recommended to expand the measurement campaign to consider other types of environments including other propagation models that they consider more parameters of analysis.

Keywords: <TECHNOLOGY AND ENGINEERING SCIENCES> <MODELS OF PROPAGATION> <MOBILE TELEPHONY> <ELECTRIC FIELD> <MATLAB (SOFTWARE)> <RIOBAMBA (CANTON)>.



firmado electrónicamente por:
**WILSON GONZALO
ROJAS YUMISACA**

Lic. Wilson G. Rojas

NOMBRE Y FIRMA PROFESOR

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de comunicaciones móviles juegan un papel importante en el desarrollo de actividades cotidianas de la población por lo que han ido evolucionando en las últimas décadas, las últimas tecnologías ofrecen velocidades de descarga altas permitiendo una gran capacidad en el uso de datos. En Ecuador según los registros administrativos de ARCOTEL hasta abril de 2021 la tecnología LTE es la que mayor incidencia tiene en el país con 7.810.764 líneas activas.

La telefonía móvil al ser un servicio con gran participación en el mercado hace que las empresas que lo ofertan se encuentren en constante competencia, por lo tanto, la necesidad de una red robusta que permita cubrir la demanda y garantizar la calidad del servicio se vuelve de suma importancia. En la planificación de red móvil un parámetro importante que se considera es la pérdida de propagación de la señal debido al entorno, para ello se utilizan modelos de propagación que permiten estimar dicha pérdida, entre más exacto sean los resultados se podrá brindar un servicio más óptimo.

Los modelos de propagación han sido desarrollados tomando en cuenta inicialmente características como la frecuencia, altura de las antenas transmisoras y receptoras y entornos representativos de propagación, sin embargo, no resulta conveniente para aplicaciones de particularidades diferentes. Por tal motivo se han desplegado modelos que consideran parámetros como alturas y separación de edificios, separación y orientación de las calles así también mecanismos de propagación como el espacio libre, difracción, reflexión, etc., que no solo permiten la predicción de las pérdidas mencionadas si no también la intensidad de campo eléctrico.

La finalidad del presente trabajo de titulación es recomendar un modelo de propagación existente para sistemas de Telefonía Móvil en la banda 1900 MHz de LTE para la zona centro de la ciudad de Riobamba, para ello se estudian 3 modelos de propagación más utilizados en la telefonía móvil que son: COST-231 Hata, Walfisch-Bertoni y COST 231 Walfisch-Ikegami mediante una comparación entre intensidad campo eléctrico medido e intensidad de campo eléctrico teórico obtenido con las pérdidas de propagación de cada modelo. Las mediciones se realizaron alrededor de dos radio bases con entornos diferentes ubicadas en la zona centro de la ciudad.

ANTECEDENTES

En la actualidad la demanda de mejores servicios en las redes es la que domina el mercado de las comunicaciones móviles, por lo que las empresas que ofertan este servicio se encuentran en constante competencia. En la planificación del sistema de comunicaciones móviles es importante utilizar modelos de propagación que ayuden a determinar la atenuación que sufrirá la señal en el entorno requerido. Entre más exacto sean los resultados de los cálculos de predicción de pérdidas menor será el error que se cometa al momento de realizar las simulaciones para implementar el servicio. (García, 2016, p. 1)

En Latinoamérica se han realizado trabajos sobre el estudio de los modelos de propagación con resultados muy buenos. Pedraza et al. (2010) en su estudio denominado “Estudio de modelos de propagación en el entorno de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas” presentan tres modelos de propagación en entornos urbanos, adaptados al entorno de dicha universidad. En el estudio analizan las pérdidas de propagación de cada uno de los modelos con respecto a la estación base donde concluyen que los modelos Okumura-Hata y Cost 231 tienen la tendencia a parecerse en sus resultados, mientras que el modelo Xia-Bertoni, las pérdidas tienden a ser más bajas y alejadas de los otros dos modelos debido a efectos de la propagación de la señal.

En Venezuela, Beltrán et al. (2012) desarrollaron un estudio donde comparan los modelos implementados con mayor frecuencia en la predicción de la pérdida por propagación de la telefonía móvil, para la banda de 900 MHz en ambientes rurales y macro-células. Los resultados que obtuvieron indicaron que el modelo que mejor estima su predicción es el de Espacio Libre, seguido por el Okumura-Hata.

En Colombia, Barrios et al. (2018) evaluaron los modelos de propagación COST-231 HATA, Walfisch Ikegami e Interino de la Universidad de Stanford para un escenario suburbano en la banda de 1900 MHz. Como método de evaluación utilizan el cálculo de error de predicción y relativo de cada modelo respecto a las mediciones. Los resultados obtenidos muestran que el modelo Interino de la Universidad de Stanford presentó niveles de error más bajos con relación a los obtenidos con el modelo COST-231 HATA y el Walfisch Ikegami.

Por otra parte, en Ecuador, Gallardo y Jaramillo (2015) determinaron modelos de propagación ajustados a zonas representativas de la ciudad de Cuenca en base a mediciones reales, de estas mediciones obtuvieron la intensidad de señal en función de la distancia a las radio bases, las

compararon con la predicción de los modelos de propagación que se seleccionaron donde destacó el modelo de Xia - Bertoni.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Se puede estudiar la propagación de sistemas de Telefonía Móvil en la banda 1900 MHz (LTE) mediante mediciones de campo eléctrico para establecer una recomendación de un modelo de propagación existente en la zona centro de la ciudad de Riobamba?

SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cuáles son los trabajos relacionados al tema de investigación preexistentes?

¿Cuáles son las características importantes de cada modelo de propagación para comunicaciones móviles?

¿Se puede identificar 2 estaciones base en la zona centro de la ciudad Riobamba y establecer lugares estratégicos para la medición de intensidad de campo eléctrico con el equipo NARDA SRM-3006?

¿Es posible realizar el cálculo teórico de las pérdidas básicas de propagación de cada modelo de propagación utilizando el software Matlab para estimar el valor de campo eléctrico esperado?

¿Cómo realizar una validación estadística de los resultados teóricos con las mediciones obtenidas de cada modelo de propagación?

¿Cuál es el modelo de propagación que mejor se ajusta a las condiciones del entorno de la zona centro de la ciudad de Riobamba para el servicio de Telefonía Móvil en la banda 1900 MHz LTE?

JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

En la actualidad los servicios de telefonía móvil deben ser capaces de poder establecer una infraestructura de comunicación que cumpla con los parámetros de calidad de comunicación, más aún cuando este servicio tiene un gran impacto en el mercado del país. Según el estudio realizado por Rivera et al. (2020: p. 3) denominado “Estado actual de las telecomunicaciones y la banda ancha en Ecuador”, los índices de penetración de los servicios móviles y de internet en el país han tenido un crecimiento significativo de los indicadores entre 2015 y 2018. La cobertura de servicio móvil es de alrededor de 94% a nivel poblacional y a fines de 2017 registraba una demanda de 36.15%. Según los registros administrativos de ARCOTEL a abril de 2021 la tecnología LTE es la que mayor incidencia tiene en el país.

Al momento de hacer una planificación de sistemas de comunicaciones móviles, los modelos de propagación juegan un papel importante para la estimación de pérdidas de trayectoria. Por lo que es necesario que los resultados sean lo más exacto posibles para poder ofrecer un mejor servicio.

Existen varios modelos de propagación que se pueden aplicar en Telefonía Móvil, sin embargo, no se ha establecido una relación directa de estos modelos con las condiciones propias del entorno de la zona centro de la ciudad de Riobamba, por tal motivo fue necesario realizar un estudio que permita recomendar el mejor modelo de propagación que se ajuste a las condiciones específicas de dicho entorno en la banda de 1900 MHz de LTE.

JUSTIFICACIÓN APLICATIVA

Para el desarrollo del proyecto se empezará por el análisis de las características importantes de 3 modelos de propagación, esto con el fin de poder determinar lugares estratégicos en la zona centro de la ciudad de Riobamba para realizar las mediciones de la intensidad de campo eléctrico. Se usará el equipo de medición NARDA SRM-3006. Como transmisores de referencia se tomarán 2 estaciones bases de Telefonía Móvil que serán elegidas de acuerdo a una revisión previa de las estaciones disponibles en la zona centro de la ciudad que trabajen en la banda de 1900 MHz de LTE.

Se debe elegir zonas de cobertura que representen las condiciones de propagación típicas de la región (urbana/suburbana, densidad de la vegetación, irregularidades del terreno, etc.) En cada una de las zonas de cobertura seleccionadas, es conveniente hacer mediciones de terreno con al menos 15-20 distancias diferentes con respecto al transmisor. Para cada una de estas distancias, la muestra de mediciones debe incluir al menos 5-10 mediciones, tomadas de preferencia en direcciones diferentes con respecto al transmisor, para asegurar la correcta evaluación de la intensidad de campo mediana. (UIT, 2002). La antena del receptor de prueba se montará a una altura apropiada, que para los servicios móviles terrestres es de 1,5 m. Estas son recomendaciones que proporciona la UIT para la realización de mediciones de intensidad de campo eléctrico, sin embargo, en el desarrollo del proyecto se especificarán el número exacto de las mediciones y las condiciones de estas. Es importante que al momento de ir realizando las mediciones se documente datos importantes como la distancia al transmisor, ubicación de las antenas, alturas de las antenas, entre otros.

Una vez realizadas las mediciones y teniendo los datos necesarios, se procederá a realizar el cálculo teórico de las pérdidas básicas de propagación con las ecuaciones de los modelos de propagación mediante el software Matlab para estimar el valor de campo eléctrico esperado. Con

esta información se realizará una comparación de los resultados teóricos con las mediciones obtenidas para validar estadísticamente los resultados obtenidos con cada modelo de propagación, la UIT menciona que “el funcionamiento de los modelos se puede evaluar con más formalidad y los modelos se pueden comparar entre sí mediante la aplicación de mediciones y análisis estadísticos” (UIT, 2002, p. 30), para ello se hará uso de un software estadístico. Finalmente, se recomendará cuál es el modelo de propagación más adecuado para el servicio de Telefonía Móvil en la banda de 1900 MHz LTE en la zona centro de la ciudad de Riobamba.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Estudiar la propagación de sistemas de Telefonía Móvil en la banda 1900 MHz (LTE) mediante mediciones de campo eléctrico para establecer una recomendación de un modelo de propagación existente en la zona centro de la ciudad de Riobamba.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar el estado del arte de trabajos relacionados al tema de investigación preexistentes
- Establecer las características importantes de cada modelo de propagación para comunicaciones móviles
- Identificar 2 estaciones base en la zona centro de la ciudad de Riobamba y establecer lugares estratégicos para la medición de intensidad de campo eléctrico con el equipo NARDA SRM-3006
- Realizar el cálculo teórico de las pérdidas básicas de propagación de cada modelo de propagación utilizando el software Matlab para estimar el valor de campo eléctrico esperado
- Realizar una validación estadística de los resultados teóricos con las mediciones obtenidas de cada modelo de propagación
- Establecer el modelo de propagación que mejor se ajusta a las condiciones del entorno de la zona centro de la ciudad de Riobamba para el servicio de Telefonía Móvil en la banda 1900 MHz de LTE

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Radiocomunicaciones

Las radiocomunicaciones son comunicaciones transmitidas por radio, es decir, transmisión por medio de las ondas radioeléctricas propagadas en el aire. El comportamiento de las ondas dependerá de las propiedades de cada banda de frecuencia del espectro radioeléctrico. (Ramírez Luz, 2015, p.2)

1.1.1. Espectro radioeléctrico

El espectro de frecuencias radioeléctricas es un recurso natural finito solicitado por los servicios de radiocomunicaciones que hacen uso de este recurso. Es un bien público y por tanto debe estar regularizado por las autoridades gubernamentales. La porción del espectro radioeléctrico está dividida por bloques llamados bandas de frecuencias que son atribuidas a los servicios de radiocomunicaciones según su necesidad (Gutiérrez, 2020, p. 23). La tabla 1-1 indica la división de las bandas de frecuencias y su principal utilización.

Tabla 1-1: Bandas de frecuencia

Banda	Denominación	Rango de frecuencia	Principal Utilización
VLF	Ondas megamétricas	3 – 30 KHz	Ayuda a la navegación Submarinos
LF	Ondas kilométricas	30 – 300 KHz	Ayuda a la navegación
MF	Ondas hectométricas	300 – 3000 KHz	Radiodifusión AM, Servicios Fijo-Móvil
HF	Ondas decamétricas	3 – 30 MHz	Radiodifusión AM, Servicios Fijo-Móvil, Radioaficionados, Móvil marítimo, Móvil aeronáutico
VHF	Ondas métricas	30 – 300 MHz	Monocanales, Servicios Fijo-Móvil, Radiodifusión FM – TV, Radioaficionados, Buscapersonas
UHF	Ondas decimétricas	300 – 3000 MHz	Telefonía celular, Sistemas multicanales, Trunking, TV, Buscapersonas, Microondas
SHF	Ondas centimétricas	3 – 30 GHz	Enlaces satelitales, Microondas
EHF	Ondas milimétricas	30 – 300 GHz	

Fuente: Gutiérrez, 2020, p 23.

Realizado por: Benítez, P. 2021.

1.1.2. Servicios de radiocomunicación

Los servicios de radiocomunicaciones pueden clasificarse según varios criterios, a continuación, se presentan los servicios según el tipo de radiocomunicación:

- Servicio fijo: Servicio de radiocomunicación que se efectúa entre puntos fijos, establece un enlace punto a punto.
- Servicio entre satélites: Servicio de radiocomunicación que se realiza entre satélites artificiales.
- Servicio de radiodifusión: Servicio de radiocomunicación cuyas transmisiones son recibidas por el público en general. Dentro de este servicio se encuentran la radiodifusión sonora y televisión.
- Servicio móvil: Servicio de radiocomunicación que se realiza entre una estación fija y una o más móviles. En su clasificación más común se encuentran los servicios móviles terrestres, marítimos y aeronáuticos.

1.1.3. Modos de explotación

Los modos de explotación son la forma en que se produce la comunicación y son los siguientes:

- Explotación simplex: La comunicación se da en un solo sentido como ocurre en la televisión analógica o la radio. Se realiza con una o dos frecuencias.
- Explotación dúplex: La comunicación es simultánea, se puede transmitir y recibir en los dos sentidos de un canal de telecomunicación. Utiliza por lo general dos frecuencias.
- Explotación semidúplex: En un extremo de la comunicación es explotación simplex y en el otro una explotación dúplex. Al igual que la explotación dúplex, utiliza dos frecuencias. (ITU, 2016, p. 12)

1.2. Propagación radioeléctrica

Una onda radioeléctrica no guiada que se propaga entre el transmisor y receptor se ve afectada por las características del medio como la atmósfera o condiciones geográficas. Su propagación depende principalmente de su frecuencia y el terreno.

1.2.1. Mecanismos de propagación

1.2.1.1. Onda de superficie

Para frecuencias inferiores a 30 MHz la onda de superficie o terrestre es la dominante, la señal viaja siguiendo el perfil de la Tierra como se muestra en la figura 1-1, por lo que no es necesario

la línea de vista. Se considera de largo alcance dependiendo de la potencia que se emplee y no suele haber interrupción en su propagación.

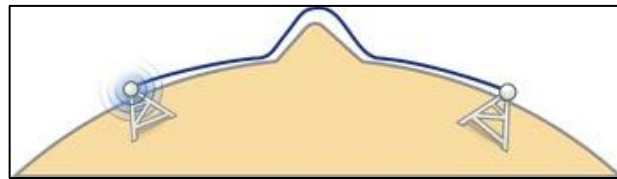


Figura 1-1: Propagación por onda de superficie

Fuente: <https://www.analfatecnicos.net/fotos/43.jpg>

1.2.1.2. Onda ionosférica

Para frecuencias en el rango de 3 a 30 MHz. Esta propagación se da gracias a la reflexión de la onda en la Ionosfera como se muestra en la figura 2-1 y se logran grandes alcances, aunque puede provocar inestabilidad debido a que la existencia de la capa de la Ionosfera depende de características que varían según la temperatura, radiación solar, hora del día, entre otras.

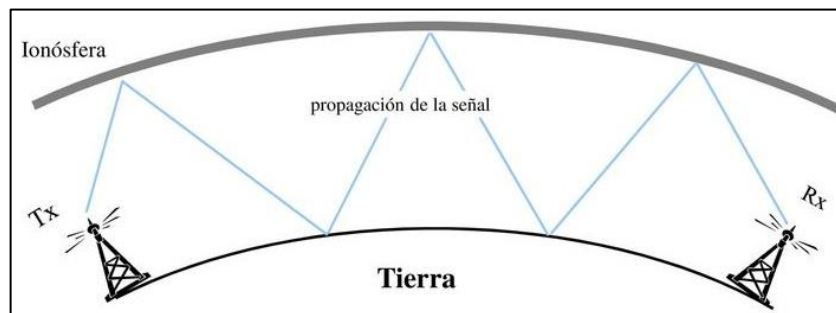


Figura 2-1: Propagación por onda ionosférica

Fuente: https://docplayer.es/docs-images/43/12568808/images/page_7.jpg

1.2.1.3. Onda espacial

Para frecuencias por encima de los 30 MHz. Utiliza las capas bajas de la atmósfera para su propagación y necesita línea de vista directa entre el transmisor y el receptor. Se distinguen tres componentes importantes mostradas en la figura 3-1 y son las siguientes:

- Onda directa: Viaja desde el transmisor hacia el receptor y da la impresión de una línea recta similar a la que tendría la visión del humano. (Gómez et al., 2019, p. 59)
- Onda reflejada: Viaja desde el transmisor hacia el receptor mediante reflexiones producidas en el suelo.
- Onda de Multitrayecto: Llega al receptor gracias a reflexiones ocurridas en la troposfera.

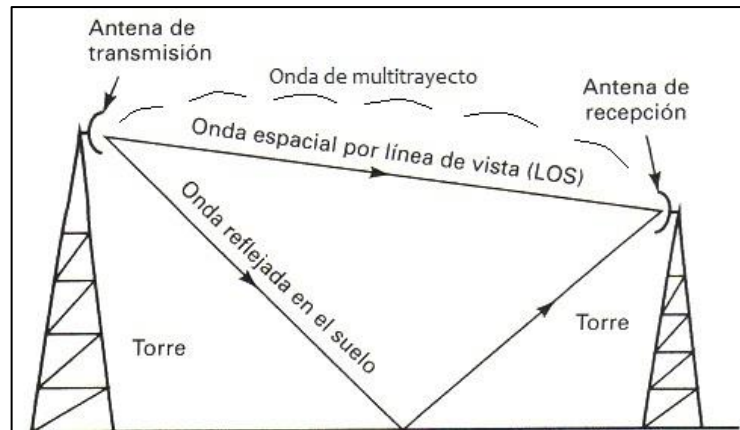


Figura 3-1: Propagación por onda ionosférica

Fuente: Tomasi, 2003, p.361

Realizado por: Benítez, P. 2021

1.2.1.4. Onda de dispersión troposférica

Esta propagación es causada por discontinuidades en la troposfera, provoca un alcance más allá del horizonte óptico sin embargo no es tan estable ya que tiene pérdidas muy elevadas y está sujeto a desvanecimientos. (Hernando Rábanos, 2008, p. 38)

1.2.2. Fenómenos de propagación

1.2.2.1. Reflexión

Este fenómeno se produce cuando la onda incidente choca con una frontera entre dos medios y la potencia de la onda no se transfiere al otro material. Cuando las ondas no penetran el segundo medio se reflejan. (Tomasi, 2003, p. 354)

1.2.2.2. Refracción

La refracción se produce cuando la onda pasa de un medio a otro medio de diferente densidad, ocurre un cambio de dirección de la onda. La refracción depende del índice de refracción que es la relación entre la velocidad de propagación de la luz en el espacio libre y la velocidad de la luz en un determinado material. (Tomasi, 2003, pp. 353-354)

1.2.2.3. Difracción

La difracción sucede cuando la onda al pasar cerca de un objeto se curva alrededor de este. Esto permite que las ondas de radio se propaguen entorno a esquinas y es resultado de fenómenos como bordes de las edificaciones, superficie irregular del terreno, entre otros. (Gómez et al., 2019, p. 67; Tomasi, 2003, p. 357)

1.2.2.4. *Dispersión*

Este fenómeno de propagación también conocido como Scattering ocurre cuando una onda incide sobre una superficie rugosa o áspera, superficies como postes, árboles, entre otros; lo que ocasiona que dicha onda se disperse en todas las direcciones. (Rappaport, 2002; citado en Barrios, 2015, pp. 29-30)

1.2.2.5. *Absorción*

La atmósfera terrestre está formada por átomos, gases, partículas sólidas y líquidas. Los componentes de estos elementos pueden provocar una absorción de una onda electromagnética, debido a que al propagarse por la atmósfera terrestre la onda transfiere energía a los elementos y una vez la energía es absorbida se disipa para siempre ocasionando atenuación. Este fenómeno tiene incidencia significativa en las frecuencias por encima a los 10 GHz. (Tomasi, 2003, p. 352)

La propagación de la onda depende del medio de transmisión, eso implica que influirán en ella características como el tipo de terreno, el tipo de superficie de objetos, incluso de condiciones atmosféricas que se han tratado anteriormente y se muestran en la figura 4-1.

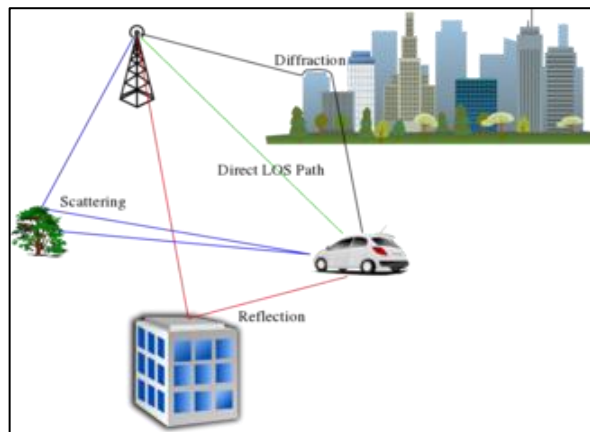


Figura 4-1: Mecanismos de propagación

Fuente: <https://images.vectorhq.com/images/previews/df1/multipath-propagation-94153.png>

1.2.3. *Efecto multitrayecto*

Debido a los fenómenos de propagación de la onda mencionados, la señal tiene varios trayectos como se muestra en la figura 5-1 causando que al receptor lleguen varias contribuciones de la señal original. Estas contribuciones o réplicas se dan debido a los rebotes en obstáculos que se encuentre en el medio de transmisión, llegando al receptor por varios caminos de diferente longitud, con diferentes ángulos de incidencia, desfases y retardos de tiempo. En el receptor estas contribuciones se suman y pueden tener un efecto constructivo o destructivo de la señal recogida. (García et al., 2014a: p. 25)

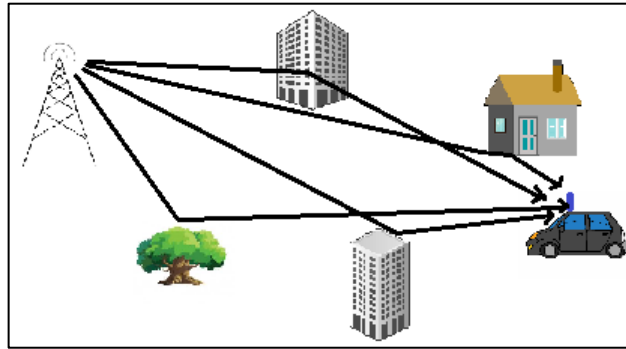


Figura 5-1: Efecto multitrayecto

Realizado por: Benítez, P. 2021

1.2.4. Desvanecimiento

El desvanecimiento es la atenuación de la potencia de la señal recibida con relación a su valor nominal, es decir, al valor medio de la potencia recibida como se ilustra en la figura 6-1. Esta atenuación se debe a los fenómenos que alteran a la propagación de la onda como la reflexión, refracción, difracción entre otras que se trataron en este trabajo anteriormente.

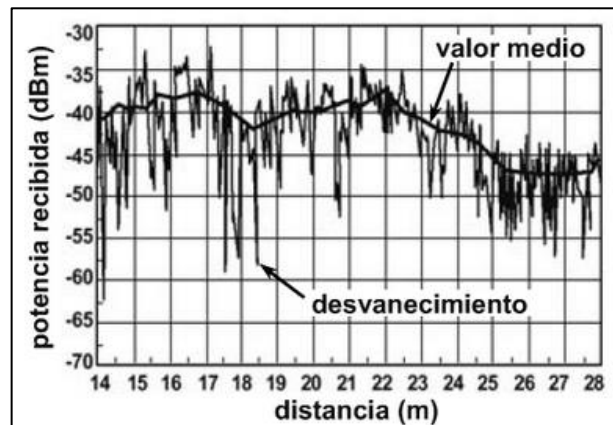


Figura 6-1: Desvanecimiento en la potencia recibida

Fuente: Ramos, 2008, p. 253

1.2.4.1. Clasificación de los desvanecimientos

Los desvanecimientos pueden clasificarse según varios criterios. Según la profundidad pueden ser profundos de 3dB aproximadamente y muy profundos cuando son mayores a 20 dB, en cuanto a la duración se tienen desvanecimientos que pueden tener corta o larga duración temporal.

Un desvanecimiento puede afectar a todas las componentes del espectro de la señal en ese caso se considera plano, así también puede ser selectivo en frecuencia provocando distorsión en la señal. Según la distribución probabilística el desvanecimiento puede ser Gaussiano, Rayleigh o Rice. Según el mecanismo existen dos casos, uno cuando se produce variaciones del índice de

refracción troposférico provocando que el margen libre de obstáculos se reduzca conocido como desvanecimiento Factor k, y el otro cuando debido a múltiples trayectos de propagación entre el transmisor y receptor se producen interferencias conocido como desvanecimiento multitrayecto y se trata con mayor profundidad a continuación. Finalmente, un desvanecimiento de acuerdo con su dependencia temporal puede afectar de forma continua o puntual (Ramos, 2008, p. 253). Los tipos de desvanecimientos descritos se resumen en la tabla 2-1.

Tabla 2-1: Tipos de desvanecimientos

Criterio	Tipo de desvanecimiento	
Profundidad	Profundo	Muy profundo
Duración	Lento	Rápido
Espectro	Plano	Selectivo
Mecanismo de producción	Factor k	Multitrayecto
Distribución probabilística	Gaussiano	Rayleigh, Rice
Dependencia temporal	Continuado	Puntual

Fuente: Hernando Rábanos, 2008, p 225.

Realizado por: Benítez, P. 2021.

El desvanecimiento multitrayecto es la atenuación de la señal recibida causada por la presencia de varios trayectos de propagación que se deben a los fenómenos de propagación. La figura 7-1 ilustra la variación temporal de la amplitud de la envolvente de la señal recibida, donde m representa una ley gaussiana de media, r la mediana y η el factor de actividad de multitrayecto que es el porcentaje de tiempo durante el cual el desvanecimiento es de tipo multitrayecto.

El primer tramo representado como $(1-\eta)$ es el centelleo, un desvanecimiento de pequeña intensidad causado por irregularidades en la tropósfera en condiciones normales y el segundo tramo representa η , donde se observa que existe un desvanecimiento multitrayecto. El parámetro η es una variable aleatoria que depende del periodo de observación que suele ser de un mes y de condiciones climáticas, donde se elige el mes más desfavorable. A medio año η es alrededor de la cuarta parte del valor obtenido en dicho mes, esto debido a que climas templados en época de verano la actividad multitrayecto suele durar 3 meses. (Hernando Rábanos, 2008, pp. 226–227)

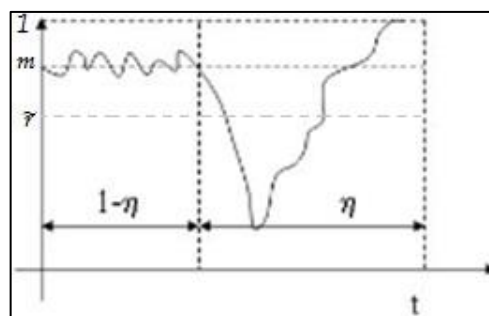


Figura 7-1: Señal recibida

Fuente: Hernando Rábanos, 2008, p. 227

1.3. Modelos de propagación

La presencia de los mecanismos de propagación en el medio de transmisión de una señal afecta a la composición de esta. Resulta complejo poder cuantificar los efectos de cada uno de ellos por lo que los modelos de propagación ayudan a estimar las pérdidas y hacer un dimensionamiento adecuado mediante mediciones realizadas en zonas específicas para los sistemas de comunicaciones radioeléctricos. (Pérez et al., 2007, p. 438)

1.3.1. Clasificación de los modelos de propagación

Los modelos de propagación se clasifican en tres grupos fundamentales y son los siguientes:

- Modelos deterministas: Aquellos que se basan en el cálculo de ecuaciones que miden las pérdidas de propagación, mecanismos de propagación, reflexión entre otros.
- Modelos empíricos: Son aquellos modelos basados en mediciones experimentales.
- Modelos semiempíricos: Se basan en factores con correcciones empíricas y leyes físicas. (Gutiérrez, 2020, p. 57)

1.3.2. Modelo Okumura-Hata

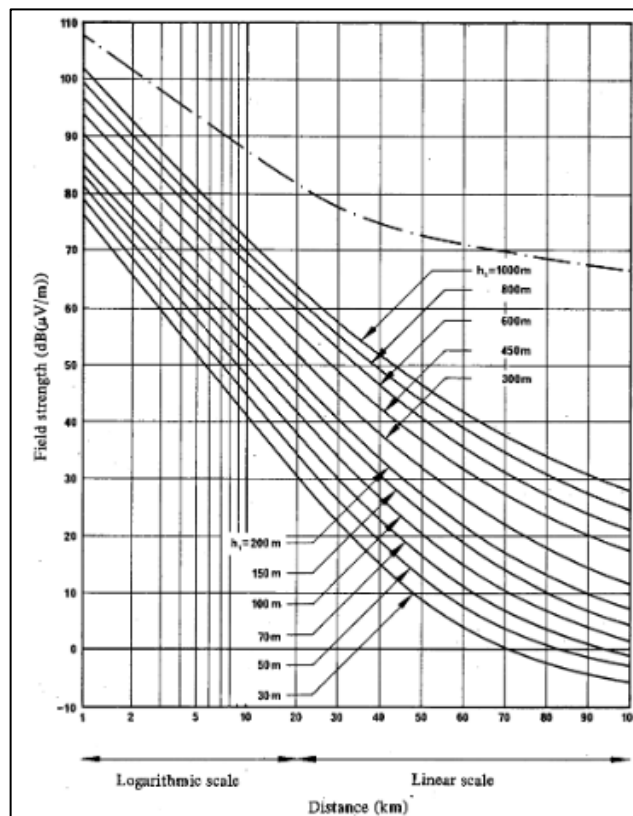


Figura 8-1: Intensidad de campo para la banda 450 MHz

Fuente: ITU, 1986, p. 300

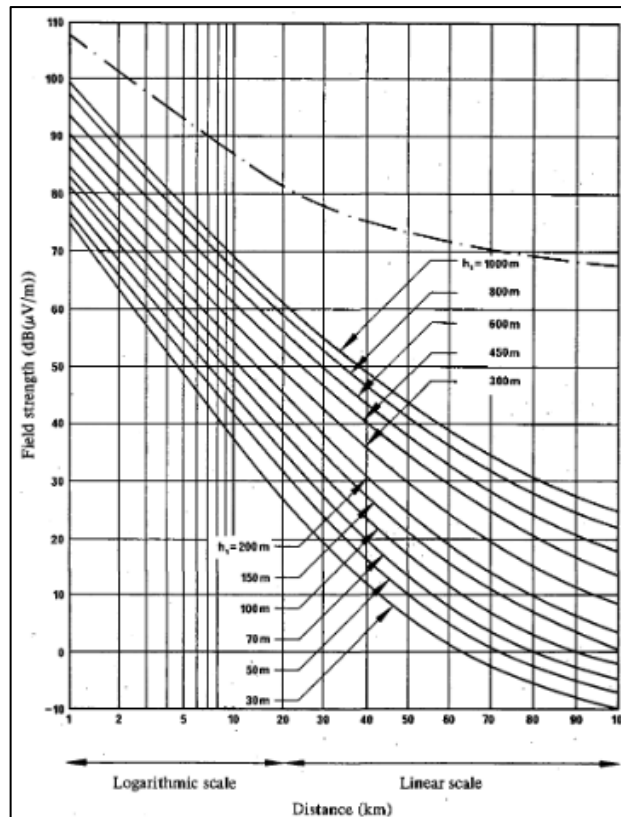


Figura 9-1: Intensidad de campo para la banda 900 MHz

Fuente: ITU, 1986, p. 301

El modelo de Okumura es usado frecuentemente en la planificación de sistemas móviles terrestres, es el resultado de un gran conjunto de mediciones realizadas en entornos urbanos con variedad de vegetación y tipo de terreno a diferentes frecuencias en la ciudad de Tokio, Japón; y fue realizado a principios de la década 1960. Este modelo proporciona curvas de predicción de intensidad de campo en las bandas 100, 450 y 900 MHz. (UIT, 2002, pp. 26-27)

En las figuras 8-1 y 9-1 se muestran las curvas de Okumura para las bandas para 450 y 900 MHz respectivamente, con alturas de las estaciones base entre 30 y 100 m, altura de la antena móvil de 1,5 m, 50% del tiempo, 50% de las ubicaciones y una potencia radiada aparente de 1 KW.

El modelo de Okumura proporciona también correcciones para diferentes tipos de terrenos, grados de rugosidad, pendiente del terreno, caminos sobre tierra o agua, etc., esto hace que la implementación del modelo en una computadora se vuelva difícil (UIT, 2002, p. 27). Así que Hata obtuvo una serie de expresiones matemáticas para las curvas de Okumura incluido correcciones que se utilizan en comunicaciones móviles. Estas expresiones representan a la pérdida básica de propagación para zonas urbanas, suburbanas y rurales. Para las zonas urbanas se presenta una fórmula estándar que viene dada por la ecuación 1-1.

$$L_b = 69,55 + 26,16 \log f - 13,82 \log h_t - a(h_m) + (44,9 - 6,55 \log h_t)(\log d)^b \quad \text{Ec. 1-1}$$

Donde

L_b : Pérdidas básicas de propagación de valor medio en dB.

f : Frecuencia en MHz.

h_t : Altura efectiva de la antena transmisora (estación base) en metros.

h_m : Altura sobre el suelo de la antena receptora (móvil) en metros.

d : Distancia entre el transmisor y receptor (km)

b : Es 1 para $d \leq 20$ km y para distancias entre 20 km y 100 km, se obtiene mediante la ecuación 2-1.

$$b = 1 + (0,14 + 1,87 \times 10^{-4} f + 1,07 \times 10^{-3} h_t') (\log 0,05 d)^{0,8} \quad \text{Ec. 2-1}$$

h_t' se calcula con la ecuación 3-1.

$$h_t' = h_t / \sqrt{1 + 7 \times 10^{-6} h_t^2} \quad \text{Ec. 3-1}$$

$a(h_m)$: Factor de corrección para la altura de la antena móvil, depende del tamaño del área de cobertura y viene dado en dB. Para una altura de la antena receptora diferente de 1,5 m el factor de corrección se calcula de la siguiente manera:

- Para una ciudad de tamaño pequeña a mediana viene dado por la ecuación 4-1.

$$a(h_m) = (1,1 \log f - 0,7) h_m - (1,56 \log f - 0,8) \quad \text{Ec. 4-1}$$

- Para una ciudad grande, está dado por la ecuación 5-1.

$$a(h_m) = \begin{cases} 8,29 (\log 1,54 h_m)^2 - 1,1 & f \leq 200 \\ 3,2 (\log 11,75 h_m)^2 - 4,97 & f \geq 400 \end{cases} \quad \text{Ec. 5-1}$$

La pérdida básica de propagación para zonas suburbanas se obtiene mediante la ecuación 6-1.

$$L_{bs} = L_b - 2 (\log f/28)^2 - 5,4 \quad \text{Ec. 6-1}$$

Finalmente, para zonas rurales la pérdida básica de propagación se obtiene con la ecuación 7-1

$$L_{br} = L_b - 4.78 (\log f)^2 + 18,33 \log f - 40,94 \quad \text{Ec. 7-1}$$

La recomendación UIT-R P.529-3 extendió la aplicación de las expresiones matemáticas de Hata a la distancia original de 100 km del modelo Okumura (UIT, 2002, p. 27), incorpora curvas de propagación de ondas métricas y decimétricas para el servicio móvil terrestre.

Para las ondas decimétricas se presentan dos curvas de propagación, una para 450 MHz y otra para 900 MHz que se muestran en las figuras 10-1 y 11-1 respectivamente.

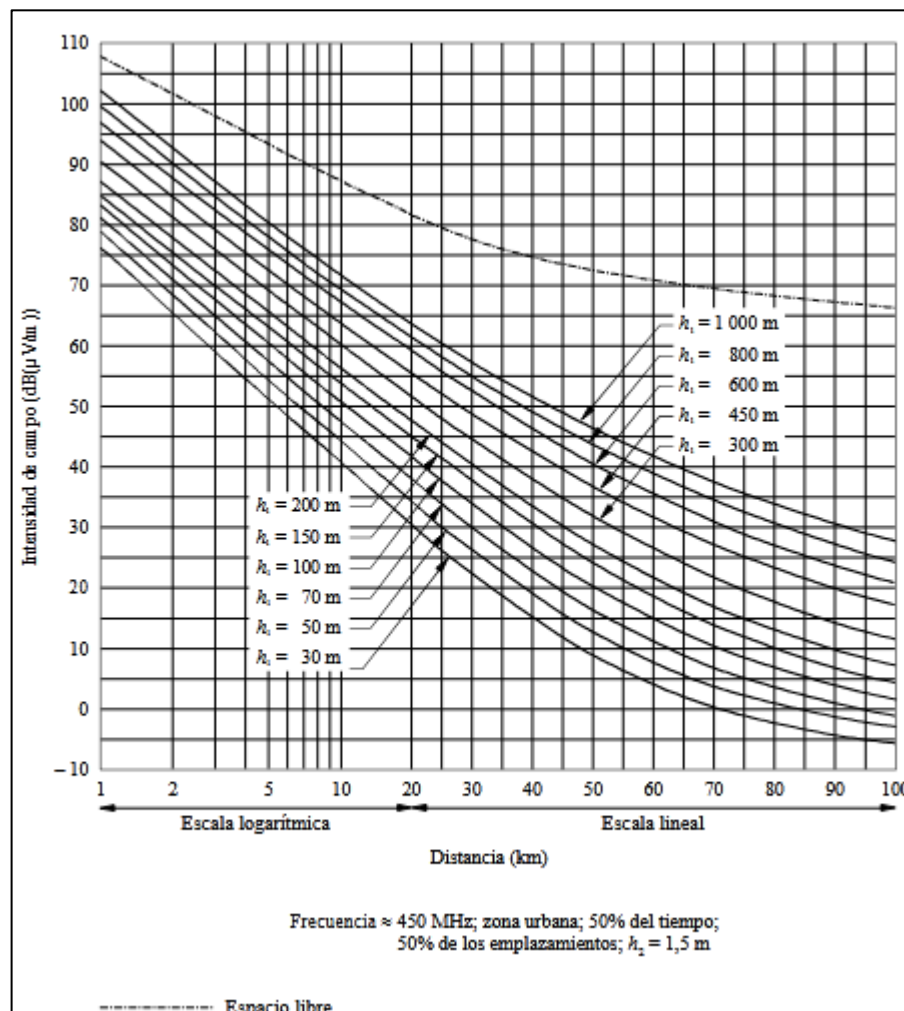


Figura 10-1: Intensidad de campo para una potencia radiada aparente de 1KW (450 MHz)

Fuente: ITU, 1999, p.5

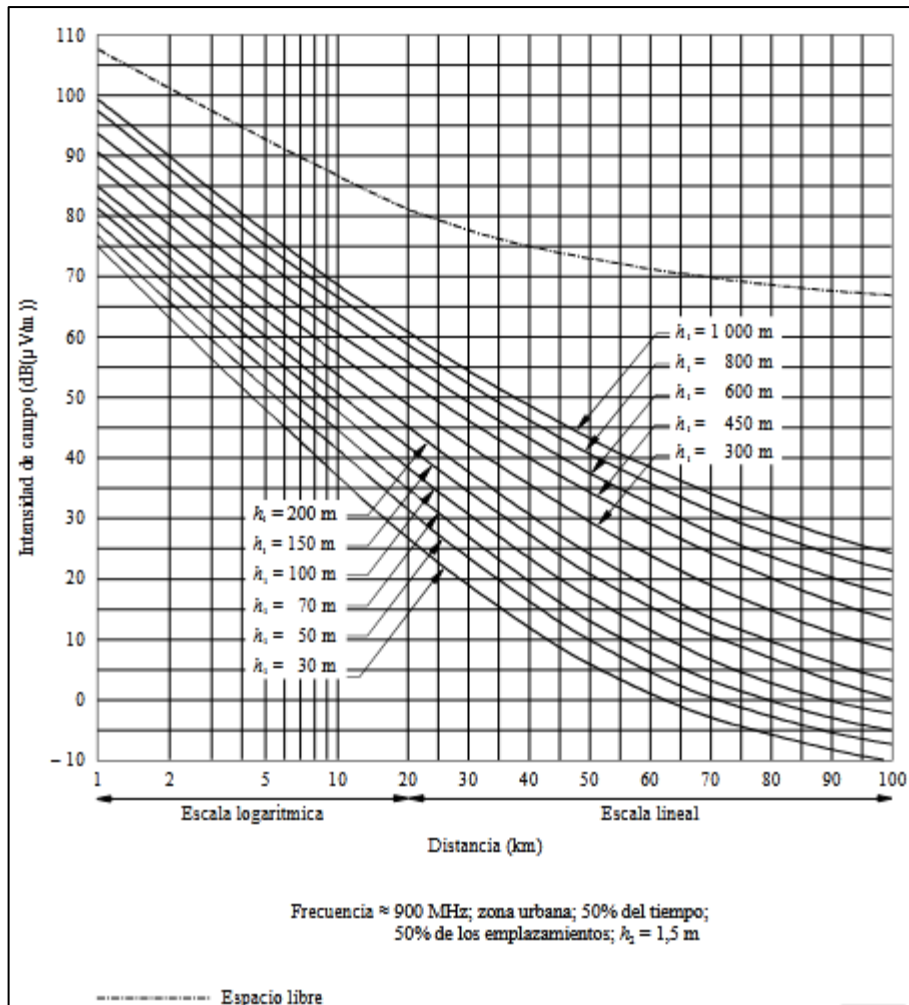


Figura 11-1: Intensidad de campo para una potencia radiada aparente de 1KW (900 MHz)

Fuente: ITU, 1999, p.6

La ecuación Okumura-Hata para el cálculo de la intensidad de campo que corresponden aproximadamente a las curvas de las figuras 10-1 y 11-1 viene dada por la ecuación 8-1. Esta ecuación es admitida para frecuencias de hasta 2 GHz, a distancias máximo de 20 Km. (ITU, 1999, pp. 6-7)

$$E = 69,82 - 6,16 \log f + 13,82 \log h_t + a(h_m) - (44,9 - 6,55 \log h_t)(\log d)^b \quad \text{Ec. 8-1}$$

Donde

- E : Intensidad de campo para una PRA de 1KW en dBu.
- b : Cumple las mismas condiciones que la ecuación 2-2

El resto de los parámetros presentados en la ecuación 8-1 que son f , h_t , $a(h_m)$ y d fueron explicados en la ecuación 1-1 y tienen las mismas características. Las condiciones para poder aplicar este modelo se especifican en la tabla 3-1.

Tabla 3-1: Condiciones de aplicación modelo Okumura-Hata

Parámetros	Rango de validez
Frecuencia	150 MHz a 1500 MHz
Altura efectiva de la antena transmisora	30 m a 200m
Altura de la antena receptora	1 m a 10 m
Distancia	1 km a 20 km

Fuente: Rappaport, 2002, pp. 153-154

Realizado por: Benítez, P. 2021.

1.3.3. Modelo Extendido de Hata (COST-231 Hata)

Debido a la nueva aparición de sistemas móviles que trabajan en 1800 MHz y 1900 MHz, EURO-COST (Cooperativa Europea de Investigación Científica y Técnica) formaron el comité de trabajo COST-231 para extender el rango de frecuencia del modelo Okumura-Hata hasta 2 GHz (Rappaport, 2002, p.154). La pérdida básica de propagación ahora viene dada por la ecuación 9-1.

$$L_b = 46,3 + 33,9 \log f - 13,82 \log (h_t) - a(h_m) + (44,9 - 6,55 \log h_t) \log d + C_M \quad \text{Ec. 9-1}$$

Donde

f : Frecuencia en MHz, en el rango de 1500 MHz a 2000 MHz.

$a(h_m)$: Definido en las ecuaciones 4-1 y 5-1.

C_M : Constante, factor de corrección para el tipo de ambiente. Es 0 dB para áreas urbanas y suburbanas de ciudades medianas y es igual a 3 dB para centros metropolitanos. (Rappaport, 2002, p. 154)

El modelo COST-231 Hata es utilizado en comunicaciones móviles y solo considera el grado de urbanización. (García et al., 2014a: p. 133)

1.3.4. Modelo Walfisch-Bertoni

El modelo Walfisch-Bertoni también conocido modelo de difracción propuesto por Joram Walfisch y Henry Bertoni en 1988, es un modelo teórico que predice las pérdidas de trayectoria en entornos urbanos en la banda UHF, tomando en cuenta el efecto de los edificios en la propagación. Los bloques de edificios se ven como cilindros difractores, al representar a los edificios como pantallas absorbentes, la propagación entre el transmisor y el receptor se reduce a

una difracción múltiple que pasa por una serie de pantallas como se muestra en la figura 12-1. (Walfisch y Bertoni, 1988: p. 1788)

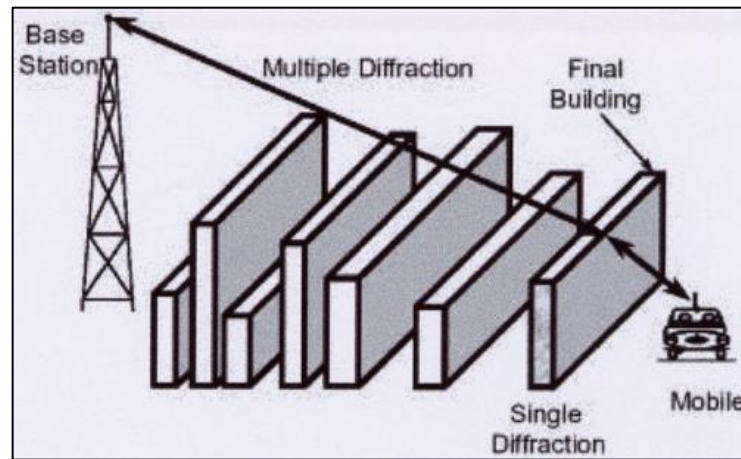


Figura 12-1: Geometría de difracción múltiple

Fuente: <https://slideplayer.fr/slide/18028248/111/images/17/COST+231+Walfisch-Ikegami+Model.jpg>

En el área urbana de muchas ciudades los edificios que rodean un lado de la calle están ubicados de forma contigua o tienen pasillos entre ellos que suelen ser estrechos. A nivel de la calle, los campos producidos por una antena transmisora elevada son ensombrecidos por los edificios excepto cuando hay línea de vista directa con el transmisor que es poco probable, por ello la propagación se da a través de los edificios. (Walfisch y Bertoni, 1988: p. 1788)

En la propagación a través de edificios se puede tener varios trayectos como se muestra en la figura 13-1.

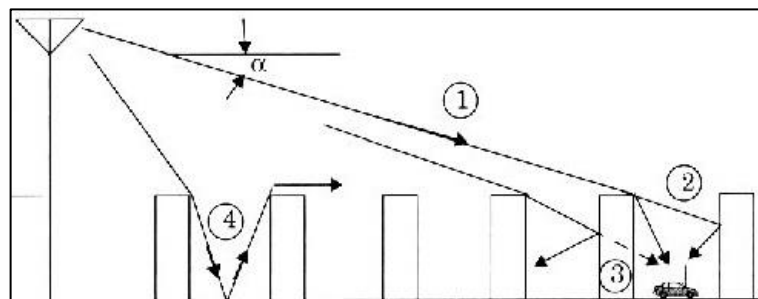


Figura 13-1: Trayectos por propagación de edificios

Fuente: https://slidetodoc.com/presentation_image_h/c8dcd806906c30a650e0360abe457c04/image-29.jpg

A continuación, se explican dos de los trayectos posibles:

- Cuando un campo choca con una fila de edificios que se encuentran en frente del móvil como lo muestra el trayecto 3, la mayor parte del camino no alcanza a atravesar los edificios por lo que la mayoría de esas rutas no puede asociarse con la propagación por edificios.

- Cuando la propagación se da por los tejados de los edificios una parte del campo se difracta hacia el suelo, estos campos pueden reunirse con los que están encima de los edificios después de una serie de reflexiones y difracciones múltiples como lo muestra el trayecto 4, sin embargo, tienen poca amplitud y son despreciables. (Walfisch y Bertoni, 1988: pp. 1788–1789)

Debido a las explicaciones dadas anteriormente Walfisch y Bertoni concluyen que la ruta principal de propagación se da sobre la parte superior de los edificios representado por el trayecto 1 de la figura 13-1. Así el campo que alcanza el nivel de la calle es el resultado de la difracción de los campos incidentes en los tejados en las cercanías del móvil. (Walfisch y Bertoni, 1988: p. 1789)

La geometría del modelo Walfisch-Bertoni se muestra en la figura 14-1 donde se considera que los rayos principales que alcanzan al receptor son el rayo PR, que se difracta en P, y el rayo PQR que se refleja en el punto Q. (Hernando Rábanos, 2015, p. 155)

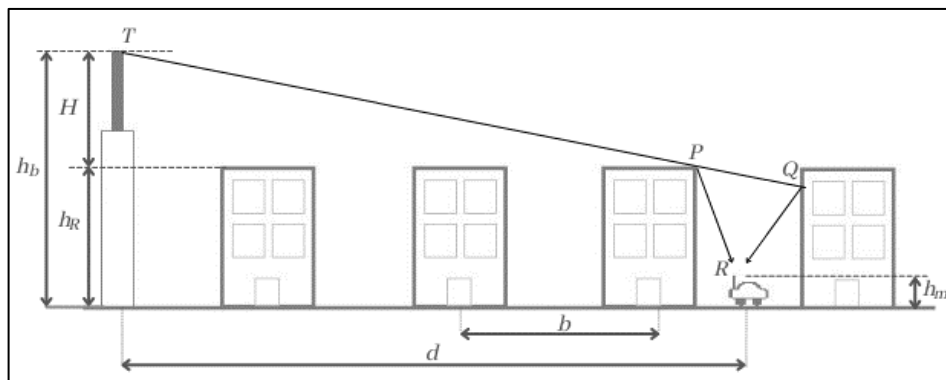


Figura 14-1: Geometría del modelo Walfisch-Bertoni

Realizado por: Benítez, P. 2021

Los parámetros de la geometría del modelo son:

- h_b : Altura de la antena de la estación base (m)
- h_R : Altura media de los edificios (m)
- h_m : Altura de la antena de la estación móvil (m)
- b : Distancia entre los edificios de centro a centro (m)
- d : Distancia entre la estación base y la estación móvil (km)
- H : Altura de la antena transmisora sobre los edificios próximos, está dado en metros y se obtiene con la ecuación 10-1

$$H = h_b - h_R$$

Ec. 10-1

Las pérdidas totales consideradas por el modelo de Walfisch-Bertoni esta dado por la ecuación 11-1.

$$L = L_{bf} + L_{ex} \quad \text{Ec. 11-1}$$

El primer término L_{bf} corresponde a las pérdidas por trayectoria en el espacio libre y se obtiene con la ecuación 12-1. La frecuencia f está en MHz.

$$L_{bf} = 32,45 + 20 \log f + 20 \log d \quad \text{Ec. 12-1}$$

El segundo término L_{ex} representa al exceso de pérdida de trayectoria y viene dada por la ecuación 13-1 donde el último término representa a la curvatura de la tierra.

$$L_{ex} = 57,1 + A + \log f + 18 \log d - 18 \log H - 18 \log \left(1 - \frac{d^2}{17H}\right) \quad \text{Ec. 13-1}$$

La influencia de la geometría de los edificios está contenida en la expresión A y se obtiene con la ecuación 14-1

$$A = 5 \log \left[\left(\frac{b}{2}\right)^2 + (h_R - h_m)^2 \right] - 9 \log b + 20 \log \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{2(h_R - h_m)}{b} \right] \right\} \quad \text{Ec. 14-1}$$

Finalmente, sumando las ecuaciones 12-1 y 13-1 se obtiene las pérdidas totales del modelo Walfisch-Bertoni expresado en la ecuación 15-1.

$$L_b = 89,55 + A + 21 \log f + 38 \log d - 18 \log H - 18 \log \left(1 - \frac{d^2}{17H}\right) \quad \text{Ec. 16-1}$$

En resumen, el modelo Walfisch-Bertoni no tiene en cuenta la presencia de línea de vista (LOS) entre la antena transmisora y receptora, por lo que considera las pérdidas de propagación debido a la difracción en los tejados de los edificios y supone que los dichos edificios están ubicados en filas paralelas. Las condiciones de aplicabilidad del modelo se indican en la tabla 4-1.

Tabla 4-1: Condiciones de aplicación modelo Walfisch-Bertoni

Parámetros	Rango de validez
Frecuencia	300 MHz a 3000 MHz
Altura de la antena transmisora	Por encima de los tejados de los edificios
Distancia	0,2 km a 5 km

Fuente: García et al., 2014a: p. 134
Realizado por: Benítez, P. 2021.

1.3.5. Modelo COST 231 Walfisch-Ikegami

El modelo COST 231 es un modelo empírico para una zona urbana propuesto en el proyecto europeo COST 231 y es resultado de la combinación de los modelos de Ikegami-Ioshida y de Walfisch-Bertoni. Dicho modelo incorpora nuevos factores como se indica en la figura 15-1.

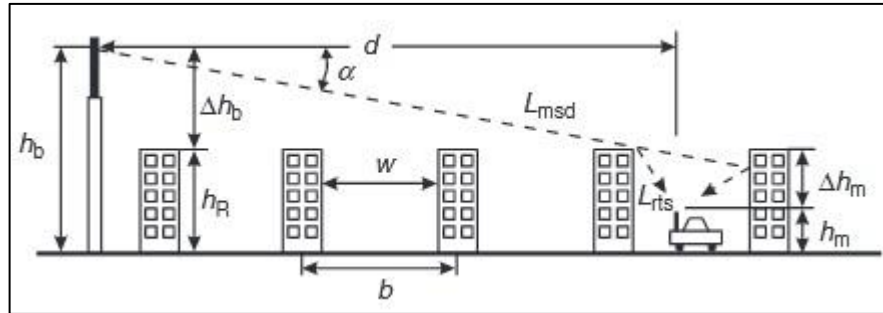


Figura 15-1: Parámetros considerados en el modelo COST-231 Walfisch-Ikegami

Fuente: Molisch, 2011, p.128

Realizador por: Benítez, P. 2021

A continuación, se presenta una descripción de algunos parámetros utilizados en el modelo, los demás serán definidos más adelante:

- h_b : Altura sobre el suelo de la estación base (m).
- h_m : Altura de la antena móvil (m).
- h_R : Altura media de los edificios (m).
- w : Ancho de la calle donde se encuentra el móvil (m).
- b : Distancia entre los centros de los edificios (m).
- d : Distancia desde la estación base al móvil (km).
- α : Ángulo de inclinación del rayo en grados ($^\circ$).
- Δh_b : Altura de la antena de la estación base sobre la altura media de los edificios circundantes en metros (m).
- Δh_m : Altura media de los edificios sobre la altura de la antena móvil (m).

Los parámetros Δh_b y Δh_m se obtienen mediante las ecuaciones 17-1 y 18-1 respectivamente.

$$\Delta h_b = h_b - h_R \quad \text{Ec. 17-1}$$

$$\Delta h_m = h_R - h_m \quad \text{Ec. 18-1}$$

El modelo COST 231 Walfisch-Ikegami se divide en dos casos, cuando existe línea de vista (LOS) y cuando no existe línea de vista (NLOS). En el primer caso la pérdida de propagación depende de la distancia d , si la distancia es mayor de 20 m se utiliza la ecuación 19-1, esta ecuación es semejante a la ecuación de pérdidas en el espacio libre, pero con ajustes en sus constantes para que sean equivalentes a las del espacio libre a una distancia de 20 m (García et al., 2014a: p. 136). En el caso de que la distancia sea menor a 20 m se utiliza la ecuación 12-1.

$$L_b = 42,6 + 20 \log f + 26 \log d \quad \text{Ec. 19-1}$$

Para el segundo caso (NLOS), la pérdida básica de propagación está dada por la ecuación 20-1.

$$L_b = \begin{cases} L_{bf} + L_{rts} + L_{msd} & L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_{bf} & L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases} \quad \text{Ec. 20-1}$$

Donde

L_{bf} : Pérdidas en el espacio libre (dB).

L_{rts} : Pérdidas por difracción en los techos (dB).

L_{msd} : Pérdidas por difracción multipantalla (dB).

El término L_{bf} se obtiene con la ecuación 12-1. El término L_{rts} corresponde a las pérdidas por difracción en los techos de edificaciones, suceden cuando la onda se propaga desde los techos de las edificaciones más cercanas a la calle donde se encuentra el móvil y viene dado por la ecuación 21-1. Se considera L_{rts} igual a cero, si $L_{rts} \leq 0$.

$$L_{rts} = -16,9 - 10 \log w + 10 \log f + 20 \log \Delta h_m + L_{ori} \quad \text{Ec. 21-1}$$

Donde L_{ori} son las pérdidas por la orientación de la calle que considera el ángulo φ entre el rayo incidente y el eje de la calle, la figura 16-1 representa la geometría de dicho ángulo.

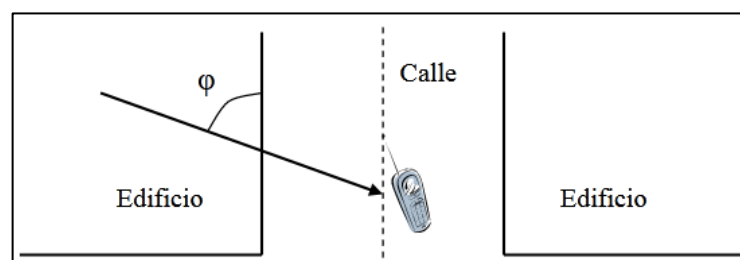


Figura 16-1: Ángulo φ en el modelo COST-231 Walfisch-Ikegami

Fuente: García et al., 2014a: p. 137

Las pérdidas L_{ori} se obtienen mediante la ecuación 22-1.

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,3571\varphi & 0 \leq \varphi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\varphi - 35^\circ) & 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4 - 0,114(\varphi - 55^\circ) & 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases} \quad \text{Ec. 22-1}$$

El término L_{msd} corresponde a las pérdidas por difracción multipantalla causada por la propagación del rayo desde la antena transmisora hasta el edificio que esté más cerca del móvil. Se obtiene mediante la ecuación 23-1.

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log d + k_f \log f - 9 \log b \quad \text{Ec. 23-1}$$

El término L_{bsh} corresponde al efecto de la antena base sobre los tejados de los edificios y se calcula con la ecuación 24-1. L_{bsh} es igual a cero, si $\Delta h_b < 0$

$$L_{bsh} = -18 \log (1 + \Delta h_b) \quad \text{Ec. 24-1}$$

El término k_a representa el aumento en las pérdidas de propagación cuando la antena de la estación base se encuentra por debajo de los tejados de los edificios adyacentes. (Cichon y Kürner, 1998: p. 138). Los términos k_a y k_d se obtiene con las ecuaciones 25-1 y 26-1 respectivamente.

$$k_a = \begin{cases} 54 & \Delta h_b \geq 0 \\ 54 - 0,8 \Delta h_b & \Delta h_b < 0 \text{ y } d \geq 0,5 \text{ km} \\ 54 - 0,8 \Delta h_b \times d/0,5 & \Delta h_b < 0 \text{ y } d < 0,5 \text{ km} \end{cases} \quad \text{Ec. 25-1}$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \Delta h_b \geq 0 \\ 18 - 15\Delta h_b/h_R & \Delta h_b < 0 \end{cases} \quad \text{Ec. 26-1}$$

El término k_f es referido a mediciones realizadas a una frecuencia de 925 MHz y depende del entorno urbano. Para ciudades medianas y zonas suburbanas con densidad de vegetación moderada se obtiene mediante la ecuación 27-1 (a) y para grandes centros metropolitanos mediante la ecuación 27-1 (b) (García et al., 2014a: pp. 136-137)

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0,7(f/925 - 1) & (a) \\ -4 + 1,5(f/925 - 1) & (b) \end{cases} \quad \text{Ec. 27-1}$$

Según el reporte final COST 231 realizado por Cichon y Kürner, (1998), si no se conocen los datos del medio urbano se pueden utilizar los siguientes valores predeterminados:

- $h_R = 3 \text{ m} \times (\# \text{ de pisos}) + \text{altura del techo}$
- altura del techo = $\begin{cases} 3 \text{ m inclinado} \\ 0 \text{ m plano} \end{cases}$
- $b = 20 \text{ a } 50 \text{ m}$
- $w = b/2$
- $\varphi = 90^\circ$

En todas las ecuaciones presentadas en el modelo de Walfisch-Ikegami la frecuencia está expresada en MHz. La tabla 5-1 muestra las condiciones de aplicación de este modelo.

Tabla 5-1: Condiciones de aplicación modelo COST 231 Walfisch-Ikegami

Parámetros	Rango de validez
Frecuencia	800 MHz a 2000 MHz
Altura de la estación base	4 m a 50 m
Altura de la antena móvil	1 m a 3 m
Distancia	0.02 km a 5 km

Fuente: Cichon y Kürner., 1998, p. 139

Realizado por: Benítez, P. 2021.

El modelo COST 231 Walfisch-Ikegami a diferencia del modelo de Walfisch-Bertoni considera el caso donde alturas de la antena de la estación base se encuentren por debajo de los tejados y no solo por encima de los tejados. Para el caso cuando se encuentra la antena por encima de los tejados la estimación de la pérdida de propagación es bastante buena, el error medio se encuentra en el rango de +3dB y el rango de la desviación estándar de 4 a 8 dB. El error de predicción aumenta cuando $h_b = h_R$ y el rendimiento del modelo se vuelve deficiente cuando $h_b \ll h_R$. El modelo es muy adecuado para macrocélulas de sistemas de comunicaciones móviles, aunque no considera la propagación multirrayecto. Este modelo fue validado por la ITU en el reporte 567-4. (García et al., 2014a; Cichon y Kürner, 1998)

1.4. Sistemas de comunicaciones móviles

La comunicación móvil a través del uso de la tecnología permite establecer una comunicación unos con otros sin la necesidad de tener una conexión alámbrica. La movilidad en la comunicación es un factor importante en las necesidades de la población y ha permitido una optimización de tiempo y esfuerzos. (Sallent et al., 2003: p. 14)

1.4.1. Elementos de un sistema de comunicaciones móviles

Un sistema de comunicaciones móviles se conforma por estaciones fijas, estaciones móviles y equipos de control.

1.4.1.1. Estaciones Fijas

Las estaciones fijas son estaciones que no son previstas para un uso en movimiento. Existen tres tipos de estaciones fijas en el servicio móvil:

- Estación Base (BS): Es una estación fija de transmisión y recepción que sirve como control central para los usuarios de una misma celda. Están constituidas por antenas, torre, equipo de comunicación, enlace con la central telefónica, entre otros elementos (León, 2015, pp. 3–4)
- Estación de Control (CS): Es una estación fija que controla y administra otras estaciones como la estación base o la estación repetidora.
- Estación repetidora (RS): Es una estación fija que se utiliza para retransmitir la señal recibida, permite ampliar el rango de cobertura en escenarios complicados como comunicar a una estación base con un móvil fuera de cobertura. Generalmente está ubicada en la parte superior de un edificio o montaña.

1.4.1.2. Estaciones Móviles

Las estaciones móviles son estaciones que son previstas para la utilización por personas o vehículos en movimiento. Incluye a equipos portátiles o de mano que lleva una persona o equipos montados en un vehículo. (Hernando Rábanos, 2008, p. 507)

1.4.1.3. Equipos de control

Son aquellos dispositivos que se utilizan para la elaboración y recepción de llamadas, localización de usuarios, equipos y vehículos, transferencia de llamadas, etc. En comunicaciones móviles de datos se incluyen los terminales como pantallas, impresoras, ordenadores pequeños y controladores. (Hernando Rábanos, 2015: p. 3)

En comunicaciones móviles existen dos tipos de enlaces en cuanto al sentido de la comunicación. Cuando la comunicación va desde la estación móvil a la estación base, se denomina enlace ascendente o Uplink y cuando la comunicación va desde la estación base a la estación móvil se denomina enlace descendente o Downlink.

1.4.2. Servicios de los sistemas de comunicaciones móviles

Dentro de los principales servicios de comunicaciones móviles se encuentran los siguientes:

1.4.2.1. Redes Móviles Privadas

Las redes móviles públicas PLMN (Public Land Mobile Networks), son un servicio destinado a cualquier usuario ya sea particular o profesional. La cobertura abarca desde un territorio nacional hasta uno continental. (Hernando Rábanos, 2015: p. 24)

1.4.2.2. Redes Móviles Públicas

Las redes móviles privadas PMR (Private Mobile Radio), son un servicio de telefonía móvil que está destinado a grupos cerrados de usuarios, inicialmente proporcionaban servicios de voz y después se añadió servicio de datos con velocidad baja. Cuando se requieren de redes más amplias y con un gran número de terminales se utiliza sistemas troncales o Trunkig. (Hernando Rábanos, 2015: p. 24)

1.4.2.3. Telefonía Móvil Terrestre

La telefonía móvil terrestre es un servicio cuyas estaciones se encuentran en la Tierra, ofrecen a los usuarios la posibilidad de conectarse vía radio con otros usuarios de sistemas de comunicaciones móviles. Esta conexión se realiza en áreas territoriales extensas, pero gracias a la división celular del área en células con estaciones base se puede brindar un servicio de mejor calidad a varios usuarios. (García et al., 2014a: p. 13)

1.4.2.4. Telefonía Móvil por Satélite

El servicio de telefonía móvil por satélite establece la comunicación mediante enlaces satelitales, de esta manera permite que el usuario final pueda transmitir y recibir información a través de un sistema satelital (Arcotel, 2020). Tienen la ventaja de poder ofrecer una comunicación fuera del alcance de un sistema celular por lo que tienen mayor cobertura.

1.4.3. Tecnologías móviles

La telefonía móvil ha ido evolucionando a lo largo de los años, su crecimiento ha sido tal que ahora existe hasta la quinta generación de tecnología móvil cumpliendo así los requerimientos y demandas que han ido surgiendo.

1.4.3.1. Primera generación 1G

La primera generación tuvo inicio en los años 80, la interfaz de radio era analógica con una gran cantidad de sistemas incompatibles entre ellos. Las frecuencias que se utilizaban son 450, 800 y 900 MHz. Cada MHz se divide en 40 semicanales de 25 KHz y las frecuencias de transmisión y

recepción tienen una separación de 45 MHz, un radiocanal entonces es la pareja de frecuencias para el enlace ascendente y descendente. (Gutiérrez, 2020, p. 20)

Entre los estándares más conocidos de la primera generación se encuentran los siguientes. En Escandinavia se creó el sistema NMT uno para trabajar en la banda de 450 MHz, llamado NMT-450 y otro para 900 MHz, llamado NMT-900. En Reino Unido se desarrolló TACS basado en el protocolo AMPS para la banda de 900 MHz y en EE. UU. se originó AMPS utilizando la banda de 800 MHz. (Figueroa de la Cruz, 2008, p. 15)

1.4.3.2. Segunda generación 2G

La segunda generación empezó en el año 1991, aquí los sistemas pasaron de ser analógicos a ser digitales por lo que existió una mejora en la calidad de servicio, entre las mejoras están mayor calidad de voz, mayor nivel de seguridad y mayor variedad de servicios.

Los estándares principales de esta generación son: Sistema Global de Comunicaciones – GSM, Digital AMPS o también llamado TDMA, Acceso Múltiple por División de Código – CDMA IS-95 y Comunicaciones Digitales del Pacífico – PDC. Estos sistemas fueron adoptados por varios países del mundo, pero GSM fue el más exitoso teniendo aceptación en Europa, Asia África y América. (Figueroa de la Cruz, 2008, p. 17)

1.4.3.3. Tercera generación 3G

En la tercera generación se pasa de tener servicios de voz y datos a incorporar acceso a Internet y aplicaciones multimedia como video, mp3 con mayores velocidades de transmisión. Gracias a la evolución de la tecnología se busca una globalización completa de las comunicaciones móviles para lograr UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). (Gutiérrez, 2020, p. 21)

1.4.3.4. Cuarta generación 4G

La cuarta generación de tecnología de telefonía móvil se la conoce como LTE (Long Term Evolution) que significa Evolución a Largo Tiempo, la novedad de esta generación es que todos los servicios sean soportados por el protocolo IP. Las velocidades en la interfaz radio aumentan a un rango de 100 Mbps y 1 Gbps, ofreciendo gran capacidad en el uso de datos. (Gutiérrez, 2020, p. 21)

1.4.3.5. Quinta generación 5G

La quinta generación de tecnología móvil está orientada para transformar las ciudades habituales en ciudades inteligentes, promete brindar servicios a velocidades de gigabit, servicios de banda

ancha de alta velocidad y reducir significativamente la latencia por debajo de 1 ms (International Telecommunication Union, 2018, pp. 3–4). En Ecuador, el 29 de abril de 2021 se anunció la puesta en marcha de tres estaciones fijas de tecnología 5G, tres áreas experimentales ubicadas una en Manta y dos en Guayaquil (Ministerio de Telecomunicaciones, 2021). Se espera que esta tecnología tenga un gran despliegue en el país.

A manera de resumen se presenta en la tabla 6-1 la evolución de las características más importantes de cada tecnología, así también su fecha aproximada de implementación.

Tabla 6-1: Evolución de las tecnologías móviles

	1G	2G	3G	4G	5G
Fecha de implementación	1980s	1990s	2000s	2010s	2020s
Servicios	Voz	Voz y SMS	Voz y Datos	Datos	Datos
Sistema	Analógico	Digital	Multimedia	Protocolo IP	Banda Ancha
Velocidad de descarga teórica	2 kbps	384 kbps	56 Mbps	1Gbps	10 Gbps
Latencia	N/A	629 ms	212 ms	60-98 ms	< 1 ms

Fuente: International Telecommunication Union., 2018, p. 6

Realizado por: Benítez, P. 2021.

1.5. LTE

La tecnología 4G es tan importante pues ofrece mayor acceso a la red y mayor capacidad en el uso de datos, permitiendo acceder a servicios como Telemedicina, teletrabajo, entre otros y requiere de una infraestructura especial para su funcionamiento.

En Ecuador, 4G empezó a funcionar a partir del año 2014 siendo el operador CNT el primero en ofrecer esta tecnología, aunque no tardó mucho tiempo en que las demás operadoras del país se unieran, así en el año 2015 las operadoras Claro y Movistar/Tuenti comenzaron a brindar la tecnología 4G. (Arcotel, 2019a)

1.5.1. Características

Las características principales de LTE son:

- Utiliza un enfoque de múltiples portadoras para el acceso múltiple. En el enlace descendente o Downlink utiliza OFDMA y en el enlace ascendente o Uplink, SC-FDMA.
- Admite la tecnología dúplex por división de tiempo TDD y la tecnología dúplex por división de frecuencia FDD.

- Las bandas de operación de LTE van desde 700 MHz hasta los 2.7 GHz, aunque el estándar en su publicación 3GPP TS 36.104 define hasta 80 bandas de operación para trabajar en TDD o FDD.
- Los anchos de banda disponibles son variables, van desde 1.4 GHz hasta 20 MHz. (Nohrborg, 2013)

Dependiendo de los anchos de banda de canal LTE (CBW, que es la separación de canales mínima permitida) se tiene el ancho de banda de transmisión (TBW, ancho de banda real ocupado por los operadores) y el número de subportadoras soportadas como se muestra en la tabla 7-1, cada subportadora está separada 15 kHz. (Narda Safety Test Solutions, 2017, p. 152)

Tabla 7-1: Anchos de banda de canal soportados

CBW (MHz)	TBW (MHz)	N° de subportadoras
1.4	1.08	72
3	2.70	180
5	4.50	300
10	9.00	600
15	13.50	900
20	18.00	1200

Fuente: Narda Safety Test Solutions, 2017, p. 152
Realizado por: Benítez, P. 2021.

1.5.2. Arquitectura LTE

La estructura de una red LTE se conforma de cuatro partes como se muestra en la figura 17-1, el dominio de usuario (UE), la red de acceso radio (E-UTRAN), la red core (EPC) y el dominio de Servicios.

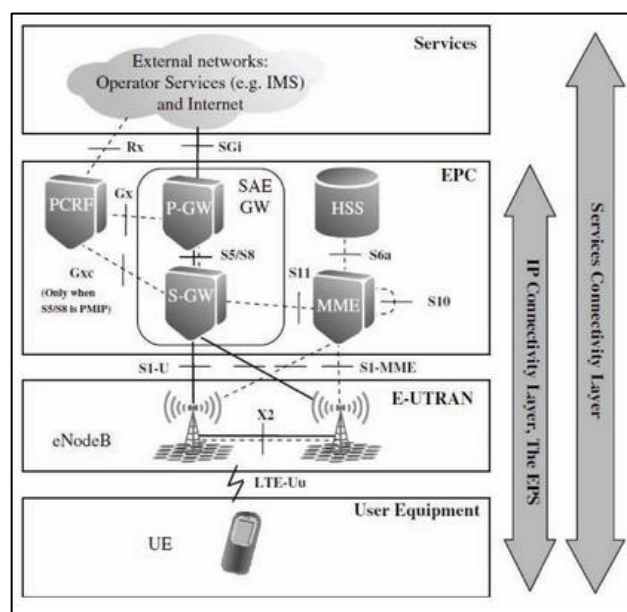


Figura 17-1: Arquitectura LTE

Fuente: García et al., 2014b: p. 150

1.5.2.1. Equipo de Usuario

Es el dispositivo que utiliza el usuario para la comunicación. Contiene un USIM (Universal Subscriber Identity Module) que identifica al usuario y se guarda en una tarjeta inteligente que en LTE se la conoce como UICC (Universal Circuit Card). El equipo de usuario realiza tareas como el establecimiento, mantenimiento y terminación de las comunicaciones de la red. (García et al., 2014b: p. 152)

1.5.2.2. Red de acceso: E-UTRAN

E-UTRAN (Enhanced UMTS Radio Access Network) es una red con topología malla que permite un alto rendimiento y baja latencia. Está formada únicamente por un nodo llamado eNodeB que son las estaciones base y son la evolución de los BTS de las redes GSM. Los eNodeB establecen una comunicación con los usuarios UE, otros eNodeB y la red Core EPC. Dentro las principales tareas que desarrolla el eNodeB, se encuentran:

- Asignación y liberación de los recursos.
- Gestión de transmisión y recepción.
- Gestión de la movilidad de los usuarios en los cambios de celda.
- Compresión y encriptación de las cabeceras IP. (León y Galán, 2014: pp. 22–23)

1.5.2.3. Red Core: EPC

EPC (Evolved Packet Core) es la red Core de LTE 4G y consiste en una red de paquetes basada en el protocolo IP, divide las funciones del gateway de control en un plano de control dirigido por MME (Mobility Management Entity) y un plano de usuario encabezado por SGW (Serving Gateway), esto permite una reducción en el número de elementos de una la red (Huidrobo, 2014, pp. 288–289). La red Core está formada por entidades y son las siguientes: MME, SGW, PGW (PDN Gateway), HSS (Home Subscriber Server) y PCRF (Policy Control and Charging Rules Function).

1.5.2.4. Servicios

En el dominio de servicios se encuentran tres tipos de servicios posibles para LTE. El primero es el Sub-Sistema de servicios Multimedia IP (IMS) que es una capa de servicios sobrepuesta a la capa IP, el segundo, servicios propios del operador que no sean IMS y el tercero otros servicios no proporcionados por el operador. (García et al., 2014b: p. 157)

1.6. Telefonía Móvil en Ecuador

ARCOTEL (2015) define que el servicio móvil avanzado es aquel que permite a los usuarios una comunicación a través de voz, mensajes de texto, internet, etc., de forma inalámbrica mediante teléfonos o módem celulares. En Ecuador el porcentaje de personas que tienen celular activado en el año 2019 fue el 59,9% mientras que en el año 2020 fue un 62,9% teniendo un aumento del 3% según las estadísticas publicadas por el INEC en abril de 2021.

En el país existen tres operadoras móviles que prestan el servicio móvil avanzado y son los siguientes: CONECEL S.A. (Consortio Ecuatoriano de Telecomunicaciones) y OTECEL S.A. que pertenecen al sector privado y CNT E.P. (Corporación Nacional de Telecomunicación) que pertenece al sector público. De las tres la que tiene mayor participación en el mercado con fecha de corte abril 2021 es CONECEL, como se indica en la tabla 8-1.

Tabla 8-1: Descripción general de las operadoras móviles en Ecuador

Operadoras	Propietario	Marca Comercial	Servicios	Participación de mercado
CONECEL	América Móvil	Claro	Telefonía y Banda Ancha Móvil	51,36%
OTECCEL	Telefónica	Movistar	Telefonía y Banda Ancha Móvil	30,93%
CNT	Estado Ecuatoriano	CNT	Telefonía y Banda Ancha Móvil	17,71%

Fuente: Registros administrativos ARCOTEL
Realizado por: Benítez, P. 2021.

Las tres operadoras mencionadas son las que actualmente existen en Ecuador, sin embargo, en septiembre de 2019 se anunció que el país contará con el servicio de una nueva operadora de telefonía móvil llamada Virgin Mobile. A pesar del pronunciamiento aún no se ha concretado el ingreso de esta operadora.

1.6.1. Asignación de Espectro SMA

Para la asignación de espectro, la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL) declara que:

La Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones en uso de sus atribuciones establecidas en la Ley Orgánica de Telecomunicaciones y su Reglamento General, actualiza el Plan Nacional de Frecuencias (PNF) tomando en cuenta las Resoluciones aprobadas desde el año 2012 por el Ex-CONATEL y ARCOTEL en materia de gestión del espectro radioeléctrico, las modificaciones de atribución de bandas de frecuencias radioeléctricas de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) aprobadas en las Conferencias

En función de lo establecido en la figura 18-1 se muestra la canalización y asignación de las bandas de frecuencia para el servicio móvil avanzado (SMA).

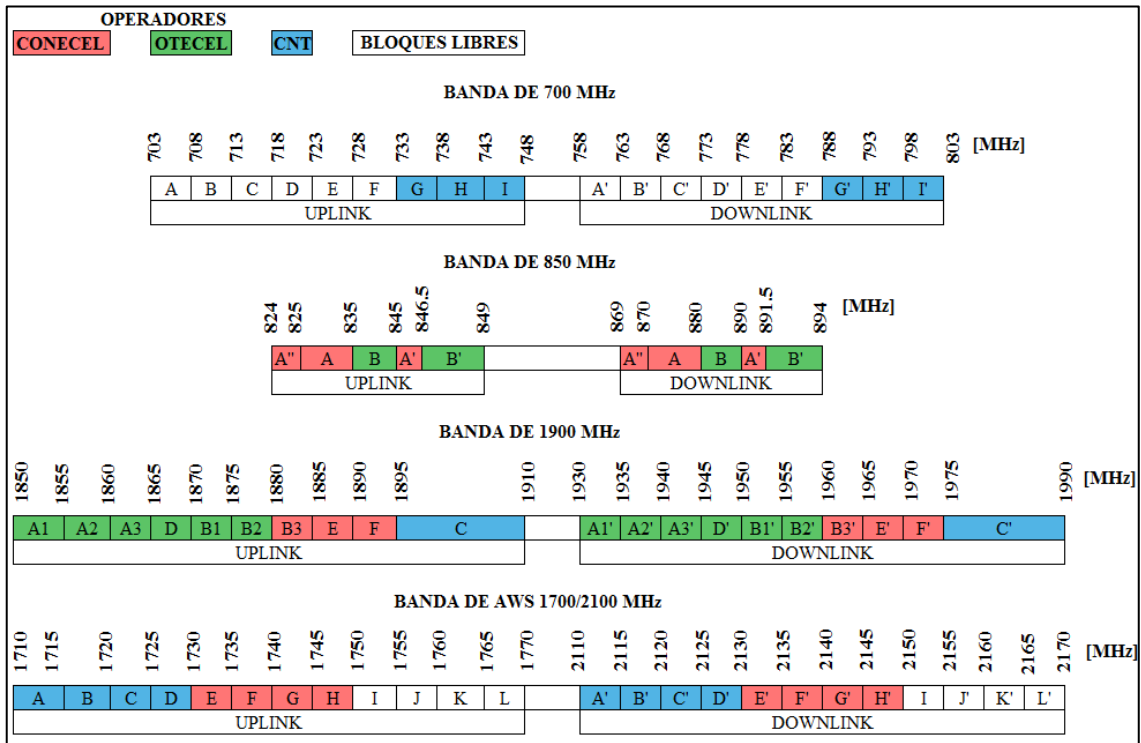


Figura 18-1: Canalización y asignación de bandas de frecuencia SMA

Fuente: ARCOTEL, 2018, p.7

Realizador por: Benítez, P. 2021

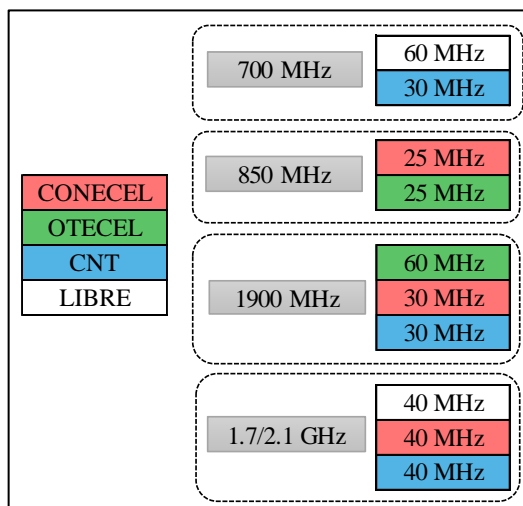


Figura 19-1: Ancho de banda concesionado

Fuente: ARCOTEL, 2018, p.8

Realizador por: Benítez, P. 2021

El espectro asignado a cada operadora móvil se ha establecido de la siguiente manera: CONECCEL S.A. posee en total 95 MHz distribuidos en las bandas de 850, 1900 y 1700/2100 MHz. OTECEL S.A. tiene 85 MHz distribuidos en las bandas de 850 y 1900 MHz. CNT E.P. posee 100 MHz distribuidos en las bandas de 700, 1900 y 1700/2100 MHz. La figura 19-1 especifica la asignación del ancho de banda por cada operador en cada banda de frecuencia.

1.6.2. Radiobases

Actualmente en el país con fecha de corte abril de 2021 hay un total de 20.015 radiobases instaladas y distribuidas por cada tecnología. En el gráfico 1-1 se observa que la tecnología que mayor número de radiobases tiene es UMTS que corresponde a la tecnología 3G, con 9.342 radiobases representando el 47% del total. La tecnología que sigue con mayor número es LTE con 7.289 y finalmente GSM con 3.384 radiobases.

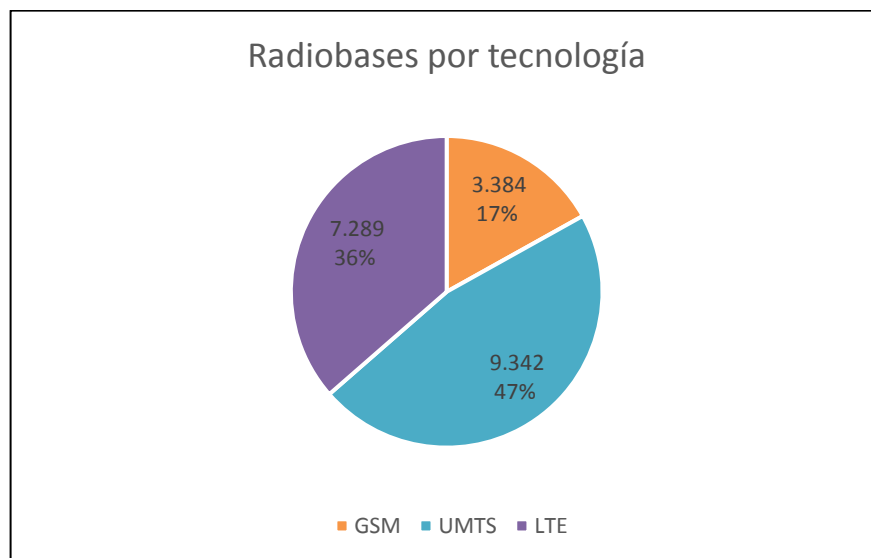


Gráfico 1-1: Radiobases instaladas por cada tecnología

Fuente: Registros administrativos ARCOTEL

Realizador por: Benítez, P. 2021

En la ciudad de Riobamba el número total de radiobases existentes de la tecnología LTE en la banda de 1900 MHz es de 44 radiobases, 21 son de CONECCEL S.A. y 23 de OTECEL S.A.

1.7. MATLAB

Matlab es un lenguaje basado en matrices, puede resolver desde problemas numéricos sencillos hasta un análisis completo con entorno visual. Entre sus principales aplicaciones se encuentran:

- Análisis de datos avanzados
- Desarrollo de algoritmos

- Creación de modelos
- Creación de aplicaciones

Matlab es usado desde científicos e ingenieros por su variedad de aplicaciones en varias áreas como procesamiento de señales, procesamiento de imágenes, pruebas y mediciones, etc.; hasta por novatos ya que está diseñado para ser accesible para todo aquel que quiera aprender a usarlo. (MathWorks, 2018)

1.8. Software R

Es un conjunto de herramientas de manipulación de datos para el análisis estadístico. Ofrece un conjunto de funciones para la organización y extracción de datos. Está disponible para plataformas UNIX, Microsoft Windows y Mac OS (R Foundation, 2011). Entre sus funciones se encuentran:

- Análisis y mejor comprensión de los datos
- Colección amplia de herramientas para el análisis de datos
- Gran variedad de técnicas estadísticas como pruebas estadísticas, modelado lineal y no lineal, etc.

1.9. Trabajos relacionados

1.9.1. Estudio de modelos de propagación en el entorno de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas

En Colombia, Pedraza et al., (2010), realizaron un estudio de modelos de propagación en el entorno de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas ubicado en la ciudad de Bogotá. En dicho trabajo se analizaron tres modelos de propagación aplicables a entornos urbanos que son: Modelo Okumura-Hata, Modelo COST-231 y el Modelo simplificado de Xia-Bertoni, estos modelos son adaptados al entorno de la universidad.

Se analizaron las pérdidas de propagación de cada modelo con respecto a la estación base llamada La Magdalena que tiene mayor cobertura en la universidad. Midieron la potencia de recepción en 8 puntos ubicados a diferentes distancias con un teléfono celular que proporcionó la información de la banda a la que estaba conectada al móvil, GSM-850, canal 135 perteneciente al operador Comcel®. En los sitios de mediciones se realizaron un promedio de 5 muestras de los niveles de potencia de recepción con la estación base con los siguientes datos:

- Altura de la antena base: 30 m

- Altura de la antena móvil: 1,5 m
- Altura promedio de los edificios: 20 m

El resultado final del estudio concluye que el modelo que mejor se ajusta al entorno de la universidad es el modelo Xia-Bertoni ya que presentó el menor valor de desviación estándar y el menor error cuadrático medio respecto a la potencia medida. (Pedraza et al., 2010: p. 85)

1.9.2. Comparación de los modelos de propagación electromagnética implementados en la telefonía móvil

En Venezuela, Beltrán et al., (2012) realizaron un estudio en el que se compararon los modelos de propagación que se utilizan con mayor frecuencia en la telefonía móvil, entre ellos están: modelo de Espacio Libre, modelo de Okumura-Hata y modelo de Dos rayos. La metodología usada para la comparación fue de campo para poder contrastar con datos de la zona occidental de Venezuela.

La campaña de mediciones de campo de la potencia recibida fue realizada en una macrocélula de tipo rural del municipio Buchivacoa del Estado Falcón, para ello utilizaron un analizador de espectros Aaronia Spectran HF-2025, una antena Aaronia Hyper-log 7525, un GPS Garmin Nüvi 855 y un computador portátil. Fueron 19 puntos de mediciones con diferentes distancias y la señal analizada fue 893 MHz procedente de una estación base ubicada en el municipio.

Se compararon los cálculos matemáticos de la pérdida por propagación estimados por los tres modelos de propagación junto con las mediciones de campo reales mediante el error promedio resultando que el que mayor error promedio en la predicción de la pérdida de potencia fue el modelo de Dos Rayos, seguido del modelo Okumura-Hata. El modelo que menor error promedio presentó fue el del Espacio Libre concluyendo así que es el mejor modelo para la predicción de la pérdida por propagación en ambientes rurales con escenarios similares a las del municipio Buchivacoa del Estado Falcón. (Beltrán et al., 2012: pp. 308–309)

1.9.3. Comparación de modelos de radiopropagación en el área suburbana de la ciudad de Barranquilla

En Colombia, Barrios et al., (2018) realizaron un estudio donde compararon tres modelos de propagación, el modelo COST-231 Hata, Walfisch-Ikegami e Interino de la Universidad de Stanford para un ambiente suburbano. Para poder comparar los modelos se realizó un conjunto de mediciones de potencia mediante un drive test de 14 estaciones de la ciudad de Barranquilla.

La recolección de datos se realizó en un vehículo equipado con la herramienta TEMS que permite medir la potencia de recepción que se conecta a un dispositivo GPS que determina las coordenadas

de los puntos de medición y a un dispositivo móvil que recibe la señal del operador. Se realizaron en total 41551 mediciones en la banda de 1900 MHz.

Para la evaluación de los modelos de propagación calcularon la media de las pérdidas por trayectoria, el error de predicción y el error relativo de cada modelo con respecto a las mediciones. De dicha evaluación el modelo Interino de la Universidad de Stanford (SUI) presentó el menor error relativo respecto a los otros modelos sin embargo al tener valores altos de error Barrios, Arjona y López concluyen que es necesario realizar un ajuste del modelo con el fin de aumentar los niveles de eficiencia en la predicción. (Barrios et al., 2018: pp. 82–84)

1.9.4. Determinación de Modelos de Propagación ajustados a Zonas Representativas de la Ciudad de Cuenca en base a mediciones reales

En Ecuador, Gallardo y Jaramillo (2015) realizaron un estudio donde se comparan tres modelos de propagación, el modelo Okumura-Hata, Walfisch-Ikegami y Xia-Bertoni. Para ello se realizaron mediciones en tres zonas representativas de la ciudad de Cuenca obteniendo la intensidad de la señal en función a la distancia a las radiobases mediante un drive test.

Las mediciones se compararon con la predicción de los modelos de propagación mediante el análisis de parámetros estadísticos como LMS, Chi, desviación estándar y media. De ello se determinó que el modelo Xia-Bertoni es el que mejor representa las condiciones de la ciudad de Cuenca obteniendo resultados estadísticos mínimos en comparación a los otros modelos.

El estudio concluye con un ajuste de parámetros del modelo Xia-Bertoni de acuerdo con las características de Cuenca minimizando el error cuadrático medio entre los valores de predicción del modelo y las mediciones realizadas, obteniendo una ecuación capaz de predecir las pérdidas por trayectoria para la planificación móvil en tecnologías como GSM o LTE. (Gallardo y Jaramillo, 2015: p. 98)

CAPITULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Introducción

En este capítulo se especifica el proceso realizado para la campaña de mediciones de campo eléctrico en 2 radiobases de la zona centro de la ciudad de Riobamba. Para el cálculo teórico de las pérdidas básicas de propagación se utilizó las fórmulas que proporciona cada modelo de propagación utilizando el programa Matlab para la optimización de este proceso. En cuanto a la evaluación de los modelos se realizó una comparación entre los valores teóricos obtenidos y las mediciones, mediante procesos estadísticos utilizando el software R. El esquema general del desarrollo de la metodología se muestra en la figura 1-2.

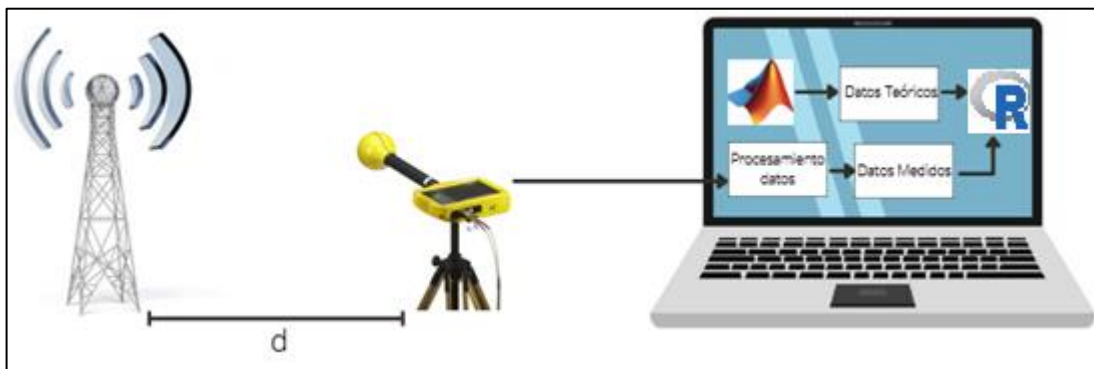


Figura 1-2: Esquema del desarrollo del proyecto

Realizado por: Benítez, P. 2021

2.2. Metodología utilizada

Para realizar las mediciones de campo eléctrico se siguió el siguiente procedimiento:

1. Identificar la ubicación de las 2 radiobases seleccionadas para las mediciones.
2. Establecer los límites de medición, para ello se trazó 3 círculos de diferente distancia respecto a cada radiobase para cubrir la zona de cobertura.
3. Elegir los puntos de medición. Dichos puntos fueron elegidos considerando que estén a las distancias requeridas evitando la mayor cantidad de perturbadores y que se encuentren en lugares accesibles para colocar el equipo Narda SRM-3006.
4. Con ayuda del equipo Spectra Mobile Mapper 50 se tomaron las coordenadas y alturas sobre el nivel del mar de cada uno de los puntos.

5. El equipo Spectra Mobile Mapper 50 y Narda SRM-3006 se colocaron a una altura de 1.5 metros sobre el nivel del suelo ya que es la altura promedio del ser humano.
6. Cada punto de medición debe estar colocado mínimo a 20 cm de cualquier objeto para evitar acoplamientos capacitivos.
7. En cada punto seleccionado se realizaron 2 mediciones de 6 minutos cada una, tomadas en un horario alrededor de las 10 am a 2 pm.
8. Una vez terminada las mediciones se realizó un levantamiento visual mediante fotografías.

2.3. Procedimiento para la elección de estaciones base

La operadora seleccionada para realizar el trabajo de investigación fue Claro perteneciente a la empresa CONECEL S.A., tiene 21 radiobases ubicadas en toda la ciudad de Riobamba que operan en la banda de 1900 MHz con la tecnología LTE según los registros administrativos de ARCOTEL.

2.3.1. Ubicación radiobases

Para situar las radiobases en el mapa se utilizó el software Google Earth, en la figura 2-2 se muestra las ubicaciones de las radiobases en diferentes sectores de la zona centro de la ciudad.



Figura 2-2: Ubicación de las radiobases de Claro en la zona centro de la ciudad de Riobamba

Realizado por: Benítez, P. 2021

Las coordenadas y alturas de las radiobases mostradas en la figura 2-2 se detallan en la tabla 1-2.

Tabla 1-2: Radiobases Claro zona centro de la ciudad de Riobamba

N° RB	Dirección	Coordenadas		Alturas	
		Latitud	Longitud	m.s.n.m.	Torre (nivel del suelo)
1	10 de agosto y García Moreno esquina (Edificio Costales)	1°40'16.92"S	78°39'6.23"O	2787.5	24
2	Calle Argentinos (Edificio Acropolis)	1°39'46.47"S	78°39'26.32"O	2807.2	15
3	Avenida Unión Nacional y José Joaquín de Olmedo (Comercial Verónica)	1°40'8.09"S	78°39'24.27"O	2785	14
4	Juan Montalvo y Argentinos	1°40'1.37"S	78°39'6.56"O	2783	14
5	11 de Noviembre y Vargas Torres	1°40'24.76"S	78°39'32.27"O	2778	15
6	José Orozco 2230 y Eugenio Espejo	1°40'16.74"S	78°38'53.31"O	2775	14
7	Olmedo y Juan de Velasco	1°40'34.29"S	78°38'54.38"O	2773	17

Realizado por: Benítez, P. 2021.

2.3.2. Radio bases seleccionadas

Una vez ubicadas las radio bases en la zona centro de la ciudad se procedió a elegir 2 de ellas para el estudio de propagación donde se consideró aquellas que estén ubicadas en zonas estratégicas. La primera radiobase (RB1) mostrada en la figura 3-2 (a), está ubicada en pleno centro histórico de la ciudad donde la topografía a su alrededor representa en su mayoría a edificaciones y la zona es comercial. La segunda radiobase (RB2) mostrada en la figura 3-2 (b), está ubicada en una zona muy alta con distribuciones topográficas diferentes a las que se encuentran en el centro histórico.

Para identificar el número de antenas en cada radio base se utilizó la aplicación móvil “G-Net Track Lite” con el parámetro Physical Cell ID (PCI) que determina el grupo de identificación de celda y el sector de identificación de celda, de esta manera se identificó que tanto la RB1 como la RB2 tienen 3 antenas con PCI 30, 31 y 32 para la primera radiobase y 21, 22 y 23 para la segunda brindando cobertura a cada zona.



(a)

(b)

Figura 3-2: Radiobases seleccionadas: (a) RB1 y (b) RB2

Realizado por: Benítez, P. 2021

2.4. Ubicación de los puntos de mediciones

En cada punto seleccionado se comprobó previamente con la aplicación móvil “G-Net Track Lite” que exista cobertura de LTE en la banda seleccionada de 1900 MHz de cada radio base. Así, se escogieron los siguientes puntos para las radio bases RB1 y RB2.

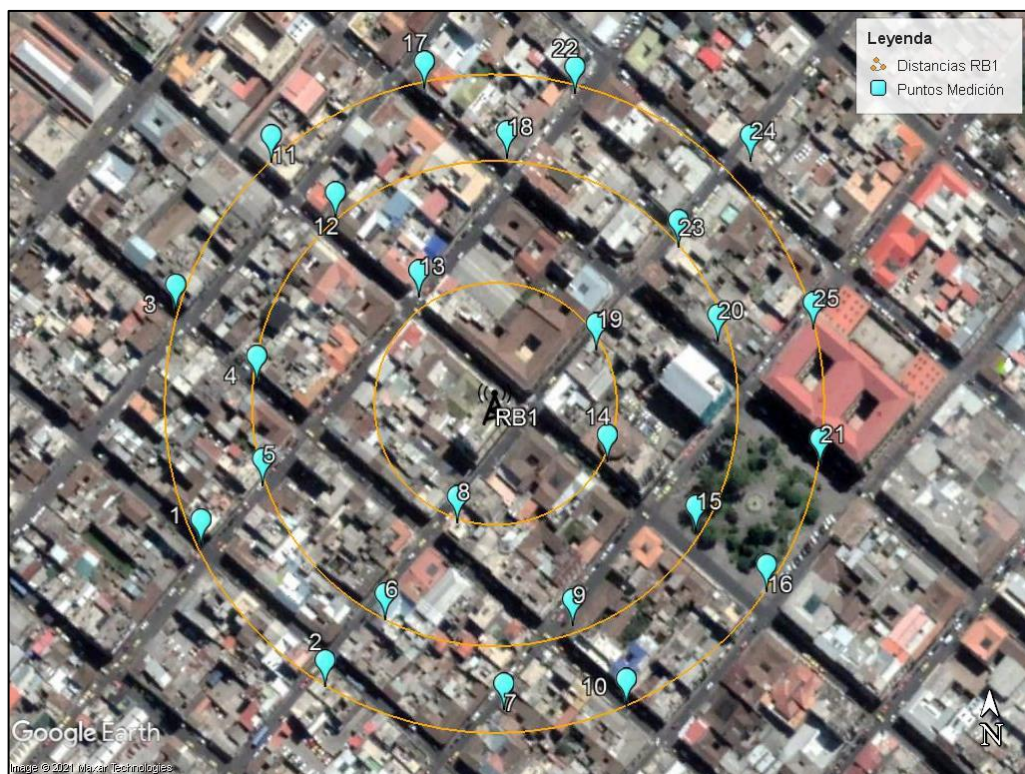


Figura 4-2: Puntos de medición de la radiobase RB1

Realizado por: Benítez, P. 2021

La figura 4-2 muestra los puntos de la radiobase RB1. El primer círculo comprende 4 puntos con una distancia promedio de 65.02 m, el segundo círculo tiene 9 puntos con una distancia promedio de 126.22 m y el tercer círculo tiene 12 puntos con una distancia promedio de 172.25 m; dando un total de 25 puntos de medición para la primera radio base. En la tabla 2-2 se indican las coordenadas y altura de cada punto tomadas con el equipo Spectra Mobile 50.

Tabla 2-2: Ubicación de los puntos de medición de la radiobase RB1

N°	Coordenadas		Altura (m.s.n.m)
	Latitud	Longitud	
1	1°40'19.33"S	78°39'11.23"O	2756.156
2	1°40'21.75"S	78°39'9.13"O	2756.230
3	1°40'15.34"S	78°39'11.65"O	2752.725
4	1°40'16.55"S	78°39'10.27"O	2764.952
5	1°40'18.30"S	78°39'10.18"O	2759.987
6	1°40'20.60"S	78°39'8.10"O	2753.399
7	1°40'22.14"S	78°39'6.07"O	2754.960
8	1°40'18.94"S	78°39'6.86"O	2755.256
9	1°40'20.70"S	78°39'4.90"O	2754.083
10	1°40'22.06"S	78°39'3.98"O	2756.490
11	1°40'12.81"S	78°39'10.02"O	2762.576
12	1°40'13.78"S	78°39'8.93"O	2759.289
13	1°40'15.10"S	78°39'7.52"O	2760.062
14	1°40'17.89"S	78°39'4.31"O	2756.468
15	1°40'19.10"S	78°39'2.80"O	2753.014
16	1°40'20.11"S	78°39'1.59"O	2752.754
17	1°40'11.55"S	78°39'7.42"O	2760.823
18	1°40'12.73"S	78°39'6.02"O	2762.641
19	1°40'16.00"S	78°39'4.50"O	2762.675
20	1°40'15.85"S	78°39'2.43"O	2752.798
21	1°40'17.96"S	78°39'0.68"O	2753.740
22	1°40'11.63"S	78°39'4.86"O	2758.924
23	1°40'14.24"S	78°39'3.10"O	2756.495
24	1°40'12.79"S	78°39'1.87"O	2762.049
25	1°40'15.64"S	78°39'0.80"O	2768.636

Realizado por: Benítez, P. 2021.

Los puntos seleccionados para las mediciones de la radiobase RB2 se muestran en la figura 5-2.

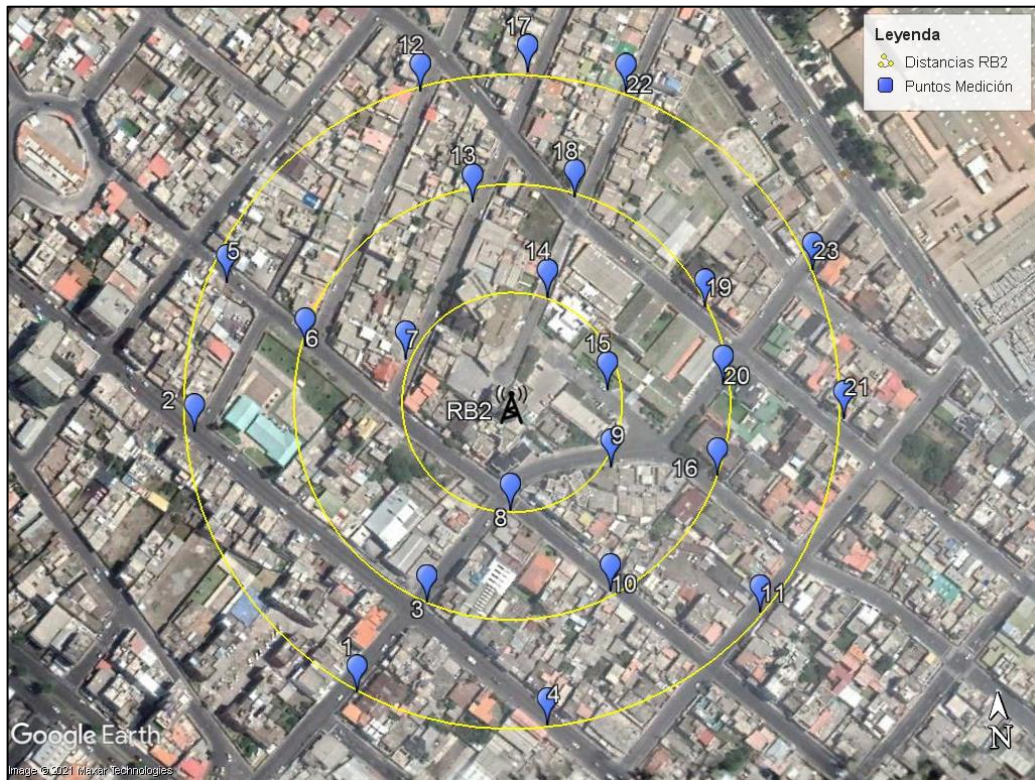


Figura 5-2: Puntos de medición de la radiobase RB1

Realizado por: Benítez, P. 2021

El primer círculo comprende 5 puntos con una distancia promedio de 60.80 m, el segundo círculo tiene 8 puntos con una distancia promedio de 119.09 m y el tercer círculo tiene 10 puntos con una distancia promedio de 182.11 m; dando un total de 23 puntos de medición para la segunda radio base. En la tabla 3-2 se indican las coordenadas y altura de cada punto tomadas con el equipo Spectra Mobile 50.

Tabla 3-2: Ubicación de los puntos de medición de la radiobase RB2

N°	Coordenadas		Altura (m.s.n.m)
	Latitud	Longitud	
1	1°39'51.66"S	78°39'29.31"O	2772.020
2	1°39'46.80"S	78°39'32.10"O	2774.074
3	1°39'50.04"S	78°39'27.97"O	2770.028
4	1°39'52.37"S	78°39'25.84"O	2767.844
5	1°39'44.12"S	78°39'31.40"O	2779.931
6	1°39'45.31"S	78°39'30.01"O	2783.389
7	1°39'45.60"S	78°39'28.20"O	2787.583
8	1°39'48.40"S	78°39'26.40"O	2775.543
9	1°39'47.65"S	78°39'24.56"O	2783.084

Tabla 3-2: (Continuación)

10	1°39'49.93"S	78°39'24.62"O	2772.144
11	1°39'50.40"S	78°39'21.90"O	2770.153
12	1°39'40.79"S	78°39'27.80"O	2782.900
13	1°39'42.82"S	78°39'26.91"O	2788.396
14	1°39'44.58"S	78°39'25.62"O	2792.660
15	1°39'46.25"S	78°39'24.59"O	2785.891
16	1°39'47.87"S	78°39'22.63"O	2777.852
17	1°39'40.49"S	78°39'25.86"O	2782.428
18	1°39'42.80"S	78°39'25.08"O	2788.888
19	1°39'44.82"S	78°39'22.79"O	2785.433
20	1°39'46.20"S	78°39'22.50"O	2782.978
21	1°39'46.90"S	78°39'20.30"O	2777.835
22	1°39'40.90"S	78°39'24.10"O	2758.924
23	1°39'44.20"S	78°39'20.80"O	2782.751

Realizado por: Benítez, P. 2021.

2.5. Equipos utilizados en las mediciones

2.5.1. Medidor Narda SRM-3006

El equipo Narda SRM es un medidor de frecuencia selectiva utilizado para mediciones de campos electromagnéticos en el rango de 9 kHz a 6 GHz, ha sido diseñado para uso en exteriores y en lugares de medición de difícil acceso. El equipo de medición completo para determinar la intensidad de campo comprende la Unidad Básica SRM-3006 con una antena que puede estar montada directamente sobre ella como se muestra en la figura 6-2. (Narda Safety Test Solutions, 2017: pp. 2-4)



Figura 6-2: Equipo Narda SRM-3006

Fuente: Narda Safety Test Solutions, 2017

2.5.1.1. Partes del equipo

El equipo consta principalmente de las partes mostradas en la figura 7-2 y detalladas en la tabla 4-2.



Figura 7-2: Equipo Narda SRM-3006

Fuente: Narda Safety Test Solutions, 2017, p. 25

Tabla 4-2: Descripción de las partes del equipo Narda SRM-3006

N°	Elemento	N°	Elemento
1	Panel LCD	7	Indicador de carga
2	Receptor GPS	8	Tecla de encendido/apagado
3	Teclas programables verticales	9	Teclas programables horizontales
4	Micrófono	10	Conector N
5	Teclado y control giratorio	11	Conector Multi-pin
6	Indicador de estado		

Fuente: Narda Safety Test Solutions, 2017: pp. 25–26

Realizado por: Benítez, P. 2021.

2.5.1.2. Antenas

El equipo incluye una antena triaxial o de tres ejes la cual permite realizar mediciones isotrópicas con determinación automática de las tres componentes espaciales del campo a medir. Existen otras antenas que son de eje único y tres ejes para la medición de campos eléctricos o magnéticos que cubran otras aplicaciones y rangos de frecuencia (Narda Safety Test Solutions, 2017, p. 5).

Tabla 5-2: Tipo de antenas

Tipo	Tipo de campo	Rango de frecuencia
Three Axis	Campo eléctrico	420 MHz – 6 GHz
Three Axis	Campo eléctrico	27 MHz – 3 GHz
Single Axis	Campo eléctrico	27 MHz – 3 GHz
Single Axis	Campo eléctrico	9 kHz – 300 MHz
Three Axis	Campo magnético	9 kHz – 250 MHz
Single Axis	Campo magnético	9 kHz – 300 MHz

Fuente: Narda Safety Test Solutions, 2017, p. 6

Realizado por: Benítez, P. 2021.

La tabla 5-2 muestra los tipos de antenas con el tipo de campo y su rango de frecuencia. La antena utilizada en las mediciones de campo eléctrico fue la Three Axis de 27 MHz a 3 GHz.

2.5.2. Spectra Precision Mobile Mapper 50

Mobile Mapper 50 es un colector de datos de sistemas de información geográfica (GIS) mediante smartphone con Android. Ofrece una localización tri-constelación ya sea GPS + Galileo+ Glonass o GPS + Galileo + Beidou y también posprocesamiento, es compatible con receptores GNSS SP60 y SP80 (Trimble Inc, 2017, p. 1). El receptor utilizado fue el SP60 que proporciona una máxima precisión en cualquier lugar y condición. El equipo completo para la recolección de coordenadas y alturas de los puntos de medición se muestra en la figura 8-2. Se utilizó el trípode en lugar del bastón ya que permitió establecer una altura de 1.5 m para la recolección de los datos.



Figura 8-2: Equipo Spectra Precision

Fuente: <https://instrumentalyoptica.com.ec/wp-content/uploads/2019/07/sp60-600x600.jpg>

2.6. Campaña de mediciones

Se realizó un levantamiento de información para determinar la sub-banda en la que opera Claro con la tecnología LTE en banda 1900 MHz. La operadora Claro tiene asignado los siguientes bloques de frecuencia indicados en la tabla 6-2.

Tabla 6-2: Canalización en la banda 1900 MHz de CONECEL S.A

Banda	Bloques	Límite Inferior (MHz)	Límite Superior (MHz)	Ancho de Banda (MHz)
1900 MHz	B3	1880	1885	5
	B3'	1960	1965	5
	E	1885	1890	5
	E'	1965	1970	5
	F	1890	1895	5
	F'	1970	1975	5

Fuente: ARCOTEL, 2018, p.7

Realizado por: Benítez, P. 2021.

Los bloques que contienen el símbolo prima (‘) representan al enlace Downlink y los otros al enlace Uplink. En el presente trabajo de titulación se trabajó con Downlink que va desde 1960 a 1975 MHz. Dentro de la banda la operadora Claro tiene a las tecnologías UMTS y LTE, para verificar los límites de la banda correspondiente a LTE se visualizó el espectro de Downlink con el modo espectro del Narda SRM-3006 como se muestra en la figura 9-2

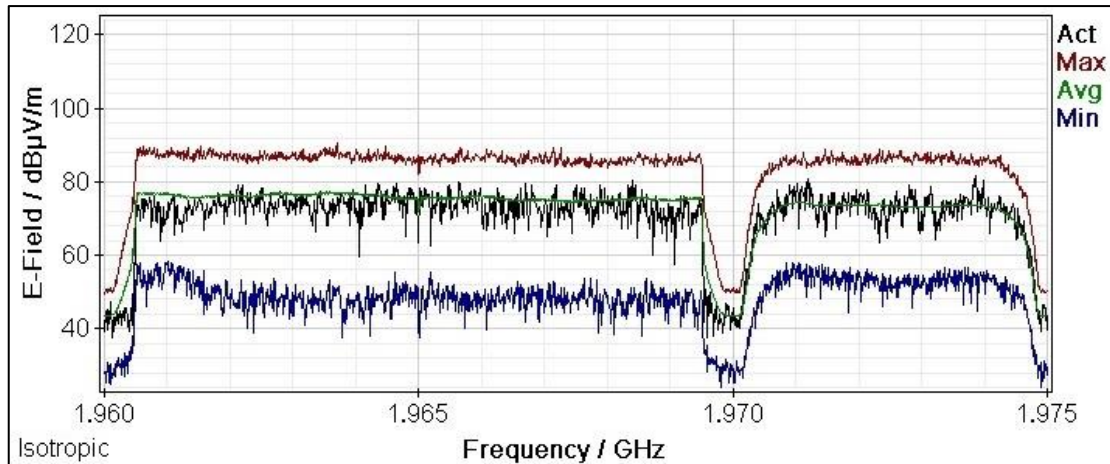


Figura 9-2: Espectro Downlink

Realizado por: Benítez, P. 2021

Considerando que UMTS tiene un ancho de banda de canal de 5 MHz y LTE de 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz se concluyó que la sub-banda perteneciente a LTE va desde 1960 hasta 1970 MHz, además se utilizó la aplicación móvil “LTE Discovery” que proporcionó el valor de EARFCN Downlink de 950 correspondiente a la frecuencia 1965 MHz.

2.6.1. Configuración del equipo Narda SRM-3006

Para realizar las configuraciones de medición en el equipo se utiliza el software de PC SRM-3006 Tools, este establece una comunicación entre el equipo y la PC permitiendo descargar los datos de medición, crear tablas de servicios, entre otras configuraciones. Desde el software se creó una tabla de servicios llamada LTE-1900 donde se estableció los límites de frecuencia y el RBW.

El ancho de banda del canal a medir es de 10 MHz en dicho valor el ancho de banda real ocupado es de 9 MHz dejando 1 MHz como banda de guarda repartido a 0.5 MHz en cada extremo. Las subportadoras están separadas 15 kHz entre ellas, con el fin de que la medición concuerde con las frecuencias subportadoras se estableció un RBW de 30kHz. Considerando los aspectos mencionados los valores establecidos para configuración de las mediciones se muestran en la figura 10-2.

Edit Service Table Entry			
Lower Frequency	<input type="text" value="1960.5"/>	MHz	<input type="button" value="v"/>
Upper Frequency	<input type="text" value="1969.5"/>	MHz	<input type="button" value="v"/>
Service Name	<input type="text" value="LTE-1900"/>		
RBW	<input type="text" value="30 kHz"/>	<input type="button" value="v"/>	<input type="checkbox"/> Calculate RBW

Figura 10-2: Configuración del servicio

Realizado por: Benítez, P. 2021

2.6.1.1. Modo analizador de espectro

Se utilizó el modo analizador de espectros ya que permitió obtener los valores de campo eléctrico en todo el ancho de banda seleccionado. En la figura 11-2 se muestra un ejemplo de los parámetros utilizados en este modo.

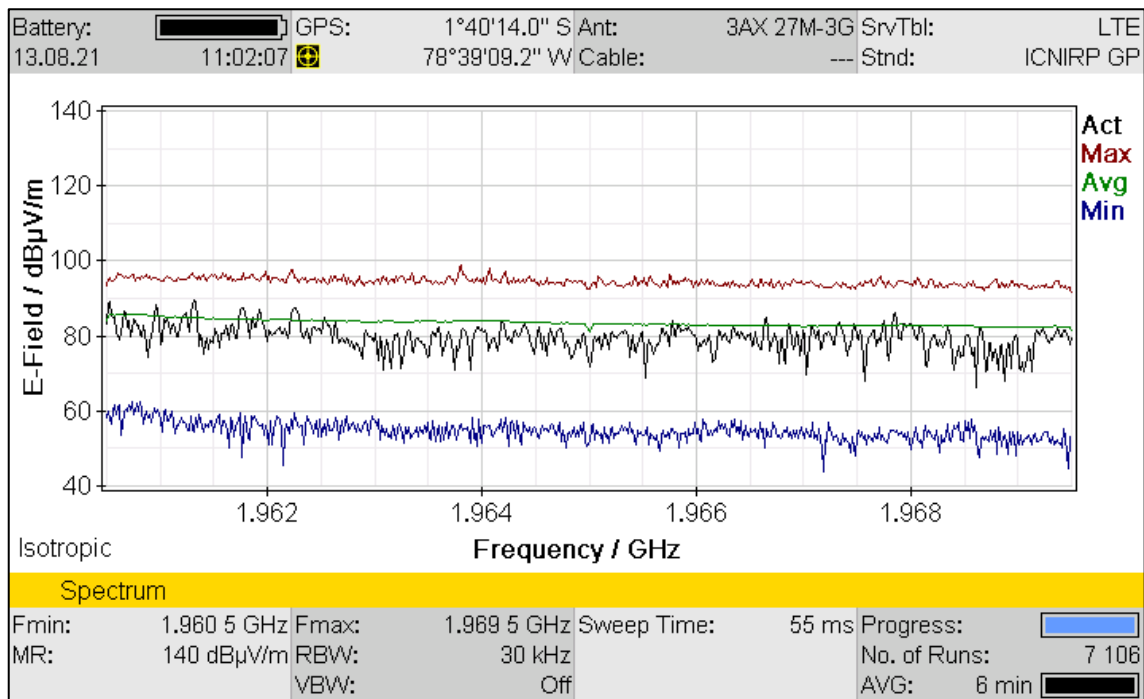


Figura 11-2: Modo analizador de espectro

Realizado por: Benítez, P. 2021

Este modo permite obtener valores de campo actual, máximo, mínimo, promedio entre otros, para este estudio se tomó el valor de campo eléctrico promedio. Otro parámetro importante es el tiempo promedio de medición AVG, se seleccionó un tiempo promedio de 6 minutos ya que es el recomendado por el estándar de la Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones No Ionizantes ICNIRP 1998 GP (ICNIRP, 1999).

2.6.2. Campo eléctrico medido

En cada punto se realizaron dos mediciones de 6 minutos con el objetivo de realizar un promediado ya que la lectura de una sola medición puede no ser confiable debido a las condiciones mismas de propagación. Debido a que la señal medida es de banda ancha se debe calcular el valor de campo eléctrico total de la señal en todo el ancho de banda, para ello se utiliza la ecuación 1-2.

$$E_t = E + 10 \log(BW/RBW) \quad \text{Ec. 1-2}$$

Donde

E_t : intensidad de campo eléctrico total (dBuV/m)

E : intensidad de campo eléctrico promedio (dBuV/m)

BW : ancho de banda de la señal (Hz)

RBW : ancho de banda de resolución (Hz)

A continuación, se indican los valores de campo eléctrico de todos los puntos correspondientes a cada círculo de las radio bases RB1 y RB2. Se muestran también las fotografías de los entornos de 4 puntos representativos por cada círculo, no se muestran las demás debido a que su entorno es similar a los presentados.

2.6.2.1. RB1

En la figura 4-2 del apartado 2.4 el primer círculo comprende los puntos 13, 19, 14 y 8 que se presentan a continuación en la figura 12-2.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 12-2: Puntos del primer círculo RB1: (a) 13, (b) 19, (c) 14 y (d) 8
Realizado por: Benítez, P. 2021

Tabla 7-2: Valores de campo eléctrico medidos del primer círculo RB1

Primer Círculo	
Nº punto medición	Campo eléctrico (dB μ V/m)
13	103,2699
19	110,5017
14	114,1394
8	107,1323

Realizado por: Benítez, P. 2021.

En la figura 4-2 del apartado 2.4 el segundo círculo comprende los puntos 9, 4, 18, 20, 12, 15, 23, 6 y 5 de los cuales se presentan 4 puntos en la figura 13-2.



(a)

(b)



Figura 13-2: Puntos del segundo círculo RB1: (a) 9, (b) 4, (c) 18 y (d) 20

Realizado por: Benítez, P. 2021

Tabla 8-2: Valores de campo eléctrico medidos del segundo círculo RB1

Segundo Círculo	
N° punto medición	Campo eléctrico (dB μ V/m)
9	101,5069
4	96,164
18	103,5184
20	94,6311
12	108,0727
15	101,7631
23	115,2024
6	102,8097
5	92,7753

Realizado por: Benítez, P. 2021.

En la figura 4-2 del apartado 2.4 el tercer círculo comprende los puntos 11, 25, 7, 21, 17, 22, 24, 16, 10, 2, 1 y 3 de los cuales se presentan 4 puntos en la figura 14-2.

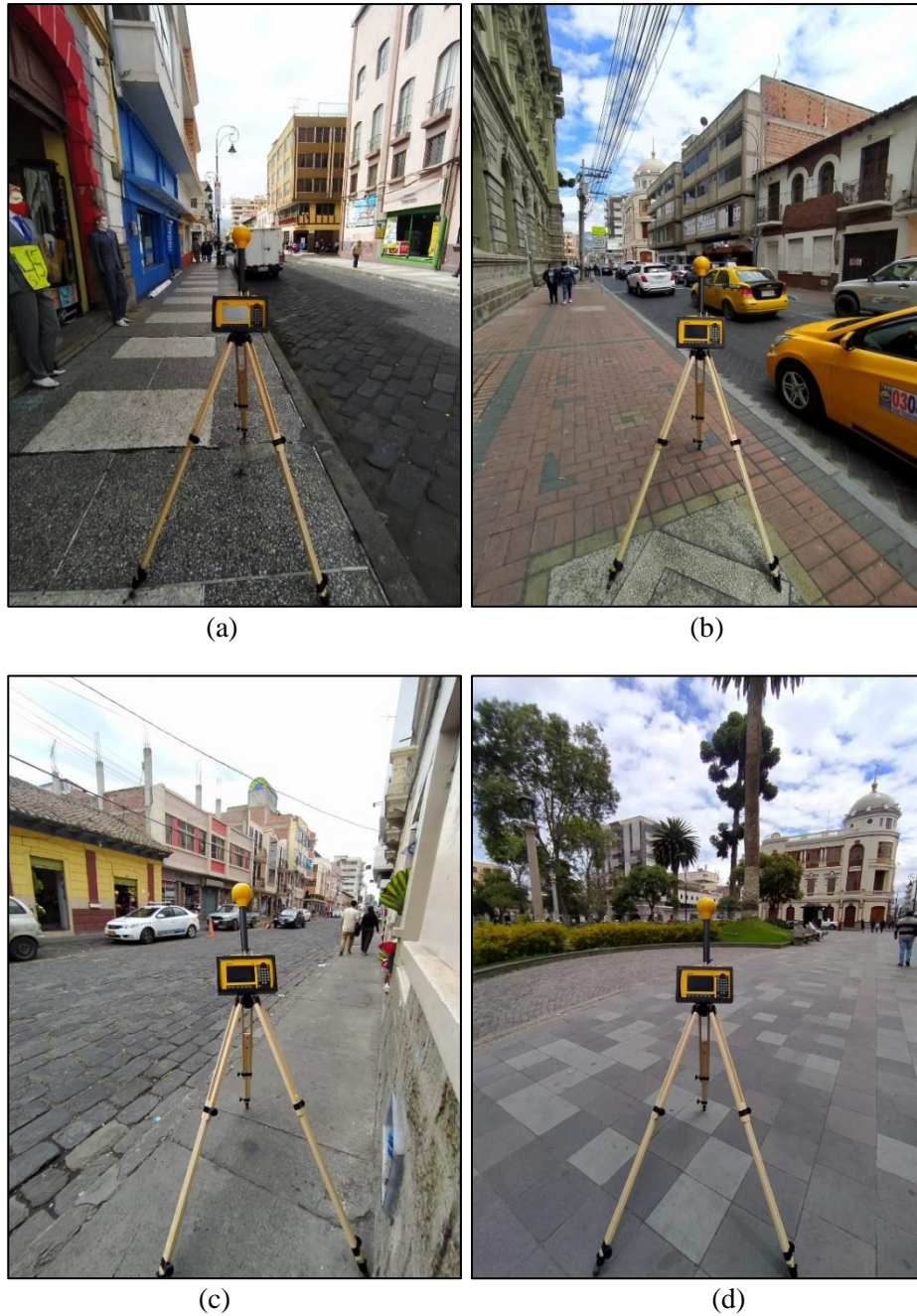


Figura 14-2: Puntos del tercer círculo RB1: (a) 11, (b) 25, (c) 7 y (d) 21

Realizado por: Benítez, P. 2021

Tabla 9-2: Valores de campo eléctrico medidos del tercer círculo RB1

Tercer Círculo	
N° punto medición	Campo eléctrico (dB μ V/m)
11	103,1518
25	92,6163
7	99,2188
21	105,8688
17	91,1583
22	89,7237
24	119,9882

Tabla 9-3: (Continuación)

16	100,4209
10	102,0416
2	104,5308
1	91,4868
3	102,5967

Realizado por: Benítez, P. 2021.

2.6.2.2. RB2

En la figura 5-2 del apartado 2.4 el primer círculo comprende los puntos 14, 15, 7 8 y 9 de los cuales se presentan 4 puntos en la figura 15-2.

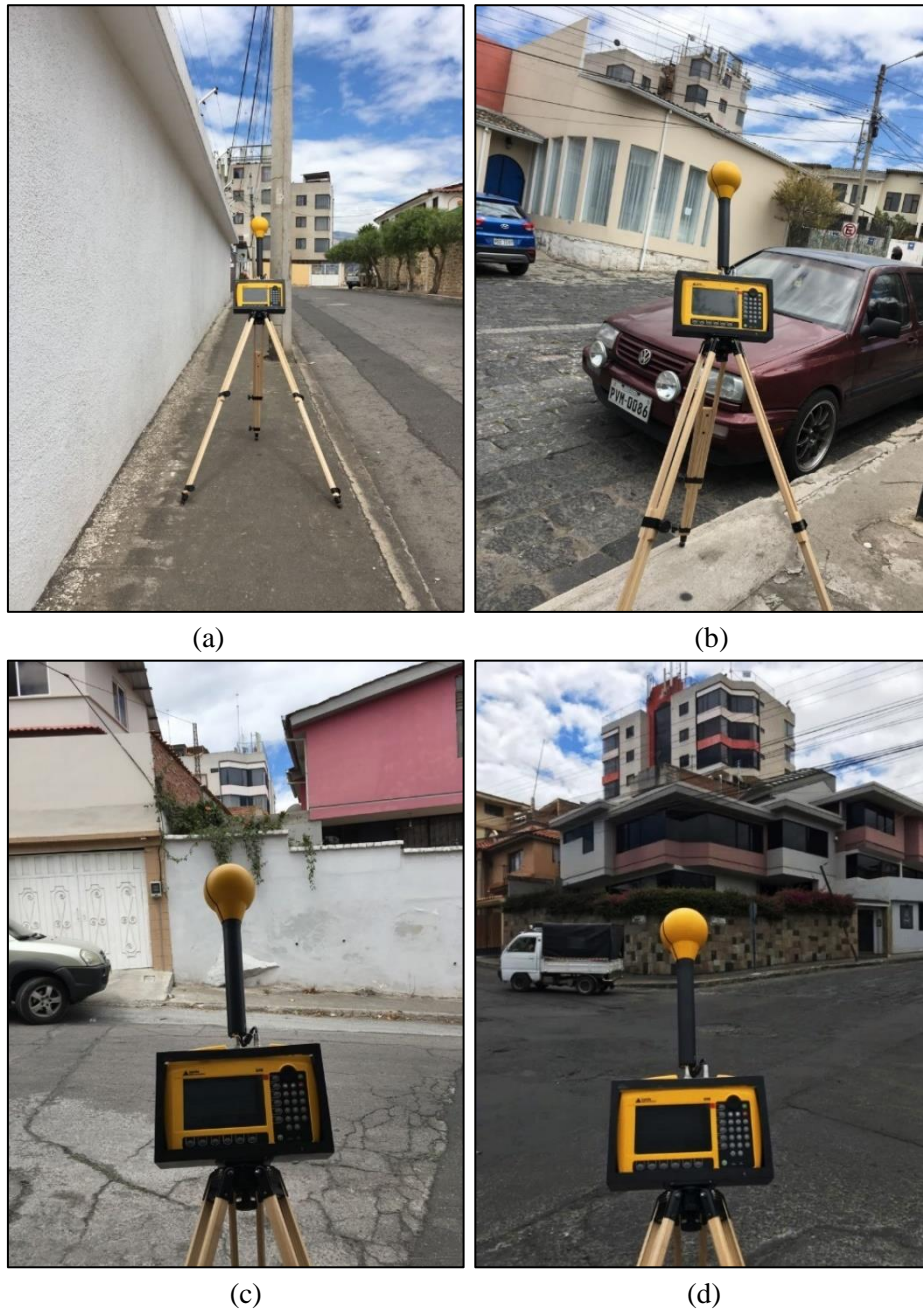


Figura 15-2: Puntos del primer círculo RB2: (a) 14, (b) 15, (c) 7 y (d) 8

Realizado por: Benítez, P. 2021

Tabla 10-2: Valores de campo eléctrico medidos del primer círculo RB2

Primer Círculo	
Nº punto medición	Campo eléctrico (dB μ V/m)
14	114,1234
15	105,0699
7	109,2979
8	117,2744
9	106,4164

Realizado por: Benítez, P. 2021.

En la figura 5-2 del apartado 2.4 el segundo círculo comprende los puntos 18, 20, 6, 10, 3, 16 y 13 de los cuales se presentan 4 puntos en la figura 16-2.

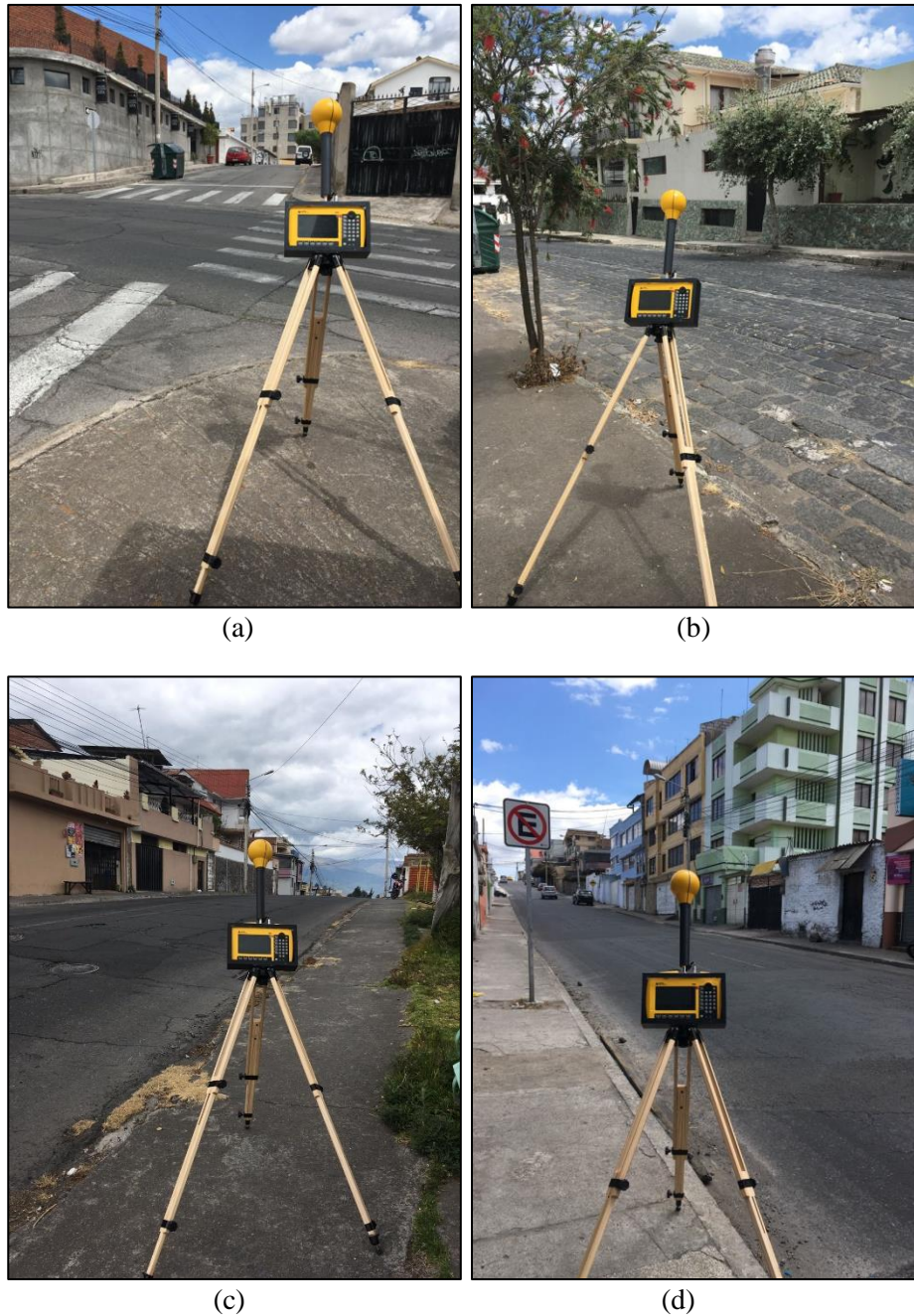


Figura 16-2: Puntos del segundo círculo RB2: (a) 18, (b) 20, (c) 6 y (d) 10
Realizado por: Benítez, P. 2021

Tabla 11-2: Valores de campo eléctrico medidos del segundo círculo RB2

Segundo Círculo	
Nº punto medición	Campo eléctrico (dBµV/m)
18	128,9833
20	98,8945
6	104,914
10	101,9085
3	105,0173
16	101,0346
13	95,9162

Realizado por: Benítez, P. 2021.

En la figura 5-2 del apartado 2.4 el tercer círculo comprende los puntos 4, 2, 12, 17, 22, 23, 21, 11,1 y 5 de los cuales se presentan 4 puntos en la figura 17-2.

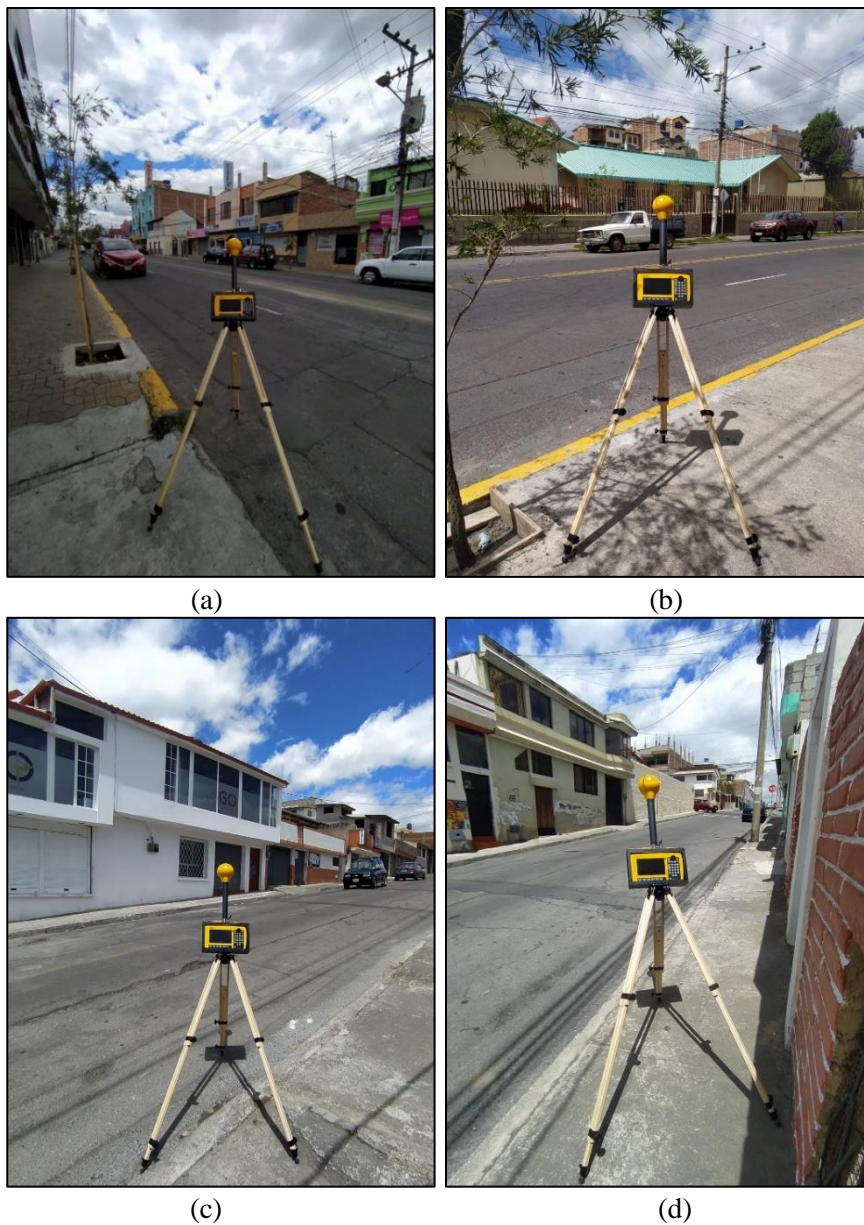


Figura 17-2: Puntos del tercer círculo RB2: (a) 4, (b) 2, (c) 12 y (d) 17
Realizado por: Benítez, P. 2021

Tabla 12-2: Valores de campo eléctrico medidos del tercer círculo RB2

Tercer Círculo	
Nº punto medición	Campo eléctrico (dBµV/m)
4	107,413
2	107,0672
12	91,6426
17	97,3973
22	120,8258
23	97,9131
21	95,5334
11	111,3658
1	104,33
5	119,5813

Realizado por: Benítez, P. 2021.

2.7. Cálculo teórico de las pérdidas de propagación

Para determinar las pérdidas de propagación es necesario obtener primero los datos necesarios que requiere cada modelo de propagación. Todos los modelos necesitan la distancia desde la estación base hasta la antena receptora, para su cálculo se utilizó la ecuación 2-2 que es la fórmula de la distancia entre 2 puntos.

$$d = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2} \quad \text{Ec. 2-2}$$

Se realizaron los cálculos de la distancia con las coordenadas UTM de la estación base y los puntos de medición, tomando a la coordenada Este como X y a la coordenada Norte como Y. Para todos los modelos se utiliza la frecuencia central del canal correspondiente a 1965 MHz.

2.7.1. Modelo COST-231 Hata

Este modelo de propagación considera la altura efectiva de la antena transmisora. La altura efectiva es la altura por encima del nivel medio del terreno donde se encuentre la antena en dirección al receptor y se la calcula mediante la ecuación 3-2

$$h_{ef} = h_t + c(0) - h_m \quad \text{Ec. 3-2}$$

Donde

h_t : altura de la antena transmisora sobre el suelo (m)

$c(0)$: altura del terreno al pie de la antena (m)

h_m : altura del receptor considerando la altura del terreno (m)

Dado que la altura del móvil h_m es igual a 1,5 m, el modelo indica que no se debe realizar una corrección de la antena móvil por lo tanto $a(h_m) = 0$. Al considerarse a Riobamba como una ciudad mediana y a los entornos de medición como áreas urbanas el factor de corrección para el tipo de ambiente $C_M = 0$. Con estas consideraciones se realizó el cálculo de las pérdidas básicas utilizando la ecuación 9-1 explicada en el capítulo 1.

En la tabla 13-2 se muestran los datos utilizados para el cálculo de las pérdidas básicas de propagación y su valor en cada punto de la radio base RB1.

Tabla 13-2: Valores calculados para RB1 con el modelo COST-231

Hata

Punto	Distancia (m)	hef (m)	Lb (dB)
13	68,8186	27,438	96,8302
19	59,9416	24,825	94,9549
14	66,1891	31,032	95,904
8	65,146	32,244	95,561
12	128,316	28,211	106,3336
18	129,1395	24,859	106,8713
23	127,0157	31,005	105,8509
20	121,5648	34,702	104,7988
15	125,3994	34,486	105,2898
9	123,0325	33,417	105,1091
6	127,0157	34,101	105,5223
5	129,0271	27,513	106,5055
4	125,4831	22,548	106,7606
11	171,9448	24,924	111,3072
17	169,0976	26,677	110,7893
22	168,3241	28,576	110,4571
24	185,3483	25,451	112,3907
25	172,4674	18,864	112,4215
21	173,9684	33,76	110,3233
16	173,358	34,746	110,1596
10	172,4094	31,01	110,5123
7	160,05	32,54	109,1974
2	173,2166	31,27	110,5516
1	171,7586	31,344	110,4136
3	175	34,775	110,2988

Realizado por: Benítez, P. 2021.

La tabla 14-2 muestra los datos utilizados para el cálculo de las pérdidas básicas de propagación y su valor en cada punto de la radio base RB2.

Tabla 14-2: Valores calculados para RB2 con el modelo COST-231

Hata

Punto	Distancia (m)	hef (m)	Lb (dB)
14	61,6847	14,54	96,7699
15	53,4603	21,309	93,5416
9	64,8999	24,116	96,2653
8	59,0762	31,657	94,1196
7	64,8845	19,617	96,8032
18	119,2183	18,312	106,6613
19	120,3412	21,767	106,2252
20	118,3427	24,222	105,6027
16	121,8401	29,348	105,403
10	118,0678	35,056	104,3234
3	120,7684	37,172	104,4663
6	120,5031	23,811	105,9422
13	113,6002	18,804	105,8055
22	184,954	48,276	109,8501
23	183,8478	24,449	112,4218
21	186,4537	29,365	111,9212
11	181,3725	37,047	110,5931
4	181,5406	39,356	110,3716
1	184,201	35,18	111,0281
2	179,2261	33,126	110,8479
5	174,0488	27,269	111,1506
12	180,9447	24,3	112,198
17	184,5318	24,772	112,4281

Realizado por: Benítez, P. 2021.

2.7.2. Modelo Walfisch-Bertoni

Este modelo tiene en cuenta la altura de la antena de la estación base a nivel del suelo h_b , la altura media de los edificios h_R , la distancia entre los centros de los edificios b y la altura de la antena transmisora sobre los edificios próximos H . Los valores mencionados junto con el cálculo de la pérdida básica obtenida con la ecuación 16-1 tratada en el capítulo 1 se muestran a continuación.

La tabla 15-2 muestra los valores para la radio base RB1 considerando una altura h_b de 24 metros.

Tabla 15-2: Valores calculados para RB1 con el modelo Walfisch-Bertoni

Punto	Distancia (m)	h_R (m)	b (m)	H (m)	Lb (dB)
13	68,8186	14	25,3138	10	96,8302
19	59,9416	14	24,0626	10	94,9549
14	66,1891	14	24,4906	10	95,904
8	65,146	14	21,8768	10	95,561
12	128,316	14	22,1352	10	106,3336

Tabla 15-2: (Continuación)

18	129,1395	14	25,7778	10	106,8713
23	127,0157	16	22,4462	8	105,8509
20	121,5648	16	25,4976	8	104,7988
15	125,3994	15	22,46	9	105,2898
9	123,0325	12	27,56	12	105,1091
6	127,0157	12	19,3564	12	105,5223
5	129,0271	12	22,1718	12	106,5055
4	125,4831	12	23,2914	12	106,7606
11	171,9448	14	24,4366	10	111,3072
17	169,0976	12	24,0702	12	110,7893
22	168,3241	14	24,052	10	110,4571
24	185,3483	14	22,8764	10	112,3907
25	172,4674	12	25,6262	12	112,4215
21	173,9684	9	23,3384	15	110,3233
16	173,358	12	23,7	12	110,1596
10	172,4094	12	23,6856	12	110,5123
7	160,05	12	23,4672	12	109,1974
2	173,2166	12	20,3362	12	110,5516
1	171,7586	14	26,6374	10	110,4136
3	175	12	24,644	12	110,2988

Realizado por: Benítez, P. 2021.

La tabla 16-2 muestra los valores para la radio base RB2 considerando una altura h_b de 15 metros.

Tabla 16-2: Valores calculados para RB2 con el modelo Walfisch-Bertoni

Punto	Distancia (m)	h_R (m)	b (m)	H (m)	L_b (dB)
14	61,6847	6	19,1292	9	87,1466
15	53,4603	6	25,4986	9	82,4744
9	64,8999	6	25,7336	9	85,6059
8	59,0762	6	24,0212	9	84,6072
7	64,8845	6	21,036	9	87,2242
18	119,2183	6	30,858	9	94,2105
19	120,3412	6	24,8356	9	96,126
20	118,3427	6	27,2882	9	95,086
16	121,8401	6	25,7084	9	96,0528
10	118,0678	9	24,8378	6	103,2442
3	120,7684	6	24,6604	9	96,2421
6	120,5031	9	25,3704	6	103,4171
13	113,6002	6	18,4934	9	97,5309
22	184,954	6	18,5936	9	105,6213
23	183,8478	6	25,6078	9	102,9534
21	186,4537	6	25,1654	9	103,3305
11	181,3725	6	25,5374	9	102,7481
4	181,5406	9	35,51	6	107,5672
1	184,201	6	27,1202	9	102,5213

Tabla 16-2: (Continuación)

2	179,2261	9	35,0582	6	107,4557
5	174,0488	6	24,3784	9	102,432
12	180,9447	6	20,4996	9	104,4755
17	184,5318	6	19,4882	9	105,2089

Realizado por: Benítez, P. 2021.

2.7.3. Modelo COST-231 Walfisch-Ikegami

Dentro de los parámetros importantes que considera el modelo de propagación COST-231 Walfisch-Ikegami se encuentran el ancho de las calles donde se encuentra el móvil w , la separación entre los centros de los edificios b y el ángulo entre el rayo incidente y el eje de la calle φ . Para recopilar la información de estos parámetros se utilizó el plano de Riobamba en AutoCAD proporcionado por la Dirección de Gestión de Ordenamiento Territorial del municipio de la ciudad.

Los datos obtenidos con la herramienta mencionada junto con el cálculo de la pérdida básica obtenida con las ecuaciones 19-1 y 20-1 dependiendo del caso tratadas en el capítulo 1, se muestran a continuación.

La tabla 17-2 presenta los valores para la radio base RB1 considerando una altura h_b de 24 metros.

Tabla 17-2: Valores calculados para RB1 con el modelo COST-231 Walfisch-Ikegami

Punto	Distancia (m)	h_R (m)	w (m)	b (m)	Φ (°)	L_b (dB)
13	68,8186	14	12,6569	25,3138	78	78,2476
19	59,9416	14	12,0313	24,0626	25	90,2085
14	66,1891	14	12,2453	24,4906	11	86,6998
8	65,146	14	10,9384	21,8768	20	90,5829
12	128,316	14	11,0676	22,1352	6	96,6735
18	129,1395	14	12,8889	25,7778	52	107,1544
23	127,0157	16	11,2231	22,4462	13	101,7479
20	121,5648	16	12,7488	25,4976	54	109,2549
15	125,3994	15	11,23	22,46	7	97,9445
9	123,0325	12	13,78	27,56	57	102,9799
6	127,0157	12	9,6782	19,3564	10	96,2204
5	129,0271	12	11,0859	22,1718	31	102,8583
4	125,4831	12	11,6457	23,2914	40	103,797
11	171,9448	14	12,2183	24,4366	5	100,3303
17	169,0976	12	12,0351	24,0702	35	108,0736
22	168,3241	14	12,026	24,052	24	106,8949
24	185,3483	14	11,4382	22,8764	83	89,435
25	172,4674	12	12,8131	25,6262	38	108,1074

Tabla 17-2: (Continuación)

21	173,9684	9	11,6692	23,3384	29	102,1072
16	173,358	12	11,85	23,7	5	97,8976
10	172,4094	12	11,8428	23,6856	27	105,6683
7	160,05	12	11,7336	23,4672	39	107,6754
2	173,2166	12	10,1681	20,3362	8	100,2186
1	171,7586	14	13,3187	26,6374	69	110,2194
3	175	12	12,322	24,644	27	105,5871

Realizado por: Benítez, P. 2021.

La tabla 18-2 muestra los valores para la radio base RB2 considerando una altura h_b de 15 metros.

Tabla 18-2: Valores calculados para RB2 con el modelo COST-231 Walfisch-Ikegami

Punto	Distancia (m)	h_R (m)	w (m)	b(m)	Φ (°)	Lb (dB)
14	61,6847	6	9,5646	19,1292	4	76,9468
15	53,4603	6	12,7493	25,4986	47	75,3961
9	64,8999	6	12,8668	25,7336	40	86,7847
8	59,0762	6	12,0106	24,0212	52	86,7013
7	64,8845	6	10,518	21,036	86	86,035
18	119,2183	6	15,429	30,858	70	84,4522
19	120,3412	6	12,4178	24,8356	63	97,4813
20	118,3427	6	13,6441	27,2882	45	96,5898
16	121,8401	6	12,8542	25,7084	20	91,4545
10	118,0678	9	12,4189	24,8378	23	99,5163
3	120,7684	6	12,3302	24,6604	17	84,598
6	120,5031	9	12,6852	25,3704	27	101,1066
13	113,6002	6	9,2467	18,4934	35	98,375
22	184,954	6	9,2968	18,5936	3	89,4109
23	183,8478	6	12,8039	25,6078	28	101,1331
21	186,4537	6	12,5827	25,1654	35	104,0104
11	181,3725	6	12,7687	25,5374	89	101,0573
4	181,5406	9	17,755	35,51	48	108,9285
1	184,201	6	13,5601	27,1202	13	89,3648
2	179,2261	9	17,5291	35,0582	48	108,8224
5	174,0488	6	12,1892	24,3784	18	97,0641
12	180,9447	6	10,2498	20,4996	41	105,6575
17	184,5318	6	9,7441	19,4882	20	100,591

Realizado por: Benítez, P. 2021.

2.8. Cálculo teórico del campo eléctrico

Una vez obtenido las pérdidas básicas de cada modelo de propagación se calculó la intensidad del campo eléctrico E con la ecuación 4-2.

$$E = P_t - L_b + 20 \log f + 107,2 \quad \text{Ec. 4-2}$$

Donde

E : intensidad de campo eléctrico (dBu)

P_t : potencia radiada PIRE (dBW)

L_b : pérdida básica (dB)

f : frecuencia (MHz)

La potencia isotrópica radiada aparente PIRE se calcula con la ecuación 5-2.

$$PIRE = P_t - L_{con} - L_{cable} + G_{ant} \quad \text{Ec. 4-2}$$

Donde

$PIRE$: potencia isotrópica radiada aparente (dBW)

P_t : potencia de transmisión (dBW)

L_{con} : pérdidas por conectores (dB)

L_{cable} : pérdidas por el cable (dB)

G_{ant} : ganancia de la antena transmisora (dB)

Para el cálculo de PIRE se utilizaron datos generales empleados en antenas de telefonía móvil dando como resultado 30 dBW.

CAPITULO III

3. MARCO DE RESULTADOS

3.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las pérdidas básicas de propagación estimados por los modelos COST-231 Hata, Walfisch-Bertoni y COST-231 Walfisch-Ikegami. Así también el campo eléctrico obtenido con dichas pérdidas y su comparación con las mediciones reales realizadas, mediante procesos estadísticos con el software R para determinar el modelo de propagación que mejor se ajusta a las condiciones de la zona centro de la ciudad de Riobamba.

3.2. Pérdidas de propagación

En la tabla 1-3 se muestran los resultados de las pérdidas de propagación en los puntos de medición de la radio base RB1 calculadas con las ecuaciones que proporciona cada modelo. Los puntos se han ordenado desde la distancia más corta.

Tabla 1-3: Pérdidas básicas de propagación en los puntos de la radio base RB1

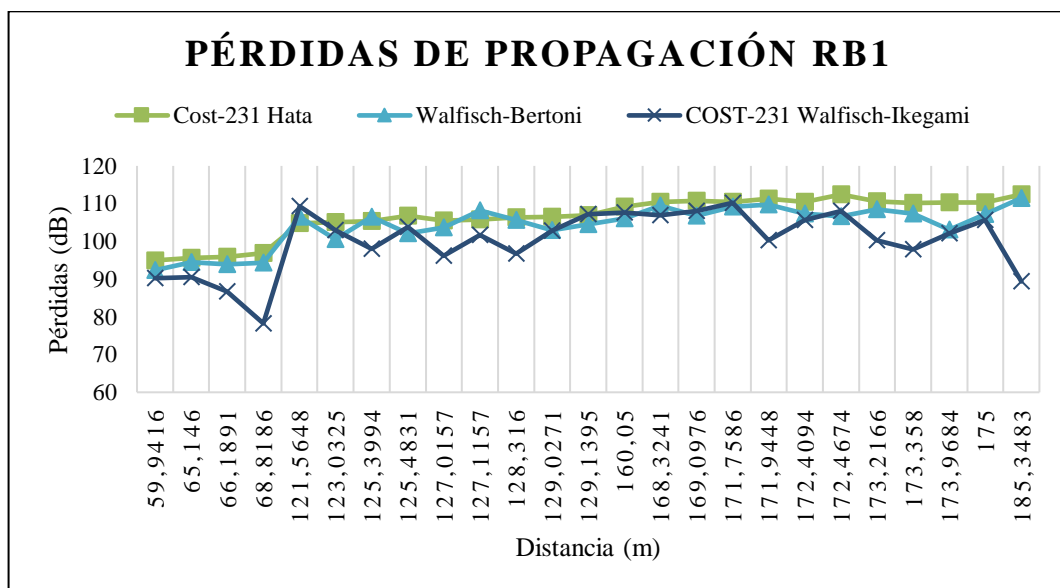
Puntos	Distancia (m)	Pérdidas Lb (dB)		
		COST-231 Hata	Walfisch-Bertoni	COST-231 Walfisch-Ikegami
19	59,9416	94,9549	92,3521	90,2085
8	65,146	95,561	94,4098	90,5829
14	66,1891	95,904	93,8646	86,6998
13	68,8186	96,8302	94,2691	78,2476
20	121,5648	104,7988	106,5151	109,2549
9	123,0325	105,1091	100,4874	102,9799
15	125,3994	105,2898	106,4768	97,9445
4	125,4831	106,7606	102,0782	103,797
6	127,0157	105,5223	103,628	96,2204
23	127,1157	105,8509	108,1348	101,7479
12	128,316	106,3336	105,5701	96,6735
5	129,0271	106,5055	102,906	102,8583
18	129,1395	106,8713	104,5792	107,1544
7	160,05	109,1974	106,0933	107,6754
22	168,3241	110,4571	109,51	106,8949
17	169,0976	110,7893	106,8292	108,0736
1	171,7586	110,4136	109,1053	110,2194
11	171,9448	111,3072	109,7524	100,3303
10	172,4094	110,5123	107,2753	105,6683
25	172,4674	112,4215	106,6929	108,1074
2	173,2166	110,5516	108,4707	100,2186

Tabla 1-3: (Continuación)

16	173,358	110,1596	107,3632	97,8976
21	173,9684	110,3233	103,1354	102,1072
3	175	110,2988	107,2312	105,5871
24	185,3483	112,3907	111,488	89,435

Realizado por: Benítez, P. 2021.

El gráfico 1-3 representa a las pérdidas de propagación vs la distancia de los puntos analizados en la radio base RB1 donde se observa que el modelo COST-231 Walfisch-Ikegami muestra las menores pérdidas respecto a los otros modelos a excepción del punto 20 que se encuentra a una distancia de 121,5648 m, que presenta una pérdida más alta con 109,25 dB; esto se debe a que la arquitectura en ese punto representa a edificios altos con una altura promedio de 16 m, además se encuentra obstruido por dichos edificios lo que impide una línea de vista del receptor con la radio base.

**Gráfico 1-3:** Pérdidas de cada modelo de propagación en los puntos de RB1

Realizado por: Benítez, P. 2021

En la tabla 2-3 se muestran los resultados de las pérdidas de propagación en los puntos de medición de la radio base RB2 calculadas con las ecuaciones que proporciona cada modelo. Los puntos se han ordenado desde la distancia más corta.

Tabla 2-3: Pérdidas básicas de propagación en los puntos de la radio base RB2

Puntos	Distancia (m)	Pérdidas Lb (dB)		
		COST-231 Hata	Walfisch-Bertoni	COST-231 Walfisch-Ikegami
15	53,4603	93,5416	82,4744	75,3961
8	59,0762	94,1196	84,6072	86,7013
14	61,6847	96,7699	87,1466	76,9468

Tabla 2-3: (Continuación)

7	64,8845	96,8032	87,2242	86,035
9	64,8999	96,2653	85,6059	86,7847
13	113,6002	105,8055	97,5309	98,375
10	118,0678	104,3234	103,2442	99,5163
20	118,3427	105,6027	95,086	96,5898
18	119,2183	106,6613	94,2105	84,4522
19	120,3412	106,2252	96,126	97,4813
6	120,5031	105,9422	103,4171	101,1066
3	120,7684	104,4663	96,2421	84,598
16	121,8401	105,403	96,0528	91,4545
5	174,0488	111,1506	102,432	97,0641
2	179,2261	110,8479	107,4557	108,8224
12	180,9447	112,198	104,4755	105,6575
11	181,3725	110,5931	102,7481	101,0573
4	181,5406	110,3716	107,5672	108,9285
23	183,8478	112,4218	102,9534	101,1331
1	184,201	111,0281	102,5213	89,3648
17	184,5318	112,4281	105,2089	100,591
22	184,954	109,8501	105,6213	89,4109
21	186,4537	111,9212	103,3305	104,0104

Realizado por: Benítez, P. 2021.

El gráfico 2-3 representa a las pérdidas de propagación vs la distancia de los puntos analizados en la radio base RB2 donde se observa que el modelo COST-231 Walfisch-Ikegami muestra las menores pérdidas respecto a los otros modelos, el modelo Cost-231 Hata es el que mayor pérdida presenta.

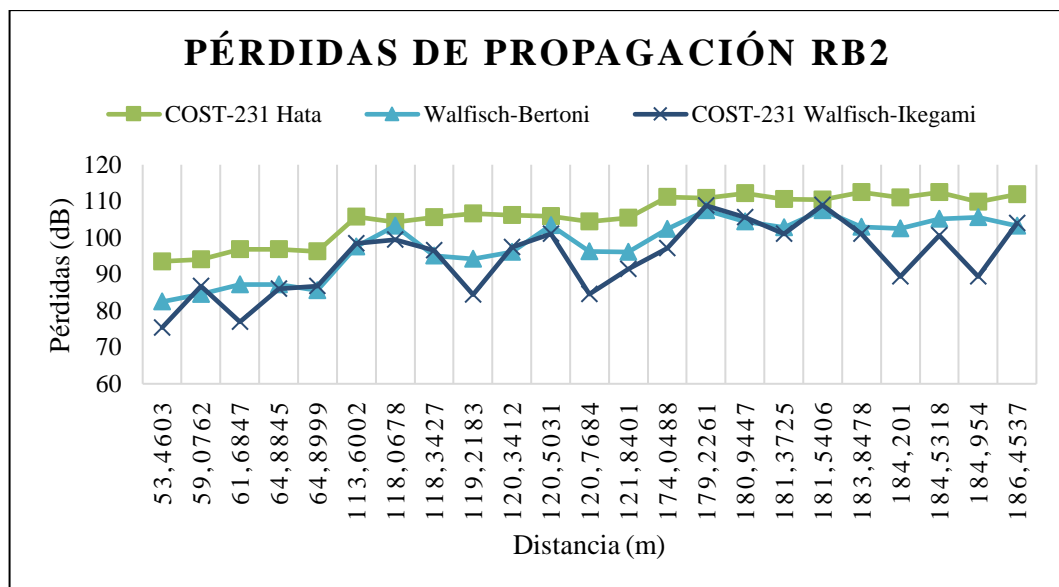


Gráfico 2-3: Pérdidas de cada modelo de propagación en los puntos de RB2

Realizado por: Benítez, P. 2021

3.3. Campo eléctrico

En la tabla 3-3 se muestran los resultados del campo eléctrico obtenidos con los modelos de propagación en los puntos de medición de la radio base RB1 así también los valores de campo eléctrico medidos.

Tabla 3-3: Campo eléctrico en los puntos de la radio base RB1

Puntos	Distancia (m)	Campo eléctrico E (dB μ V/m)			
		Medido	COST-231 Hata	Walfisch-Bertoni	COST-231 Walfisch- Ikegami
19	59,9416	110,5017	108,1535	110,7563	112,9
8	65,146	107,1323	107,5475	108,6986	112,5256
14	66,1891	114,1394	107,2045	109,2439	116,4086
13	68,8186	103,2699	106,2783	108,8394	124,8609
20	121,5648	94,6311	98,3096	96,5934	93,8536
9	123,0325	101,5069	97,9994	102,6211	100,1285
15	125,3994	101,7631	97,8187	96,6317	105,164
4	125,4831	96,164	96,3478	101,0302	99,3114
6	127,0157	102,8097	97,5862	99,4805	106,8881
23	127,1157	115,2024	97,2576	94,9736	117,9409
12	128,316	108,0727	96,7749	97,5384	106,435
5	129,0271	92,7753	96,6029	100,2025	100,2502
18	129,1395	103,5184	96,2372	98,5292	95,9541
7	160,05	99,2188	93,9111	97,0152	95,433
22	168,3241	89,7237	92,6513	93,5984	96,2136
17	169,0976	91,1583	92,3192	96,2793	95,0349
1	171,7586	91,4868	92,6948	94,0032	92,8891
11	171,9448	103,1518	91,8012	93,356	102,7781
10	172,4094	102,0416	92,5961	95,8331	97,4402
25	172,4674	92,6163	90,687	96,4155	95,0011
2	173,2166	104,5308	92,5569	94,6378	102,8899
16	173,358	100,4209	92,9489	95,7452	105,2108
21	173,9684	105,8688	92,7852	99,9731	101,0013
3	175	102,5967	92,8096	95,8772	97,5213
24	185,3483	119,9882	90,7177	91,6205	113,6735

Realizado por: Benítez, P. 2021.

El gráfico 3-3 representa los valores de campo eléctrico de cada modelo de propagación teórico y medido vs la distancia de los puntos analizados en la radio base RB1, donde se puede verificar que el modelo COST-231 Walfisch-Ikegami tiene un comportamiento similar al del campo eléctrico medido, a excepción del punto 13 que presenta un valor de campo más alto respecto al medido y los otros modelos con aproximadamente 18 dB de diferencia, esto se debe a que en ese punto la pérdida se calculó considerando la existencia de línea de vista entre la antena receptora

y la radio base, sin embargo, dicha vista al momento de la medición pudo haber sido obstruida por obstáculos como automotores que circulaban en ese momento. Al obtener una pérdida baja por la consideración mencionada se obtiene un campo eléctrico alto y es lo que se comprueba en dicho punto.

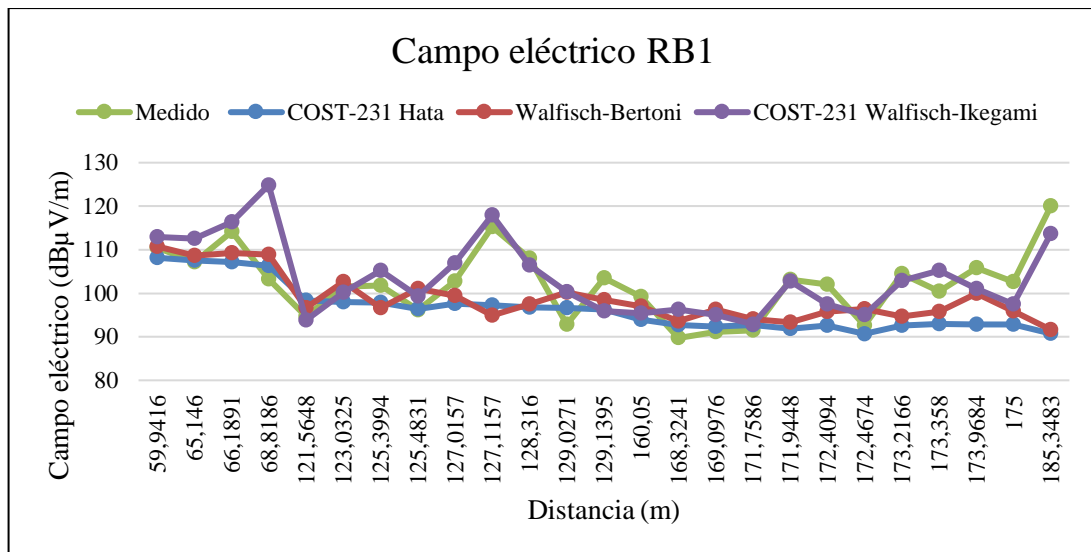


Gráfico 3-3: Campo eléctrico de cada modelo de propagación teórico y medido en los puntos de RB1

Realizado por: Benítez, P. 2021

En la tabla 4-3 se muestran los resultados del campo eléctrico obtenidos con los modelos de propagación en los puntos de medición de la radio base RB2 así también los valores de campo eléctrico medidos.

Tabla 4-3: Campo eléctrico en los puntos de la radio base RB2

Puntos	Distancia (m)	Campo eléctrico E (dBµV/m)			
		Medido	COST-231 Hata	Walfisch-Bertoni	COST-231 Walfisch-Ikegami
15	53,4603	105,0699	109,5668	120,6341	118,9231
8	59,0762	117,2744	108,9889	118,5012	116,4071
14	61,6847	114,1234	106,3386	115,9618	126,1616
7	64,8845	109,2979	106,3052	115,8843	117,0735
9	64,8999	106,4164	106,8431	117,5025	116,3238
13	113,6002	95,9162	97,303	105,5775	104,7334
10	118,0678	101,9085	98,785	99,8643	103,5922
20	118,3427	98,8945	97,5058	108,0224	106,5187
18	119,2183	128,9833	96,4472	108,898	118,6563
19	120,3412	97,3517	96,8833	106,9824	105,6272
6	120,5031	104,914	97,1663	99,6914	102,0019

Tabla 4-3: (Continuación)

3	120,7684	105,0173	98,6421	106,8664	112,5276
16	121,8401	101,0346	97,7055	107,0556	111,6539
5	174,0488	119,5813	91,9578	100,6765	106,0443
2	179,2261	107,0672	92,2605	95,6528	94,2861
12	180,9447	91,6426	90,9104	98,633	97,4509
11	181,3725	111,3658	92,5154	100,3603	102,0512
4	181,5406	107,413	92,7369	95,5413	94,18
23	183,8478	97,9131	90,6867	100,1551	101,9754
1	184,201	104,33	92,0804	100,5872	113,7436
17	184,5318	97,3973	90,6803	97,8995	102,5175
22	184,954	120,8258	93,2583	97,4872	113,6976
21	186,4537	95,5334	91,1873	99,7779	99,0981

Realizado por: Benítez, P. 2021.

El gráfico 4-3 representa al campo eléctrico de cada modelo de propagación y medido vs la distancia de los puntos analizados en la radio base RB2 donde se puede observar que el modelo COST-231 Walfisch-Ikegami tiene un comportamiento similar al del campo eléctrico medido, por otra parte el modelo COST-231 Hata es el que más se aleja del campo eléctrico medido.

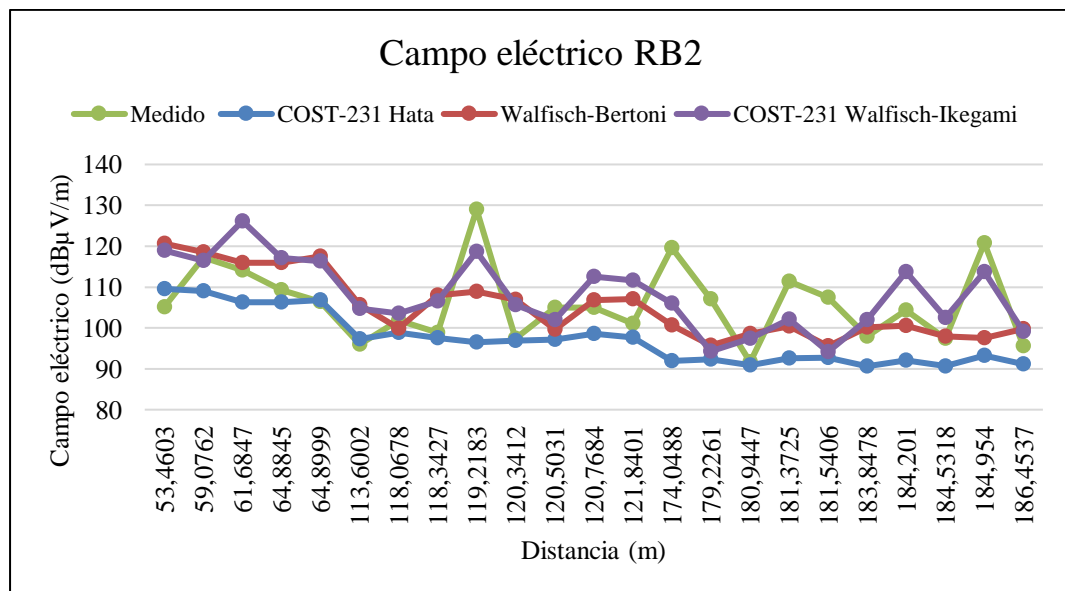


Gráfico 4-3: Campo eléctrico de cada modelo de propagación teórico y medido en los puntos de RB2

Realizado por: Benítez, P. 2021

3.4. Prueba estadística de comparación

En la sección anterior de este capítulo se estableció al modelo de COST-231 Walfisch-Ikegami como aquel que mejor estimación de campo eléctrico tuvo de acuerdo a las gráficas presentadas

en las radio bases RB1 y RB2, sin embargo, existen puntos donde otros modelos se acercan más al campo eléctrico medido por lo que no es correcto concluir que ese modelo es el mejor, para ello se utiliza métodos estadísticos que permitan realizar un análisis correcto.

El error cuadrático medio (RMSE) es la raíz cuadrada de la media del cuadrado de todos los errores, es un método eficiente y de buena precisión para comparar errores de predicción de diferentes modelos. Compara un valor observado con un valor estimado lo que resulta óptimo para la comparación del campo eléctrico obtenido con modelos de propagación y el medido. Se obtiene con la ecuación 1-3, el valor de RMSE más bajo será el que mejor aproximación tenga.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_{mi} - E_{ei})^2} \quad \text{Ec. 1-3}$$

Donde

E_m : valores de campo eléctrico medido

E_e : valores de campo eléctrico calculados en base a los modelos de propagación

Para la optimización del cálculo se utilizó el software R mediante el comando rmse que proporciona el mismo. En la figura 1-3 se muestra los resultados del modelo COST-231 Walfisch-Ikegami obtenidos con el software.

```
> library(Metrics)
> rmse(RB1$medido,RB1$`COST-231 walfisch-Ikegami`)
[1] 5.951313
> rmse(RB2$medido,RB2$`COST-231 walfisch-Ikegami`)
[1] 8.907154
```

Figura 1-3: RMSE entre el valor medido y estimado en RB1 Y RB2

Realizado por: Benítez, P. 2021

Finalmente, en la tabla 5-3 se muestra la comparación de los valores RMSE de cada modelo para el entorno de la radio base RB1 y RB2.

Tabla 5-3: Valores RMSE de cada modelo de propagación en RB1 y RB2

Entorno	RMSE Modelos		
	COST-231 Hata	Walfisch-Bertoni	COST-231 Walfisch-Ikegami
RB1	9,4511	8,7856	5,9513
RB2	13,0539	10,5046	8,9072

Realizado por: Benítez, P. 2021.

Los resultados obtenidos con la prueba RMSE muestran que los valores más altos en las dos radiobases se tiene con el modelo COST-231 Hata y los más bajos con el modelo COST-231 Walfisch-Ikegami.

Según los resultados de la prueba RMSE muestran que el modelo que mejor predicción tiene en el entorno de la radio base RB1 es el COST-231 Walfisch-Ikegami con un valor menor de 5,9513 dado que este modelo no solo considera las pérdidas por el espacio libre si no también las pérdidas por difracción en los techos de los edificios y difracción multipantalla, lo que resulta importante para el correcto análisis del entorno de RB1 por las características urbanísticas mencionadas.

El modelo que menor valor de RMSE presenta en la radiobase RB2 es de 8,9072 perteneciente al modelo el COST-231 Walfisch-Ikegami seguido de Walfisch-Bertoni que a pesar de tener una buena aproximación el modelo que mejor representa a esa zona es el COST-231 Walfisch-Ikegami debido a que considera más parámetros como el ancho de las calles y el ángulo entre la onda incidente y el eje de la calle.

3.5. Recomendación modelo de propagación

La propagación en rutas menores a 1km se ve afectada especialmente por las construcciones y vegetación, específicamente árboles. En estos alcances cortos predomina el efecto de los edificios y esto sucede generalmente en zonas urbanas y suburbanas según indica la recomendación P.1411-11 de la ITU (2021, p. 4)

En el entorno de la radiobase RB1 que se encuentra en pleno centro histórico de la ciudad, predominan edificaciones de 9 a 16 metros aproximadamente, la vegetación es ligera y al ser una zona comercial existe gran afluencia de personas y por tanto gran tráfico vehicular. Con estas características y siguiendo la recomendación de ITU antes citada se trata de un entorno urbano de construcción alta. En la figura 2-3 se muestra una fotografía de representación del medio de propagación de RB1.



Figura 2-3: Entorno de la radio base RB1
Realizado por: Benítez, P. 2021

En cuanto al entorno de la radiobase RB2 hasta la zona más lejana de análisis se tiene una variación de alturas promedio de edificaciones de 6 a 9 metros con vegetación ligera, es una zona mixta entre viviendas y lugares de comercio lo que provoca un tráfico vehicular y peatonal moderado clasificándolo como un entorno urbano de construcción alta a baja. La figura 3-3 muestra una fotografía de representación del medio de propagación de RB2.



Figura 3-3: Entorno de la radio base RB2

Realizado por: Benítez, P. 2021

Las características urbanísticas detalladas de los entornos de las radiobases RB1 y RB2 indican que sea posible la propagación por difracción en los tejados de las edificaciones circundantes ya que la radio base RB1 está ubicada a una altura aproximada de 24 metros y la mayor altura promedio de los edificios es de 16 metros, dejando a la radio base en una posición por encima del nivel medio de los edificios, en la radio base RB2 su altura aproximada es de 15 metros y la altura promedio más alta de los edificios está alrededor de los 9 metros, en principio no parece haber mucha diferencia de altura con la radio base, pero la particularidad de esta es que está ubicada en una zona muy alta sobresaliendo de las demás construcciones.

El modelo COST-231 Walfisch-Ikegami a pesar de no considerar la propagación multitrayecto si analiza la difracción causada por los edificios tomando en cuenta su separación, el ancho de las calles y la orientación de las calles. A diferencia del modelo Walfisch-Bertoni que además de no considerar la presencia de línea de vista entre la antena trasmisora y receptora no tiene en cuenta la contribución por difracción multipantalla.

En base a lo mencionado y según las pruebas RMSE realizadas el modelo de propagación que mayor precisión tiene en los entornos de las dos radio bases es el COST-231 Walfisch-Ikegami por lo que se recomienda como el mejor modelo de propagación para entornos similares a los analizados zona centro de la ciudad de Riobamba en banda LTE de 1900 MHz.

CONCLUSIONES

- Se realizó una evaluación de varios estudios de trabajos relacionados lo que permitió establecer los parámetros que se consideran en las investigaciones, los estudios de Pedraza et al., y Gallardo y Jaramillo fueron de ayuda para el presente trabajo de investigación en cuanto a la metodología de mediciones y análisis de parámetros estadísticos respectivamente.
- Los modelos de propagación analizados tienen en cuenta características importantes que se consideraron en el desarrollo del trabajo de investigación. El modelo COST-231 Hata tiene en cuenta el grado de urbanización cuando la altura del receptor es diferente de 1,5 m y un factor de corrección para el tipo de ambiente, el modelo Walfisch-Bertoni considera la antena transmisora por encima de los tejados de los edificios y la distancia entre los centros de estos, finalmente el modelo COST-231 Walfisch-Ikegami tiene en cuenta la existencia o no de línea de vista y considera el caso donde alturas de la antena de la estación base se encuentren por debajo de los tejados y no solo por encima.
- Las 2 estaciones base en la zona centro de Riobamba fueron elegidas considerando que representen zonas estratégicas para el análisis de las características de los modelos de propagación. La primera estación base está ubicada en el centro histórico de la ciudad con una concentración de edificios altos y la segunda en una zona muy alta con distribuciones topográficas diferentes a la de la primera radio base lo que proporcionó un análisis característico para los modelos.
- Los cálculos teóricos de las pérdidas de propagación obtenidos con las ecuaciones de los modelos analizados demostraron que en un entorno con línea de vista entre la radiobase y el receptor las pérdidas son mínimas lo que provoca un valor de campo eléctrico alto como es el caso del punto 24 en la RB1 y el punto 14 en la RB2.
- La comparación entre el campo eléctrico obtenido con los modelos de propagación y el campo medido se realizó con el método del error cuadrático medio RMSE donde el modelo de propagación que peor aproximación tuvo en los dos entornos de las radio bases RB1 y RB2 fue el COST-231 Hata.
- El modelo de propagación que mejor se ajusta a las condiciones de los entornos analizados de la zona centro de la ciudad de Riobamba para el servicio de Telefonía Móvil en la banda de 1900 MHz de LTE es el COST-231 Walfisch-Ikegami, presentando un valor de RMSE mínimo en las 2 zonas.

RECOMENDACIONES

- Seleccionar varios trabajos de investigación relacionados, de preferencia de fechas más actuales para poder tener en cuenta consideraciones que ayuden al correcto desarrollo de la investigación.
- Tomar en cuenta los escenarios en los que han sido desarrollados los modelos de propagación ya que existen modelos realizados para una ciudad o entorno específicos sin proporcionar algún tipo de corrección para aplicar en casos diferentes, lo que puede provocar un mal análisis en el medio que se quiera utilizar.
- Realizar una investigación previa para la selección de la operadora a considerar para el estudio, puesto que no siempre se puede tener información relevante para el análisis como la ubicación de las radio bases en la banda y tecnologías requeridas.
- Es importante seleccionar los puntos de medición donde se pueda colocar el equipo Narda SRM-3006 pues algunas veces se vio obligado a cambiar de lugar por la irregularidad del terreno o el pequeño espacio. Para las mediciones se debe encerrar el equipo entre cada toma de muestras para evitar que se vean afectadas por la medición anterior.
- Para el cálculo del parámetro A correspondiente a la influencia de la geometría de los edificios de propagación del modelo Walfisch-Bertoni, se debe tener en cuenta que la función trigonométrica arcotangente utilizada está en radianes y dado que Matlab por defecto opera en radianes no se debe realizar ninguna conversión.
- Para la comparación de los resultados teóricos obtenidos con cada modelo de propagación y las mediciones es necesario realizar una prueba estadística para dar mayor validez a los resultados.
- Realizar las mediciones durante al menos una semana consecutiva en cada punto y sacar un promedio debido a que una sola medición no es suficiente por el tráfico que cambia constantemente provocando una variabilidad.
- Se debe ampliar la campaña de mediciones en la ciudad de Riobamba para tener en cuenta otro tipo de entornos analizando en más radio bases y considerando otros modelos de propagación que tienen en cuenta más parámetros de análisis como el rango de frecuencias, la posición de las antenas transmisoras respecto al nivel medio de los edificios, etc.

GLOSARIO

ARCOTEL: Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones es una entidad estatal de Ecuador encargada principalmente de la administración del espectro radioeléctrico y del control de las telecomunicaciones, también gestiona aspectos técnicos del uso de frecuencias y operación de redes. (Arcotel, 2019b)

AutoCAD: Es un programa para diseño asistido por computadora en dos y tres dimensiones, es utilizado generalmente por ingenieros y arquitectos ya que permite la creación de planos o dibujos más complejos en modelos 3D. (Martín Sánchez et al., 2017: p. 12)

Coordenadas UTM: Es un sistema de proyección cartográfico basado en cuadrículas donde el Ecuador se convierte en una recta representando al eje de las X y el meridiano central al eje de las Y. Sus unidades de medida son metros sobre el nivel del mar. (Ibáñez Asensio et al., 2011: p. 2)

EARFCN: E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number es el número absoluto de canal de radio con un rango de 0 a 262143 que indica la frecuencia portadora en el enlace Uplink y Downlink. (3GPP TS 36.104, 2021, p. 30)

BIBLIOGRAFÍA

3GPP TS 36.104. *Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception*, 2021.

ARCOTEL. *Servicio Móvil Avanzado* [en línea]. Ecuador, 2015. [Consulta: 11 junio 2021]. Disponible en: <https://www.arcotel.gob.ec/servicio-movil-avanzado/>.

ARCOTEL. *Servicio Móvil Avanzado* [en línea], Ecuador, 2018. [Consulta: 25 abril 2021]. Disponible en: https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2015/01/BOLETIN-ESTADISTICO-Junio-2018_f.pdf.

ARCOTEL. *4G es la cuarta generación de tecnología de telefonía móvil* [en línea]. Ecuador, 2019a. [Consulta: 9 junio 2021]. Disponible en: <https://www.arcotel.gob.ec/4g/>.

ARCOTEL. *Qué es la ARCOTEL* [en línea]. Ecuador, 2019b. [Consulta: 15 agosto 2021]. Disponible en: <https://www.arcotel.gob.ec/1-preguntas-generales/>.

ARCOTEL. *Requisitos: TELECOMUNICACIONES MÓVILES POR SATÉLITE* [en línea]. Ecuador, 2020. [Consulta: 3 junio 2021]. Disponible en: <https://www.arcotel.gob.ec/requisitos-telecomunicaciones-moviles-por-satelite3/>.

BARRIOS ULLOA, Alexis. Análisis Comparativo de Modelos de Propagación para el Enlace Descendente en Redes HSPA+ en Áreas Urbanas y Suburbanas. Caso Estudio: Barranquilla [En línea] (Trabajo de Titulación). (Maestría) Universidad Tecnológica de Bolívar, Colombia. 2015. [Consulta: 24 junio 2021]. Disponible en: <https://repositorio.utb.edu.co/handle/20.500.12585/1175>.

BARRIOS ULLOA, Alexis; et al. "Comparación De Modelos De Radiopropagación En El Área Suburbana De La Ciudad De Barranquilla". *Revista Colombiana De Tecnologías De Avanzada (Rcta)* [en línea], 2018, (Colombia) 2(32), pp. 78-85. [Consulta: 20 mayo 2021]. ISSN 1692-7257. Disponible en: <https://doi.org/10.24054/16927257.v32.n32.2018.3029>.

BELTRÁN, Jairo; et al. "Comparación de los modelos de propagación electromagnética implementados en la telefonía móvil". *Multiciencias* [en línea], 2012, (Venezuela) 12, pp. 305-310. [Consulta: 12 mayo 2021]. ISSN 1317-2255. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90431109050>.

CICHON, Dieter J & KÜRNER, Thomas. *Propagation Prediction Models. DIGITAL MOBILE RADIO TOWARDS FUTURE GENERATION SYSTEMS* [en línea], Germany, 1998. [Consulta: 8 julio 2021]. Disponible en: <http://www.winlab.rutgers.edu/~andrej/research/docs/cost231/ch4.pdf>.

FIGUEROA DE LA CRUZ, Mario. *Introducción a los sistemas de telefonía celular* [en línea]. Buenos Aires-Argentina: Editorial Hispano Americana HASA, 2008. [Consulta: 18 julio 2021]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/66557>.

- GALLARDO AGUILAR, Henry Rafael & JARAMILLO VÁSQUEZ, Juan Carlos.** Determinación de modelos de propagación ajustados a zonas representativas de la ciudad de Cuenca en base a mediciones reales [en línea] (Trabajo de titulación). Universidad de Cuenca, S Facultad de Ingeniería, Escuela de Electrónica y Telecomunicaciones, Cuenca-Ecuador. 2015. pp. 33-96. [Consulta: 25 mayo 2021]. Disponible en: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/23102>.
- GARCÍA, Juan Pascual; et al.** *Sistemas de Comunicaciones Móviles: Caracterización del Canal Móvil*. Cartagena-España: Universidad Politécnica de Cartagena, 2014a, pp. 13-137.
- GARCÍA, Juan Pascual; et al.** *Sistemas de comunicaciones móviles: segunda, tercera y cuarta generación*. Cartagena-España: Universidad Politécnica de Cartagena, 2014b, pp. 150-157.
- GARCÍA RUEDA, Franciso Javier.** Modelos de propagación para comunicaciones móviles 4G y 5G [en línea] (Trabajo de titulación). Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación. Madrid-España. 2016. pp. 1-2. [Consulta: 20 mayo 2021]. Disponible en: https://oa.upm.es/44152/1/TFG_FRANCISCO_JAVIER_GARCIA_RUEDA.pdf
- GÓMEZ ROJAS, Jorge; et al.** *Radiocomunicaciones: teoría y principios* [en línea]. Editorial Unimagdalena , 2019. [Consulta: 9 junio 2021]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/111760>.
- GUTIÉRREZ, Oscar Eduardo.** *Comunicaciones móviles y redes inalámbricas* [en línea]. Jorge Sarmiento Editor - Universitas, 2020. [Consulta: 20 junio 2021]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/172318>.
- HERNANDO RÁBANOS, José María.** *Transmisión por radio*. 6ª ed. Madrid-España: Editorial Universitaria Ramón Areces, 2008, pp. 38-227.
- HERNANDO RÁBANOS, José María.** *Comunicaciones Móviles*. 3ª ed. Madrid-España: Editorial Universitaria Ramón Areces, 2015, pp. 3-155.
- HUIDROBO, José Manuel.** *Comunicaciones móviles: sistemas GSM, UMTS y LTE* [en línea]. Madrid-España: RA-MA Editorial, 2014. [Consulta: 4 julio 2021]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/106423>.
- IBÁÑEZ ASENSIO, Sara; et al.** *El sistema de coordenadas utm* [en línea], España, 2011. [Consulta: 17 agosto 2021]. Disponible en: [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10772/Coordenadas UTM.pdf?sequence=1](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10772/Coordenadas%20UTM.pdf?sequence=1).
- ICNIRP.** *For Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (Up to 300 GHz)* [en línea], 1999. [Consulta: 1 agosto 2021]. Disponible en: <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPemfgdl.pdf>
- INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION.** Setting the scene for 5G: Opportunities & Challenges, 2018, pp. 3-6.
- ITU.** *Recommendations and Reports Of The CCIR, 1986*.

ITU. *Rec. UIT-R P.529-3*, 1999.

ITU. Radio Regulations [en línea]. 2016. [Consulta: 26 abril 2021] Disponible en: <http://handle.itu.int/11.1002/pub/80da2b36-en>.

ITU. *Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz P Series Radiowave propagation* [en línea], 2021. [Consulta: 20 agosto 2021]. Disponible en: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1411-11-202109-I!!PDF-E.pdf.

LEÓN MOYA, Silvia. Infraestructura para una BTS de telefonía móvil urbana (Trabajo de titulación). Universidad de Sevilla, Dep. Teoría de la Señal y Comunicaciones, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Sevilla, 2015. pp. 3-4.

LEÓN SANZ, Rafael & GALÁN LÓPEZ, Ramón. *Introducción a la movilidad: 4G/LTE y el desarrollo de aplicaciones Android* [en línea]. Madrid-España: Dextra Editorial, 2014. [Consulta: 30 julio 2021]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/43939>.

MARTÍN SÁNCHEZ, Domingo Alfonso; et al. *Curso Básico De Dibujo Con Autocad* [en línea]. España, 2017. [Consulta: 5 agosto 2021]. Disponible en: https://oa.upm.es/50865/1/Curso_AutoCAD.pdf.

MATHWORKS. *What Is MATLAB?* [en línea], 2018. [Consulta: 11 junio 2021]. Disponible en: <https://www.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>.

MINISTERIO DE TELECOMUNICACIONES. *Ecuador pone en marcha 3 estaciones fijas de tecnología 5G. También se presentaron los sistemas de Identidad Digital y de Monedero Electrónico* [en línea]. Ecuador, 2021. [Consulta: 22 junio 2021]. Disponible en: <https://www.telecomunicaciones.gob.ec/ecuador-pone-en-marcha-3-estaciones-fijas-de-tecnologia-5g-tambien-se-presentaron-los-sistemas-de-identidad-digital-y-de-monedero-electronico/>.

MOLISCH, Andreas. *Wireless Communications*. 2ª ed. John Wiley & Sons, 2011, pp. 128-129.

NARDA SAFETY TEST SOLUTIONS. *SRM-3006 Selective Radiation Meter*. Germany, 2017, pp. 2-152.

NOHRBORG, Madgalena. *LTE* [en línea], 2013. [Consulta: 10 julio 2021]. Disponible en: <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>.

PEDRAZA MARTÍNEZ, Luis; et al. "Estudio de modelos de propagación en el entorno de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas". *Visión Electrónica* [en línea], 2010, (Colombia) 4(2), pp. 77-87. [Consulta: 1 mayo 2021]. ISSN 1909-9746. Disponible en: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/visele/article/view/276/5587>

PÉREZ VEGA, Constantino; et al. *Sistemas de Telecomunicación*. España: Universidad de Cantabria, 2007, pp. 438-439.

R FOUNDATION. *What is R?* [en línea], 2018. [Consulta: 12 junio 2021]. Disponible en:

<https://www.r-project.org/about.html>.

RAMÍREZ LUZ, Ramón. *Sistemas de radiocomunicaciones*. España: Parainfo, 2015. pp. 2-3.

RAMOS PASCUAL, Francisco. *Radiocomunicaciones* [en línea]. Marcombo, 2008. [Consulta: 5 julio 2021]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/esepoch/45921>.

RAPPAPORT, Theodore. *Wireless communications: Principles and Practice*. 2ª ed. New Jersey: Pearson Education, 2002, pp. 153-154.

RIVERA ZAPATA, Christian; et al. *Estado actual de las telecomunicaciones y la banda ancha en Ecuador. Banco Interamericano de Desarrollo* [en línea], 2020, pp. 3-4. [Consulta: 1 abril 2021]. Disponible en:

https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Estado_actual_de_las_telecomunicaciones_y_la_banda_ancha_en_Ecuador.pdf.

SALLENT ROIG, Oriol; et al. *Principios de comunicaciones móviles*. Barcelona: Edicions UPC, 2003, pp. 14-15.

TOMASI, Wayne. *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. 4ª ed. México: Pearson Educación, 2003, pp. 352-361.

TRIMBLE INC. *MobileMapper 50 Ficha Técnica* [en línea], 2017. [Consulta: 29 julio 2021]. Disponible en: https://www.geometior.com/wp-content/uploads/2017/09/MM50_SpectraPrecision_GIS.pdf.

UIT. *Propagación de las ondas radioeléctricas en sistemas terrenales móviles terrestres en las bandas de ondas métricas y decimétricas* [en línea]. 2002, pp. 26-30. [Consulta: 5 abril 2021] Disponible en: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-44-2002-OAS-PDF-S.pdf.

WALFISCH, Joram & BERTONI, Henry L. "A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* [en línea], 1988, (S.I.) 36(12), pp. 1788-1796. [Consulta: 15 julio 2021]. ISSN 1558-2221. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/14401>

ANEXOS

ANEXO A: BANDAS DE FRECUENCIAS DE OPERACIÓN LTE

Banda de operación E-UTRA	Banda de operación Uplink (UL)	Banda de operación Downlink (DL)	Modo dúplex
	$F_{UL, low} - F_{UL, high}$	$F_{DL, low} - F_{DL, high}$	
1	1920 MHz - 1980 MHz	2110 MHz - 2170 MHz	FDD
2	1850 MHz - 1910 MHz	1930 MHz - 1990 MHz	FDD
3	1710 MHz - 1785 MHz	1805 MHz - 1880 MHz	FDD
4	1710 MHz - 1755 MHz	2110 MHz - 2155 MHz	FDD
5	824 MHz - 849 MHz	869 MHz - 894MHz	FDD
6 (NOTA 1)	830 MHz - 840 MHz	875 MHz - 885 MHz	FDD
7	2500 MHz - 2570 MHz	2620 MHz - 2690 MHz	FDD
8	880 MHz - 915 MHz	925 MHz - 960 MHz	FDD
9	1749.9 MHz - 1784.9 MHz	1844.9 MHz - 1879.9 MHz	FDD
10	1710 MHz - 1770 MHz	2110 MHz - 2170 MHz	FDD
11	1427.9 MHz - 1447.9 MHz	1475.9 MHz - 1495.9 MHz	FDD
12	699 MHz - 716 MHz	729 MHz - 746 MHz	FDD
13	777 MHz - 787 MHz	746 MHz - 756 MHz	FDD
14	788 MHz - 798 MHz	758 MHz - 768 MHz	FDD
15	Reserved	Reserved	FDD
16	Reserved	Reserved	FDD
17	704 MHz - 716 MHz	734 MHz - 746 MHz	FDD
18	815 MHz - 830 MHz	860 MHz - 875 MHz	FDD
19	830 MHz - 845 MHz	875 MHz - 890 MHz	FDD
20	832 MHz - 862 MHz	791 MHz - 821 MHz	FDD
21	1447.9 MHz - 1462.9 MHz	1495.9 MHz - 1510.9 MHz	FDD
22	3410 MHz - 3490 MHz	3510 MHz - 3590 MHz	FDD
23 ¹	2000 MHz - 2020 MHz	2180 MHz - 2200 MHz	FDD
24 ⁹	1626.5 MHz - 1660.5 MHz	1525 MHz - 1559 MHz	FDD
25	1850 MHz - 1915 MHz	1930 MHz - 1995 MHz	FDD
26	814 MHz - 849 MHz	859 MHz - 894 MHz	FDD
27	807 MHz - 824 MHz	852 MHz - 869 MHz	FDD
28	703 MHz - 748 MHz	758 MHz - 803 MHz	FDD
29	N/A	717 MHz - 728 MHz	FDD (NOTA 2)
30	2305 MHz - 2315 MHz	2350 MHz - 2360 MHz	FDD
31	452.5 MHz - 457.5 MHz	462.5 MHz - 467.5 MHz	FDD
32	N/A	1452 MHz - 1496 MHz	FDD (NOTA 2)
33	1900 MHz - 1920 MHz	1900 MHz - 1920 MHz	TDD
34	2010 MHz - 2025 MHz	2010 MHz - 2025 MHz	TDD
35	1850 MHz - 1910 MHz	1850 MHz - 1910 MHz	TDD
36	1930 MHz - 1990 MHz	1930 MHz - 1990 MHz	TDD
37	1910 MHz - 1930 MHz	1910 MHz - 1930 MHz	TDD
38	2570 MHz - 2620 MHz	2570 MHz - 2620 MHz	TDD
39	1880 MHz - 1920 MHz	1880 MHz - 1920 MHz	TDD
40	2300 MHz - 2400 MHz	2300 MHz - 2400 MHz	TDD
41	2496 MHz - 2690 MHz	2496 MHz - 2690 MHz	TDD

42	3400 MHz - 3600 MHz	3400 MHz - 3600 MHz	TDD
43	3600 MHz - 3800 MHz	3600 MHz - 3800 MHz	TDD
44	703 MHz - 803 MHz	703 MHz - 803 MHz	TDD
45	1447 MHz - 1467 MHz	1447 MHz - 1467 MHz	TDD
46	5150 MHz - 5925 MHz	5150 MHz - 5925 MHz	TDD (NOTA 3, NOTA 4)
47	5855 MHz - 5925 MHz	5855 MHz - 5925 MHz	TDD
48	3550 MHz - 3700 MHz	3550 MHz - 3700 MHz	TDD
49	3550 MHz - 3700 MHz	3550 MHz - 3700 MHz	TDD (NOTA 8)
50	1432 MHz - 1517 MHz	1432 MHz - 1517 MHz	TDD
51	1427 MHz - 1432 MHz	1427 MHz - 1432 MHz	TDD
52	3300 MHz - 3400 MHz	3300 MHz - 3400 MHz	TDD
53	2483.5 MHz - 2495 MHz	2483.5 MHz - 2495 MHz	TDD
65	1920 MHz - 2010 MHz	2110 MHz - 2200 MHz	FDD
66	1710 MHz - 1780 MHz	2110 MHz - 2200 MHz	FDD (NOTA 5)
67	N/A	738 MHz - 758 MHz	FDD (NOTA 2)
68	698 MHz - 728 MHz	753 MHz - 783 MHz	FDD
69	N/A	2570 MHz - 2620 MHz	FDD (NOTA 2)
70	1695 MHz - 1710 MHz	1995 MHz - 2020 MHz	FDD ⁶
71	663 MHz - 698 MHz	617 MHz - 652 MHz	FDD
72	451 MHz - 456 MHz	461 MHz - 466 MHz	FDD
73	450 MHz - 455 MHz	460 MHz - 465 MHz	FDD
74	1427 MHz - 1470 MHz	1475 MHz - 1518 MHz	FDD
75	N/A	1432 MHz - 1517 MHz	FDD (NOTA 2)
76	N/A	1427 MHz - 1432 MHz	FDD (NOTA 2)
85	698 MHz - 716 MHz	728 MHz - 746 MHz	FDD
87	410 MHz - 415 MHz	420 MHz - 425 MHz	FDD
88	412 MHz - 417 MHz	422 MHz - 427 MHz	FDD

NOTA 1: Las bandas 6, 23 no son aplicables.

NOTA 2: Restringido al funcionamiento de E-UTRA cuando se configura la agregación de portadoras. La banda operativa del enlace descendente se empareja con la banda operativa del enlace ascendente (externa) de la configuración de agregación de portadoras que soporta la celda P configurada.

NOTA 3: Esta banda es una banda sin licencia restringida a la operación asistida por licencia que utiliza el tipo de estructura de trama 3.

NOTA 4: La banda 46 se divide en cuatro subbandas, como en el cuadro 5.5-1A.

NOTA 5: El rango 2180 - 2200 MHz de la banda operativa DL está restringido al funcionamiento E-UTRA cuando se configura la agregación de portadoras.

NOTA 6: El rango 2010-2020 MHz de la banda operativa DL está restringido al funcionamiento E-UTRA cuando se configura la agregación de portadoras y la separación TX-RX es 300 MHz. El rango 2005-2020 MHz de la banda operativa DL está restringido al funcionamiento E-UTRA cuando se configura la agregación de portadoras y la separación TX-RX es 295 MHz.

NOTA 7: Vacío

NOTA 8: Esta banda está restringida a la operación asistida por licencia usando Frame Structure Type 3.

NOTA 9: El funcionamiento de DL está restringido al rango de frecuencia de 1526-1536 MHz. El funcionamiento de UL está restringido a 1627,5 - 1637,5 MHz y 1646,5 - 1656,5 MHz según la orden DA 20-48 de la FCC.

**ANEXO B: FOTOGRAFÍAS DE TOMA DE DATOS CON SPECTRA PRECISION MOBILE
MAPPER 50**

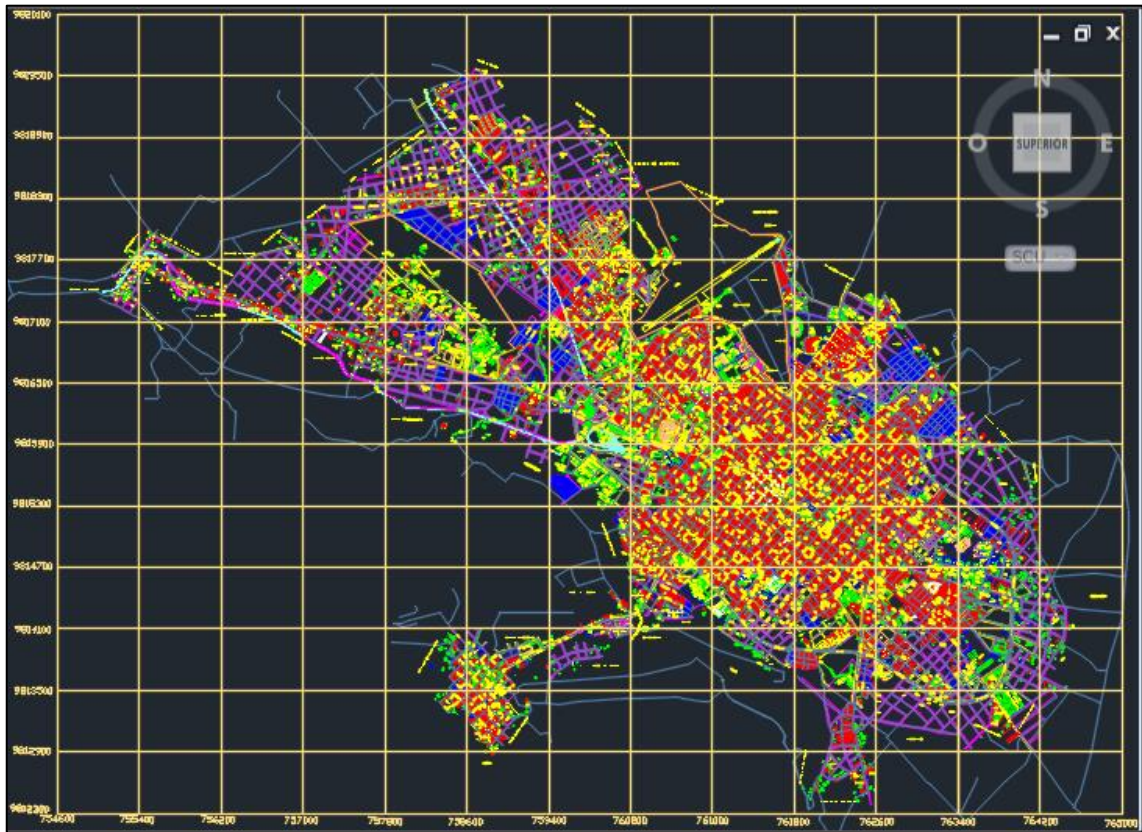


Punto 1 de la radio base RB1



Punto 17 de la radio base RB2

ANEXO C: PLANO DE LA CIUDAD DE RIOBAMBA EN AUTOCAD



ANEXO D: CÓDIGO DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN EN MATLAB

Modelo COST-231 Hata

```
xo=xlsread('DRBs','C2:C49');
yo=xlsread('DRBs','K2:K49');
f=1965;
d=xo'/1000;
ht=yo';
hm=1.5;
pire=30;
E_OH=zeros(1,length(d));
for i=1:length(d)
    Lb(i)=46.3+33.9*log10(f)-13.82*log10(ht(i))+(44.9-
6.55*log10(ht(i))*log10(d(i)));
    E_OH(i)=pire-Lb(i)+20*log10(f)+107.2
end
```

Modelo Walfisch-Bertoni

```
xw=xlsread('DRBs','E2:E49');
yw=xlsread('DRBs','G2:G49');
zw=xlsread('DRBs','L2:L49');
dw=xlsread('DRBs','C2:C49');
f=1965;
b=xw';
hr=yw';
H=zw';
d=dw'/1000;
```

```

hm=1.5;
pire=30;
E_WB=zeros(1,length(d));
for i=1:length(d)
A(i)=5*log10((b(i)/2).^2 + (hr(i)-hm).^2)-
9*log10(b(i))+20*log10((atan(2*(hr(i)-hm)/b(i)))));
lb(i)=89.55+A(i)+21*log10(f)+38*log10(d(i))-18*log10(H(i))-18*log10(1-
((d(i)).^2)/17*H(i));
E_WB(i)=pire-lb(i)+20*log10(f)+107.2
end

```

Modelo COST 231 Walfisch-Ikegami

```

cc=xlsread('DRBs','I2:I49');
xc=xlsread('DRBs','E2:E49');
yc=xlsread('DRBs','G2:G49');
dc=xlsread('DRBs','C2:C49');
fi=xlsread('DRBs','F2:F49');
wc=xlsread('DRBs','D2:D49');
f=1965;
c=cc';
b=xc';
hr=yc';
phi=fi';
w=wc';
d=dc'/1000;
hm=1.5;
%hb=24;
hb=15;
pire=30;
E_C=zeros(1,length(d));

%Pérdidas
for i=1:length(d)

    if c(i) == 1
        Lb(i) = 42.6+20*log10(f)+26*log10(d(i));
    else

%Cálculo Lrts

        dhm = hr - hm;
        if phi(i) < 35
            Lori(i) = -10+0.3571*phi(i);
        elseif phi(i) >= 35 && phi(i) < 55
            Lori(i)= 2.5+0.075*(phi(i)-35);
        else
            Lori(i) = 4-0.114*(phi(i)-55);
        end

        Lrts(i) = -16.9 -10*log10(w(i)) + 10*log10(f) + 20*log10(hr(i)-hm)
+ Lori(i);
        if Lrts(i) < 0
            Lrts(i) = 0;
        end

%Cálculo Lmsd
%---lbsh

```

```

dhb=hb-hr;
if hb < hr(i)
    lbsh(i) = 0;
else
    lbsh(i)=-18*log10(1+hb-hr(i));
end
%---kd
if hb >= hr(i)
    kd(i) = 18;
else
    kd(i) = 18 - 15 * (hb - hr(i)) / hr(i);
end
%---ka

if hb >= hr(i)
    ka(i) = 54;
elseif hb < hr(i)
    if d(i) >= 0.5
        ka(i) = 54 - 0.8 * (hb - hr(i));
    else
        ka(i)= 54 - 1.6 * (hb - hr(i)) * d(i);
    end
end
%---kf
kf(i)= -4 + 0.7 * (f / 925 - 1);

Lmsd(i)= lbsh(i) + ka(i) + kd(i)*log10(d(i)) + kf(i)*log10(f) -
9*log10(b(i));
Lbf(i)=32.45+20*log10(f)+20*log10(d(i));
if Lrts(i) + Lmsd > 0
    Lb(i) = Lbf(i)+Lrts(i)+Lmsd(i);
else
    Lb(i) = Lbf(i);
end
end

E_C(i)=pire-Lb(i)+20*log10(f)+107.2
end

```

ANEXO E: PARÁMETROS UTILIZADOS CON LA APLICACIÓN G-NETTRACK LITE

G-NetTrack Lite v14.6					
SIM1 Operador: Claro					
MCC:740	MNC:01	TAC:50800	Tipo:LTE		
eNB:100451	CID:22	PCI:30	F:950	B:L2	TA:0
RSRP:-97	RSRQ:-12	SNR:21.0	CQI:-	RSSI:-57	
SIM2 Operador:					
MCC:	MNC:	LAC:	Tipo:--		
NODE:	CID:--	PSC:	F:	B:	TA:
LEVEL:-201	QUAL:-		SNR:-		
Longitud:-78.65170			Latitud:-1.672833		
Velocidad:0 km/h	Dirección:0° N		GPS Exactitud:8m		
Alto:2784m	Altitud:2784m		Nivel del suelo:0m		