



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**Evaluación de escenarios de simulación del área de cobertura en redes  
inalámbricas WiMAX utilizando herramientas de simulación de  
planificación de radio**

AUTOR:

Ing. Sosa Calero, Sandra María

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Grado Académico de  
**MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**

TUTOR:

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

3 de marzo del 2020



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Magíster **Sosa Calero, Sandra María** como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de **MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

---

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

DIRECTOR DEL PROGRAMA

---

M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

Guayaquil, 3 de marzo del 2020



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Sosa Calero, Sandra María**

**DECLARÓ QUE:**

La tesis “**Evaluación de escenarios de simulación del área de cobertura en redes inalámbricas WiMAX utilizando herramientas de simulación de planificación de radio**”, previa a la obtención del grado Académico de **Magíster en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizó del contenido, veracidad y alcance científico de la tesis del Grado Académico en mención.

Guayaquil, 3 de marzo del 2020

EL AUTOR

---

Sosa Calero Sandra María



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **Sosa Calero, Sandra María**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución de la Tesis de Maestría titulada: “**Evaluación de escenarios de simulación del área de cobertura en redes inalámbricas WiMAX utilizando herramientas de simulación de planificación de radio**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, 3 de marzo del 2020

EL AUTOR

---

Sosa Calero Sandra María

# REPORTE DE URKUND

The screenshot displays the URKUND interface. On the left, document details are shown: 'Documento: Sandra\_Sosa\_MET.docx (D63027595)', 'Presentado: 2020-01-27 00:43 (-05:00)', 'Presentado por: fernandopm23@hotmail.com', 'Recibido: edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com', and 'Mensaje: Revisión Sandra Sosa. 1% de estas 22 páginas, se componen de texto presente en 1 fuentes.' On the right, a 'Lista de fuentes' (List of sources) is visible, including 'BYRON\_SOLORZANO\_FINAL.pdf', 'TESIS BRYAN SANGA.docx', and 'https://www.researchgate.net/publication/29...'. Below the list are 'Fuentes alternativas' (Alternative sources) such as 'BYRON\_SOLORZANO\_TT.pdf', 'BYRON\_SOLORZANO\_TT.docx', and 'BYRON\_SOLORZANO\_TT.docx'. The bottom of the interface features navigation icons and buttons for 'Reiniciar', 'Exportar', and 'Compartir'.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
SISTEMA DE POSGRADO MAESTRIA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA: Evaluación de escenarios de simulación del área de cobertura en redes inalámbricas WIMAX utilizando herramientas de simulación de planificación de radio

AUTOR: Ing. Sosa Calero, Sandra Maria

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Grado Académico de Magister en Telecomunicaciones

TUTOR: M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

19 de Enero del 2020

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
SISTEMA DE POSGRADO MAESTRIA EN

## **Dedicatoria**

El presente trabajo final de Maestría va dedicado a mis padres, Alfredo América Sosa Rodríguez y de manera muy especial a mi madre que ha sido la base fundamental para cumplir este objetivo.

A mi esposo Washington Isaac Jiménez Muñoz y mi hijo Isaac Uriel Jiménez Sosa por tolerar mi ausencia en muchas ocasiones con la finalidad de alcanzar la meta propuesta.

## **EL AUTOR**

Sosa Calero, Sandra María

## **Agradecimientos**

Primero a Dios porque sin su presencia espiritual no hubiese sido posible lograr el objetivo planteado.

A todos los docentes de la Maestría en Telecomunicaciones que tuvieron un excelente desempeño en la enseñanza recibida, y en especial al director del Programa de Maestría en Telecomunicaciones, M. Sc. Manuel de Jesús Romero Paz.

A mi tutor M. Sc. Edwin Fernando Palacios Meléndez que estuvo en todo momento apoyándome en conocimiento y moralmente de manera muy positiva, que sin su ayuda no hubiera sido posible esto.

EL AUTOR

Sosa Calero Sandra María



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f. \_\_\_\_\_

**M. SC. PALACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNANDO**  
TUTOR

f. \_\_\_\_\_

**M. SC. CÓRDOVA RIVADENEIRA, LUIS SILVIO**  
REVISOR

f. \_\_\_\_\_

**M. SC. ZAMORA CEDEÑO, NESTOR ARMANDO**  
REVISOR

f. \_\_\_\_\_

**M. SC. ROMERO PAZ MANUEL DE JESÚS**  
DIRECTOR DEL PROGRAMA



## ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.....	2
1.1. Introducción.....	2
1.2. Antecedentes.....	3
1.3. Definición del problema.....	3
1.4. Justificación del problema a investigar.....	4
1.5. Objetivos.....	4
1.6. Hipótesis.....	4
1.7. Metodología de investigación.....	5
Capítulo 2: Fundamentación Teórica.....	6
2.1. Definición de Redes Inalámbricas WiMAX.....	6
2.2. Estándares WiMAX IEEE 802.16.....	7
2.2.1. Perfiles del sistema WiMAX.....	<b>8</b>
2.3. Estructura de red WiMAX.....	9
2.4. Calidad de servicio (QoS).....	10
2.5. Capa física de WiMAX.....	10
2.5.1. Parámetros de OFDM en redes WiMAX.....	<b>11</b>
2.5.2. Acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales (OFDMA).....	<b>12</b>
2.5.2.1. Estructura de trama de TDD.....	<b>12</b>
2.5.3. Modulación y codificación adaptativa para WiMAX.....	<b>13</b>
2.6. Sistema de antena adaptable.....	14
2.6.1. Formación del haz en enlaces descendentes.....	<b>16</b>
2.6.2. Ejemplo de formación de haces.....	<b>17</b>
2.6.3. Ejemplo de antenas adaptativas.....	<b>18</b>
Capítulo 3: Desarrollo de la propuesta.....	19
3.1. Descripción general del desarrollo.....	19

3.2. Ambiente de trabajo de herramienta de simulación.....	19
3.3. Modelado de redes WiMAX.....	20
3.3.1. Determinación de frecuencia y ancho de banda.....	20
3.3.2. Determinación de la estructura de tramas. ....	21
3.3.3. Determinación de la portadora de radio. ....	22
3.3.4. Características del transmisor.....	23
3.3.5. Parámetros de celda.....	24
3.4. Selección del modelo de propagación de WiMAX. ....	25
3.4.1. Modelo de propagación de COST-231 Hata. ....	25
3.4.2. Modelo de propagación estándar (SPM) ....	26
3.5. Modelado de tráfico .....	28
3.5.1. Definición de tipos y pesos regionales.....	28
3.5.2. Definición de perfil de usuario.....	28
3.5.3. Definición del tipo de movilidad del usuario. ....	30
3.5.4. Identificación de tipos de servicios de usuario. ....	31
3.6. Inclusión de datos geográficos .....	31
3.7. Características de equipos para el modelado de WiMAX.....	32
3.7.1. Características del equipo simulado. ....	33
3.7.1.1. .... Estación	
base.....	33
3.7.1.2. Características de la	
antena.....	34
3.7.1.3. Funciones del dispositivo del	
usuario .....	34
3.7.2. Entradas de planificación de radio. ....	35
3.7.2.1. Información de	
radiofrecuencia. ....	35
3.7.2.2. Información de	
campo. ....	35
3.7.3. Cálculos de presupuesto de enlace. ....	36
3.7.3.1. Cálculo del presupuesto de enlace bajo la condición de que no	
se utiliza antena adaptativa .....	36

3.7.3.2.Cálculo del presupuesto de enlace bajo la condición de que se utiliza antena adaptativa. ....	37
3.8. Resultados de simulación.....	38
Conclusiones .....	43
Recomendaciones .....	44
Bibliografía .....	45

## Índice de Figuras

### Capítulo 2:

Figura 2. 1: Diagrama de bloques de la estructura de una red WiMAX. ....	7
Figura 2. 2: Diagrama de bloques de elementos de una red WiMAX. ....	9
Figura 2. 3: Estructura de tramas TDD para OFDMA. ....	13
Figura 2. 4: Esquema de un sistema de antena multihaz. ....	15
Figura 2. 5: Esquema del modelo de radiación de antena multihaz.....	15
Figura 2. 6: Esquema del sistema de antena adaptativa. ....	16
Figura 2. 7: Explicación de la impresión en antenas adaptativas.....	17
Figura 2. 8: Diagrama de orientaciones de la formación de haces. ....	18

### Capítulo 3:

Figura 3. 1: Presentación de herramienta de selección de proyectos.....	19
Figura 3. 2: Diferentes ventanas del entorno de trabajo para WiMAX. ....	20
Figura 3. 3: Ventana para la selección de frecuencia y ancho de banda.....	21
Figura 3. 4: Determinación de la estructura de tramas. ....	22
Figura 3. 5: Parámetros de técnicas de modulación, velocidad y efectividad de portadora. ....	23
Figura 3. 6: Opciones de selección de portadora.....	23
Figura 3. 7: Ventana de configuración de las características de la antena. .	24
Figura 3. 8: Despliegue de los parámetros de celdas. ....	25
Figura 3. 9: Ventana de selección de modelos de propagación. ....	25
Figura 3. 10: Ventana de asignación del modelo de tráfico para WiMAX. ...	29
Figura 3. 11: Configuración de propiedades del tipo de zona. ....	29
Figura 3. 12: Características del perfil de usuario.....	30
Figura 3. 13: Funciones del dispositivo de usuario. ....	30
Figura 3. 14: Propiedades de identificación de movilidad del usuario.....	30
Figura 3. 15: Propiedades de los tipos de servicios del usuario. ....	31

Figura 3. 16: Ejemplo de selección de coordenadas regionales.....	32
Figura 3. 17: Ejemplo del tipo de mapas agregados a la herramienta de planificación.....	32
Figura 3. 18: Diagrama del patrón horizontal y vertical de la antena Kathrein. .....	34
Figura 3. 19: Resultados de nivel de señal sin AAS fuera del edificio. ....	38
Figura 3. 20: Resultados de nivel de señal con AAS fuera del edificio. ....	39
Figura 3. 21: Resultados de nivel de señal $C/(I + N)$ sin AAS fuera del edificio. .....	40
Figura 3. 22: Resultados de nivel de señal $C/(I + N)$ con AAS fuera del edificio.....	41

## Índice de Tablas

### Capítulo 2:

Tabla 2. 1: Comparativa de los estándares IEEE 802.16. ....	8
Tabla 2. 2: Cuadro de perfiles del sistema WiMAX.....	8
Tabla 2. 3: Cuadro de parámetros de las técnicas OFDM y OFDMA. ....	11
Tabla 2. 4: Cuadro comparativo de las tasas de datos para sistemas WiMAX móviles.....	14
Tabla 2. 5: Cuadro de parámetros de antenas adaptativas Andrew y RFS. ....	18

### Capítulo 3:

Tabla 3. 1: Comparativa de parámetros para los modelos SPM y COST-231. ....	27
Tabla 3. 2: Parámetros del modelo SPM para frecuencias de 2.5 a 3.5 GHz. ....	28
Tabla 3. 3: Parámetros del modelo SPM para frecuencias de 2.5 a 3.5 GHz. ....	35
Tabla 3. 4: Parámetros del cálculo del presupuesto de enlace sin antena adaptativa. ....	36
Tabla 3. 5: Parámetros del cálculo del presupuesto de enlace sin antena adaptativa. ....	37
Tabla 3. 6: Áreas de cobertura según nivel de señal. ....	39
Tabla 3. 7: Áreas de cobertura según niveles de $C/(I + N)$ . ....	40

## Resumen

El presente trabajo de posgrado se introduce la tecnología WiMAX en general, donde primero se explican los estándares de WiMAX, luego se explica la estructura de la red, se explican los servicios utilizados y finalmente se explica la estructura de trama OFDMA. Posteriormente, se explican las características de la tecnología de antena AAS y los modelos matemáticos y se especifican algunos modelos de antena adaptativa. Se presenta el dispositivo de planificación que se simulará. Mientras se introduce el dispositivo, también se determinan los parámetros y el modelo de propagación que se utilizaron en la simulación. Después de definir la región seleccionada en Guayaquil, y las propiedades de campo utilizadas en la región, se realizó el estudio de simulación en la región. En primer lugar, el presupuesto de enlace se calcula de acuerdo con el uso de AAS y sin utilizar AAS donde se discutió de situaciones dependientes e independientes del tráfico.

**Palabras claves:** MULTIPLEXACIÓN, ANTENAS, ADAPTATIVA, COBERTURA, WIMAX, OFDMA.

## **Abstract**

This postgraduate work introduces WiMAX technology in general, where WiMAX standards are first explained, then the network structure is explained, the services used are explained and finally the OFDMA frame structure is explained. Subsequently, the characteristics of the AAS antenna technology and mathematical models are explained and some adaptive antenna models are specified. The planning device to be simulated is presented. While the device is being introduced, the parameters and propagation model that were used in the simulation are also determined. After defining the selected region in Guayaquil, and the field properties used in the region, the simulation study was carried out in the region. First, the link budget is calculated according to the use of AAS and without using AAS where traffic-dependent and independent situations were discussed.

**Keywords:** MULTIPLEXING, ANTENNAS, ADAPTIVE, COVERAGE, WIMAX, OFDMA



## **Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.**

### **1.1. Introducción.**

Según Bulbenkiene et al., (2011) el uso de tecnologías inalámbricas se está expandiendo rápidamente y la tecnología WiMAX (Interoperabilidad mundial para acceso por microondas) se usa más ampliamente. El nuevo estándar WiMAX utiliza primero estaciones de retransmisión (RS) para una mejor calidad de servicio. Los trabajos publicados analizan la influencia de las estaciones repetidoras en la calidad del servicio, así como también analizan la distribución y gestión de recursos de las estaciones repetidoras, creando una topología de red para una mejor calidad del servicio. Sin embargo, no hay estudios específicos realizados para determinar la zona más eficiente para desplegar RS.

Para Song & Issac, (2014) con el desarrollo de la comunicación multimedia, las personas necesitan acceso inalámbrico de banda ancha con mayor velocidad, mayor cobertura y movilidad. El surgimiento de la tecnología WiMAX (Interoperabilidad mundial para acceso por microondas) satisfizo en cierta medida la demanda de Internet inalámbrico de la gente. Si la tecnología LAN inalámbrica (WLAN) resuelve el problema de acceso de los "últimos cien metros", entonces la tecnología WiMAX es la mejor solución de acceso de la "última milla"

Aunque WiMAX es una tecnología de acceso de banda ancha inalámbrica emergente y extremadamente competitiva, aún se desconoce la posibilidad de desarrollo que se ajuste al mercado. Las redes híbridas como complemento de los servicios basados en células o en paquetes basados en IP pueden reflejar completamente las características de una amplia cobertura de red. Significa hacer una coexistencia inalámbrica de una red de área local inalámbrica (WLAN o WiFi, una frase comercial que significa IEEE 802.11x) y WiMAX para dispositivos en diferentes segmentos de tecnología para comunicarse entre sí.

Se han desarrollado diferentes estándares de red para proporcionar el ancho de banda necesario. El ancho de banda de una red es responsable de una serie de atributos de calidad de servicio (QoS) que exhibe la red. La implementación de una red está asociada con muchos costos. Estos costos determinan la viabilidad de un proyecto y los esfuerzos se dirigen a equilibrar las compensaciones de inversión. El costo de desplegar la infraestructura es proporcional al tiempo necesario para completar la implementación. Por esa razón, se han descrito diferentes estándares IEEE 802.11x (Wi-Fi) e IEEE 802.16x (WiMAX).

## **1.2. Antecedentes.**

El presente trabajo se basó en el análisis de cobertura utilizando antenas adaptativas y para esto se analizaron las siguientes publicaciones:

- a. (Joe et al., 2019) emplea la Antena de Patch Microstrip (MPA) tiene una posición valiosa en el comercio de la comunicación, ya que completa la dimensión de la antena para marchitarse y el desembolso de la diplomacia de la comunicación se reduce debido a sus posesiones multibanda.
- b. Thatere & Zade, (2020) emplean en su trabajo investigativo la antena microstrip que aumenta el ancho de banda con el uso de la estructura de tierra defectuosa (DGS). Con el uso de DGS, el ancho de banda aumenta de manera eficiente al 35.87% en comparación con la antena de parche rectangular normal. La antena propuesta fue diseñada para la aplicación Wi-Fi/WiMAX a la frecuencia de resonancia de 5.5 GHz. La antena de estructura de tierra defectuosa en forma de I (DGS) mejora el ancho de banda de la antena. Se comparan los resultados de la antena simulada y fabricada.

## **1.3. Definición del problema**

Necesidad de evaluar los escenarios de simulación del área de cobertura mediante el uso de sistemas de antenas adaptativas (AAS) en redes inalámbricas WiMAX utilizando herramientas de simulación de planificación de radio.

#### **1.4. Justificación del problema a investigar.**

En el presente trabajo, la herramienta de simulación de AAS permitirá realizar un estudio de simulación en una región de Guayaquil, cómo el uso de AAS tiene un efecto en la calidad de la señal y, por lo tanto, la extensión del área de cobertura se incrementa. Con el estudio de simulación, se planificó demostrar el rendimiento de la antena adaptativa a través de redes de comunicación inalámbrica WiMAX. No se consideró el efecto de los coeficientes en los algoritmos utilizados por las antenas adaptativas sobre el éxito. Además, la tecnología de antena MIMO no está dirigida.

#### **1.5. Objetivos**

##### **1.5.1. Objetivo General:**

Evaluar los escenarios de simulación del área de cobertura mediante el uso de sistemas de antenas adaptativas (AAS) en redes inalámbricas WiMAX utilizando herramientas de simulación de planificación de radio.

##### **1.5.2. Objetivos específicos:**

- ✓ Describir el estado del arte de redes WiMAX y estándares de comunicación inalámbrica de banda ancha basado en IEEE 802.16.
- ✓ Diseñar los escenarios de simulación de la cobertura de radio utilizando el modelo de propagación estándar modificado del COST-231 Hata.
- ✓ Evaluar los resultados obtenidos del área de cobertura que se basan en los niveles de intensidad de la señal utilizando herramienta de planificación de radio.

#### **1.6. Hipótesis**

Mediante el análisis de rendimiento, se selecciona el tipo de antena adaptativa como el tipo de antena apropiada para el presente estudio. Como resultado, se pretende demostrar que los sistemas de antena adaptativa (AAS) aumenta el rendimiento y cobertura de la red WiMAX.

### **1.7. Metodología de investigación.**

El presente trabajo emplea la investigación descriptiva. El objetivo principal de la investigación descriptiva es la descripción del estado de cosas. La característica principal de este método es describir los fundamentos teóricos.

## Capítulo 2: Fundamentación Teórica.

### 2.1. Definición de Redes Inalámbricas WiMAX.

Para Aldmour, (2013) WiMAX proporciona comunicación inalámbrica de banda ancha, ha sido desarrollado por el foro WiMAX bajo el estándar IEEE 802.16 para proporcionar a los usuarios acceso a Internet de alta velocidad y comunicación de voz de alta calidad. Los estándares WiMAX consiste en dos normativas principales. El primero es IEEE 802.16-2004, el estándar fijo de WiMAX que no admite movilidad, y el otro es el estándar IEEE 802.16e, que admite movilidad y aparece como WiMAX móvil. (Hendaoui & Kahoul, 2019)

La estructura de la red móvil WiMAX (véase la figura 2.1) se divide en tres secciones principales dentro del marco de los estándares establecidos por el Foro WiMAX. La primera es la sección de dispositivos de usuario donde se encuentran los dispositivos de los usuarios. La segunda parte es el acceso a la red de servicios (*Access Service Network, ASN*). Los elementos de red en esta sección son dos, la estación base (*Base Station, BS*) y la puerta de enlace del acceso a la red de servicios (*ASN GateWay, GW*). La tercera parte es la red de servicio de conexión (*Connectivity Service Network, CSN*). Los elementos en esta sección son generalmente tres como servidor de autenticación-autorización-precio (Authentication, Authorization and Accounting, AAA), Agente principal (HA), puerta de enlace (GW).

Se definen diferentes flujos de servicio para cada servicio para garantizar una calidad óptima en los servicios utilizados por los usuarios. Estos flujos de servicio se clasifican según los parámetros de calidad de servicio (*Quality of Service, QoS*).

El método de acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA*) se utiliza como método de acceso en la interfaz aérea en redes WiMAX. La duplexación por división de tiempo (*Time Division Duplex, TDD*) ha sido el método de acceso más utilizado como estructura de tramas.

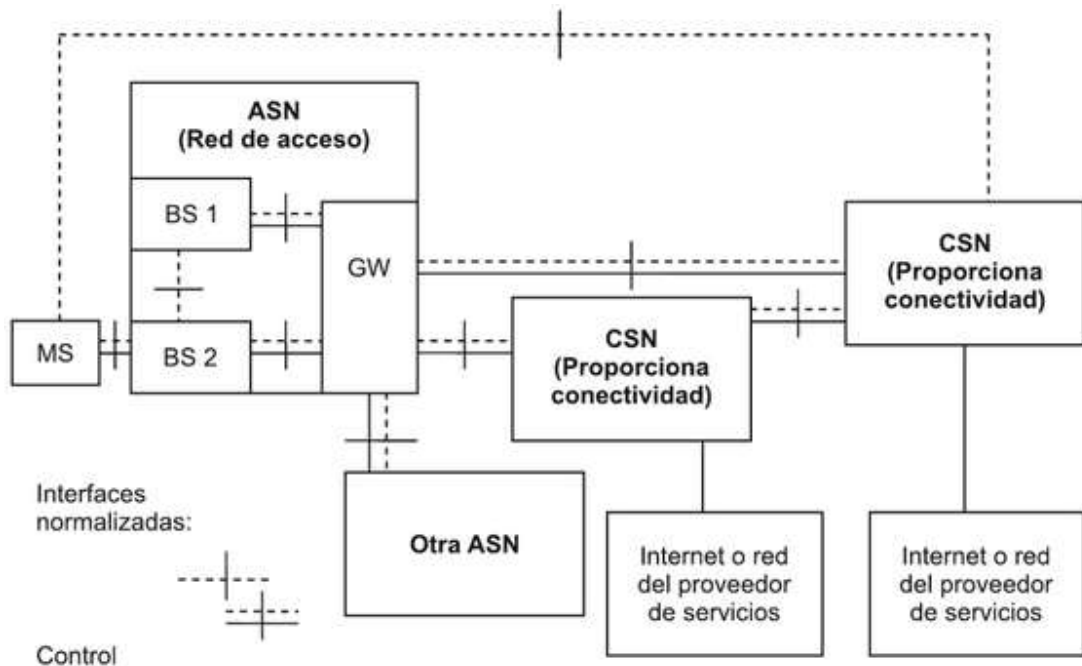


Figura 2. 1: Diagrama de bloques de la estructura de una red WiMAX.  
Fuente: (Hernando Rábanos et al., 2014)

Los sistemas de antenas adaptativas (*Adaptive Antenna System, AAS*) y de múltiples entradas y múltiples salidas (*Multiple-Input Multiple-Output, MIMO*) se utilizan en las redes WiMAX para proporcionar una cobertura más amplia y aumentar la capacidad de la estación base. En este estudio, se eligió el tipo de antena adaptativas para ser utilizado en la red WiMAX.

## 2.2. Estándares WiMAX IEEE 802.16.

El grupo de trabajo IEEE 802.16 se reunió por primera vez en 1998 para desarrollar un estándar de interfaz aérea para banda ancha inalámbrica. El grupo se centró primero en un sistema de banda ancha inalámbrico de punto a multipunto (*Point to Multipoint, P2M*) basado en línea de vista (*Line of Sight, LOS*) de 10 GHz – 66 GHz. Después de estos esfuerzos, el primer estándar 802.16 se completó en noviembre de 2001. (Kamali et al., 2012)

El trabajo posterior del grupo de trabajo IEEE 802.16 reveló el estándar 802.16-2004, que se llama WiMAX fijo, utilizando una interfaz física basada en multiplexación por división de frecuencia ortogonal (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM*). Finalmente, con la adición de movilidad al estándar 802.16-2004, el estándar IEEE 802.16e-2005 se completó en

diciembre de 2005. Este estándar se llama Mobile WiMAX. Los estándares IEEE 802.16 se resumen en la tabla 2.1. (Akashdeep et al., 2014)

Tabla 2. 1: Comparativa de los estándares IEEE 802.16.

Estándares	802.16	802.16-2004	802.16e-2005
Fecha de aprobación	Dic-2001	Jun-2004	Dic-2005
Bandas de frecuencias (GHz)	10 – 66	2 – 11	2 – 11 (Fijo) 2 -6 (móvil)
Aplicación	Fijo	Fijo	NLOS fijo y móvil
Modulación	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Velocidad de datos (Mbps)	32 – 134.4	1 – 75	1 – 75
Métodos de partición	TDD, FDD	TDD, FDD	TDD, FDD
Anchos de banda (MHz)	20, 25 y 28	1.75, 3.5, 7, 14, 1.25, 5, 10, 15, 8.75	1.75, 3.5, 7, 14, 1.25, 5, 10, 15, 8.75

Fuente: (Akashdeep et al., 2014)

### 2.2.1. Perfiles del sistema WiMAX.

Los perfiles del sistema WiMAX (véase la tabla 2.2) son preparados por el grupo de trabajo técnico (*Technical Group Working, TGW*) y posteriormente aprobados por el foro WiMAX. Mientras se realizan los estudios de planificación deben seleccionarse las frecuencias adecuadas para estos perfiles y las estaciones base que se utilizarán deben ser compatibles con estos perfiles.

Tabla 2. 2: Cuadro de perfiles del sistema WiMAX.

Perfiles del Sistema	Espectro (GHz)	Método de partición	Ancho de canal (MHz)
WiMAX fijo (IEEE 802.16-2004, OFDM)	3.4 – 3.6	TDD	3.5
	3.4 – 3.6	TDD	7
	3.4 – 3.6	FDD	3.5
	3.4 – 3.6	FDD	7
	5.725 – 5.850	TDD	10
IEEE 802.16e-2005, OFDM	4.935 - 4.990	TDD	5
WiMAX móvil (IEEE 802.16e-2005, OFDMA)	2.3 – 2.4	TDD	5, 10 (Dual)
	2.3 – 2.4	TDD	8.75
	2.496 – 2.690	TDD	5, 10 (Dual)
	3.4 – 3.6	TDD	5
	3.4 – 3.6	TDD	7

Fuente: (Akashdeep et al., 2014)

### 2.3. Estructura de red WiMAX

Mientras que el grupo de trabajo IEEE 802.16e-2005 estaba trabajando en el desarrollo de la interfaz aérea, no hizo una descripción de la estructura de la red de principio a fin (E2E). Este trabajo fue realizado por el foro WiMAX. El foro WiMAX ha desarrollado protocolos y estructura de red WiMAX, y luego lo convirtió en un estándar.

La estructura de la red WiMAX generalmente consta de tres partes, tal como se muestra en la figura 2.2. El primero es el dispositivo del usuario llamado dispositivo local del cliente (*Customer Premises Equipment, CPE*), que permite al usuario móvil acceder a la red WiMAX. La segunda parte es ASN, que consiste en una o más estaciones base y ASN-GW. La tercera parte es CSN, que proporciona conexión de protocolo de Internet (IP) con otras redes y realiza las funciones necesarias para que los usuarios accedan a la red WiMAX.

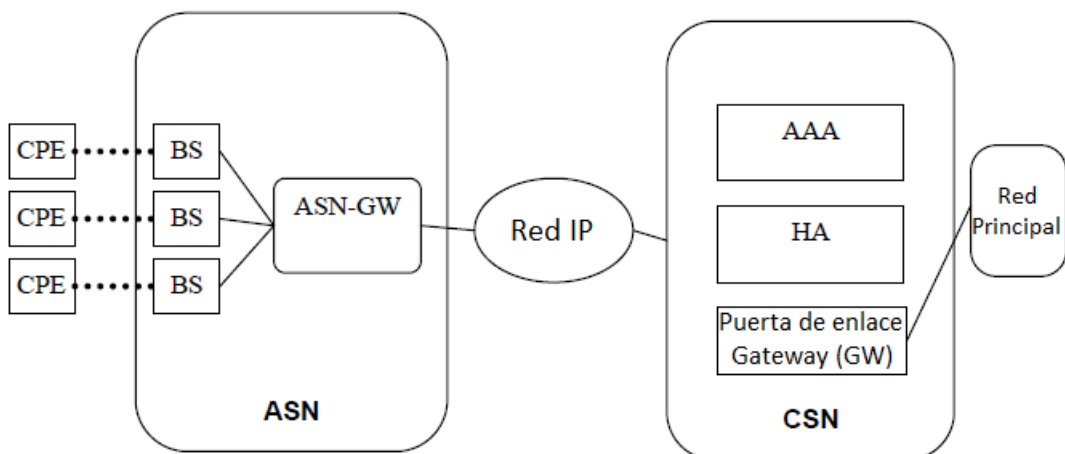


Figura 2. 2: Diagrama de bloques de elementos de una red WiMAX.  
Fuente: (Hernando Rábanos et al., 2014)

La estación base (BS) es la unidad que permite que el dispositivo de usuario utilice la interfaz aérea para acceder a la red WiMAX. Además, es el elemento de red que juega un papel importante en la realización de la movilidad y la provisión de calidad de servicio (QoS). También, es responsable de la gestión de las estaciones base ASN-GW, la autenticación requerida para conectar los dispositivos de los usuarios a la red, la provisión de IP móvil para los usuarios y la gestión de QoS. El servidor AAA es la unidad del servidor donde la información del usuario está disponible y la autenticación se realiza



cuando los usuarios se conectan a la red WiMAX. HA es un elemento de red que proporciona IP móvil a los usuarios. IP móvil es un protocolo que permite que la IP continúe sin cambios cuando el usuario se conecte desde una estación base a la otra estación base.

#### **2.4. Calidad de servicio (QoS)**

Los parámetros de calidad de servicio son los parámetros que permiten a los usuarios recibir los servicios con criterios de calidad. Estos parámetros difieren según el servicio utilizado. Se han definido varios flujos de servicios para los servicios utilizados. En otras palabras, estos flujos de servicio se clasifican de la siguiente manera: (Garg & Tyagi, 2017)

- Servicio de concesión no solicitada (*Unsolicited Grant Service, UGS*): esta clase de servicio se utiliza en aplicaciones de voz sobre IP (VoIP) que permiten un flujo de datos de velocidad constante y el tamaño del paquete es constante. (Aalamifar & Lampe, 2017)
- Servicio de consulta en tiempo real (*Real-time Polling Services, RTPS*): esta clase de servicios se ha desarrollado para proporcionar aplicaciones en tiempo real de alta calidad, por ejemplo, la transmisión de video.
- Servicio de consulta en tiempo no real (*Non-Real-time Polling Services, NRTPS*): esta clase de servicios se puede utilizar para la transmisión de datos en tiempo no real, como el protocolo de transferencia de archivos (FTP).
- Mejor esfuerzo (Best Effort): es la clase de servicio utilizada para la aplicación de acceso a Internet sin una garantía mínima de servicio.
- Tasa variable extendida en tiempo real (*Extended Real-Time Variable Rate, ERT-VR*): es una clase de servicio que se utiliza en aplicaciones en tiempo real, pero permite la transferencia de datos a diferentes velocidades y garantiza la velocidad requerida para la calidad del servicio.

#### **2.5. Capa física de WiMAX.**

La capa física de WiMAX está basada en la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM). OFDM es una técnica de transmisión que

permite la transmisión de datos a altas velocidades y, por lo tanto, proporciona una transmisión de alta calidad de aplicaciones de audio y video.

### 2.5.1. Parámetros de OFDM en redes WiMAX

Existen diferentes aplicaciones de la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) utilizadas en redes WiMAX. El estándar IEEE 802.16-2004 utiliza la técnica OFDM basada en redes WiMAX fija de 256 FFT, mientras que el estándar IEEE 802.16e-2005 utiliza la técnica de acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales (OFDMA) escalable (*Scalable OFDMA, SOFDMA*) basad en la tecnología WiMAX móvil FFT estándar, que varía en tamaño de 128 bits a 2.048 bits. Los parámetros relacionados con las técnicas OFDM y OFDMA se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2. 3: Cuadro de parámetros de las técnicas OFDM y OFDMA.

Perfiles del Sistema	Espectro (GHz)	Método de partición	Ancho de canal (MHz)
WiMAX fijo (IEEE 802.16-2004, OFDM)	3.4 – 3.6	TDD	3.5
	3.4 – 3.6	TDD	7
	3.4 – 3.6	FDD	3.5
	3.4 – 3.6	FDD	7
	5.725 – 5.850	TDD	10
IEEE 802.16e-2005, OFDM	4.935 - 4.990	TDD	5
WiMAX móvil (IEEE 802.16e-2005, OFDMA)	2.3 – 2.4	TDD	5, 10 (Dual)
	2.3 – 2.4	TDD	8.75
	2.496 – 2.690	TDD	5, 10 (Dual)
	3.4 – 3.6	TDD	5
	3.4 – 3.6	TDD	7

Fuente: (Mokhtar, 2016)

En WiMAX fijo utiliza OFDM cuyo tamaño de la transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform, FFT*) es fijo y de 256. Por ejemplo, 192 de estos se utilizan como subportadoras piloto para la transmisión de datos, 8 se utilizan para garantizar la sincronización y distinguir canales, y el resto se utilizan como bandas de guarda. Como el tamaño de la FFT es constante, la brecha de frecuencia entre las subportadoras aumenta a medida que aumenta la frecuencia. Esto evita que el espectro se use de manera efectiva.

Se utiliza OFDMA escalable en redes WiMAX móviles para aumentar esta eficiencia. En consecuencia, el tamaño de la FFT varía entre 128 y 1048

según el ancho de banda. Sin embargo, la brecha de frecuencia de la subportadora se mantiene constante en cada ancho de banda de 10,94 kHz.

### **2.5.2. Acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales (OFDMA).**

En esta parte se forman los subcanales dividiendo las subportadoras en diferentes grupos. En otras palabras, se asignan diferentes canales a diferentes usuarios. Este principio de funcionamiento se lo conoce como el método de acceso múltiple. Finalmente, este tipo de método de acceso múltiple se denomina OFDMA.

Aunque existen estructuras de subcanales de diferentes maneras, las subportadoras de WiMAX móvil utilizan el método de uso parcial de subportadoras (Partial Usage of SubCarriers, PUSC). Este método permite que ciertas partes de un subcanal sean utilizadas por subportadoras que pertenecen a usuarios específicos.

#### **2.5.2.1. Estructura de trama de TDD.**

Aunque el estándar IEEE 802.16e inicialmente solo admitía la estructura de tramas TDD, en la actualidad se admiten estructuras de tramas FDD. Aunque ambos sistemas tienen ventajas entre sí, para lo cual se pueden enumerar las razones por las cuales se prefiere la estructura de tramas TDD:

- a. TDD permite ajustar la relación de enlace descendente/ascendente. En FDD, siempre se utiliza una relación constante de enlace descendente/ascendente. Nuestra capacidad para cambiar esta relación nos permite usar la banda del espectro de manera más efectiva.
- b. Es más conveniente utilizar la estructura TDD en tecnologías de antena avanzadas donde la adaptación del enlace es importante.
- c. A diferencia de FDD, es suficiente utilizar un solo canal para enlace descendente y enlace ascendente en TDD. Esto da flexibilidad en la asignación del espectro.
- d. En la estructura TDD, el diseño del receptor/transmisor es menos costoso porque es más sencillo su diseño.

La figura 2.3 muestra la estructura de tramas de TDD. Cada cuadro se divide en dos partes principales, DL y UL. Para evitar interferencias entre las secciones DL y UL, se utilizan bandas de guarda, tales como, TTG y RTG. La información de control utilizada para garantizar la comunicación sin problemas es la siguiente:

- Datos iniciales: la sincronización de información inicial se encuentra en el primer símbolo de la trama OFDM.
- Encabezado de verificación de trama (FCH): contiene información de configuración de trama, como la longitud de los mensajes de FCH MAP que vienen después de la información inicial y los subcanales utilizados.
- DL-MAP y UL-MAP: proporciona información de control y asignación de subcanal DL-MAP y UL-MAP.
- UL CQICH: Incluye solicitudes de frecuencia, ajuste de potencia y ancho de banda para la estación móvil.
- UL ACK: El canal utilizado para la retroalimentación de la información requerida para la estación móvil.

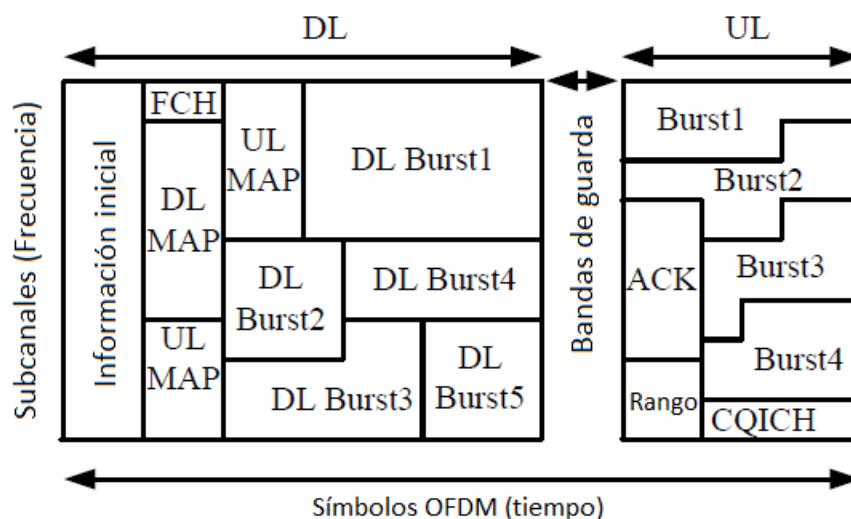


Figura 2. 3: Estructura de tramas TDD para OFDMA.

Fuente: (Mokhtar, 2016)

### 2.5.3. Modulación y codificación adaptativa para WiMAX.

Dependiendo de las condiciones del canal, WiMAX admite diferentes métodos de modulación y codificación. Se utilizan métodos de modulación de amplitudes en cuadratura 64 (*64 Quadrature Amplitude Modulation, 64-QAM*)

en donde las condiciones de radio son buenas, es decir, el ruido es bajo y admite los métodos de modulación 16-QAM y de desplazamiento de fase cuádruple (*Quadruple Phase Shift Keying, QPSK*), respectivamente, según las condiciones de radio. De esta manera, la técnica de utilizar diferentes métodos de modulación y codificación de acuerdo con diferentes condiciones de radio se llama método modulación y codificación adaptativa (*Adaptive Modulation and Coding, AMC*). Este método permite el uso más efectivo del espectro, aumentando la eficiencia. En otras palabras, permite a los usuarios acceder a velocidades más altas.

Los factores que determinan la velocidad de datos máxima que se puede alcanzar en una celda son, el ancho de banda, la técnica de modulación y codificación utilizada, la relación de enlace descendente/ascendente en TDD. En consecuencia, las velocidades máximas que se pueden lograr utilizando anchos de banda de 5 MHz y 10 MHz, se muestran comparativamente en la tabla 2.4.

Tabla 2. 4: Cuadro comparativo de las tasas de datos para sistemas WiMAX móviles.

Modulación	Tasa de código	5 MHz DL (Mbps)	5 MHz UL (Mbps)	10 MHz DL (Mbps)	10 MHz UL (Mbps)
QPSK	1/2	3.17	2.28	6.34	4.70
	3/4	4.75	3.43	9.50	7.06
16-QAM	1/2	6.34	4.57	12.67	9.41
	3/4	9.50	6.85	19.01	14.11
	1/2	9.50	6.85	19.01	14.11
64-QAM	1/2	12.67	9.14	25.34	18.82
	3/4	14.26	10.28	28.51	21.17
	5/6	15.84	11.42	31.68	23.52

Fuente: (Mokhtar, 2016)

## 2.6. Sistema de antena adaptable.

El sistema de antena adaptativa (AAS) es uno de los tipos de antena conocidos como antena inteligente (Smart Antenna). El otro tipo de antena inteligente es la antena multihaz. En antenas de haces múltiples, la radiación se produce con haces fijos múltiples. En este sistema de antena, el usuario se

conecta con la estación base utilizando el haz de señal alto. Luego, si el usuario cambia su ubicación, continúa comunicándose, usando uno de los otros paquetes, tal como se muestra en la figura 2.4.

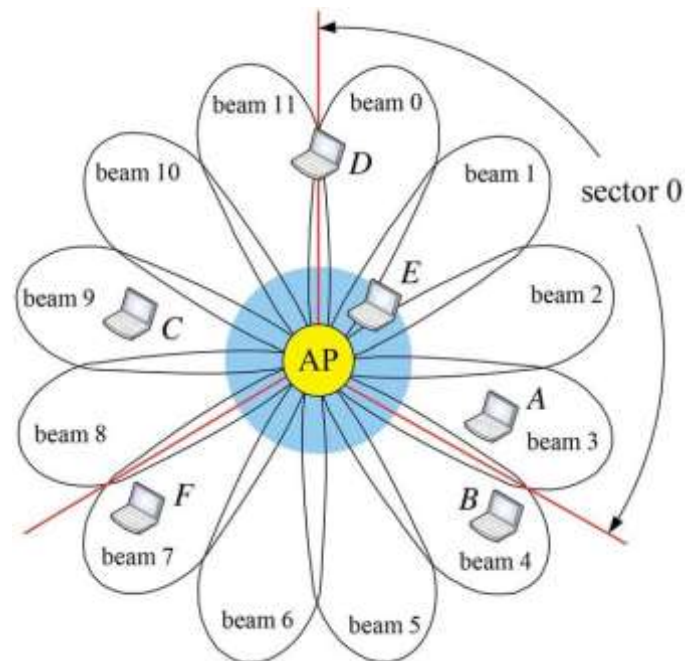


Figura 2. 4: Esquema de un sistema de antena multihaz.  
Fuente: (Chou et al., 2014)

Las antenas adaptativas son el tipo más ventajoso de sistema de antena inteligente en términos de uso efectivo del ancho de banda existente. Estas antenas reducen la tasa de interferencia, permitiendo una mayor calidad de señal. Estas antenas consisten en conjuntos de antenas. Gracias a estos conjuntos de antenas y algoritmos utilizados, el haz principal puede enfocarse hacia el usuario y seguir al usuario, tal como se muestra en la figura 2.5.

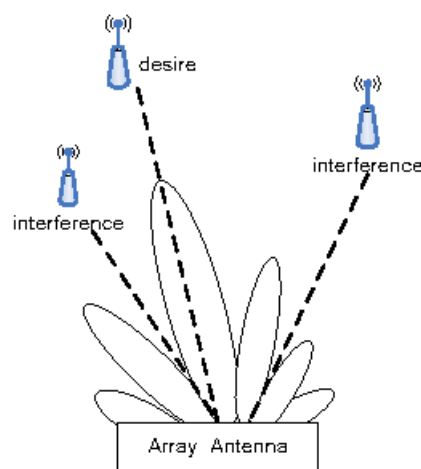


Figura 2. 5: Esquema del modelo de radiación de antena multihaz.  
Fuente: (Uthansakul et al., 2010)

El mecanismo de trabajo de la antena adaptativa se puede resumir de la siguiente manera. Primero, se estima la dirección de llegada de la señal del usuario. Por lo tanto, se detecta la señal del usuario en el objetivo. El paquete luego se dirige hacia el usuario en el objetivo. El paquete se dirige en la dirección del movimiento del usuario, así como los movimientos del usuario. Finalmente, se detecta al usuario que interfiere con el efecto de interferencia y se evita una interferencia haciendo una orientación vacía hacia este usuario.

### 2.6.1. Formación del haz en enlaces descendentes.

La formación del haz es la dirección máxima del patrón de antena hacia la dirección del objetivo. También se puede definir como la orientación del haz principal hacia esa dirección de acuerdo con el desplazamiento del usuario objetivo. La figura 2.6 muestra la estructura del algoritmo de antena adaptativa que permite la formación de haces.

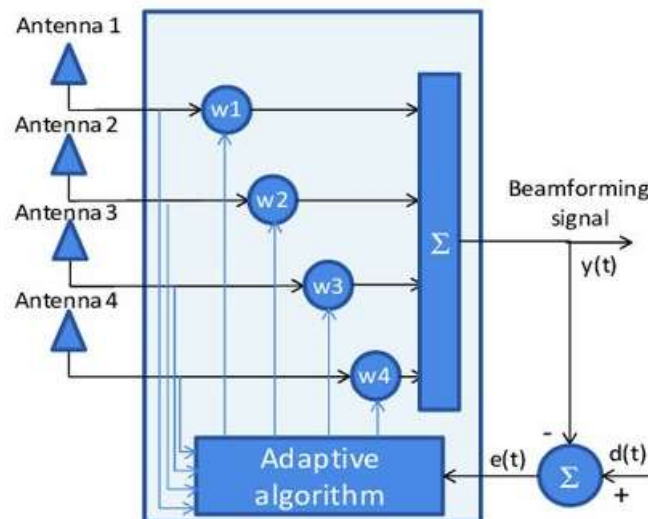


Figura 2. 6: Esquema del sistema de antena adaptativa.  
Fuente: (Salas Natera et al., 2011)

Se puede definir el vector en cada dirección, llamado vector de dirección en forma compleja, de la siguiente manera:

$$S = \left[ 1, e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d \cos(\Phi)}, e^{j\frac{2\pi}{\lambda}2d \cos(\Phi)}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(n-1)d \cos(\Phi)} \right]^T$$

Aquí,  $n$  muestra el número de antenas,  $d$  muestra la distancia entre dos elementos de antena adyacentes y el ángulo de llegada de la onda, tal como se puede observar en la figura 2.7.

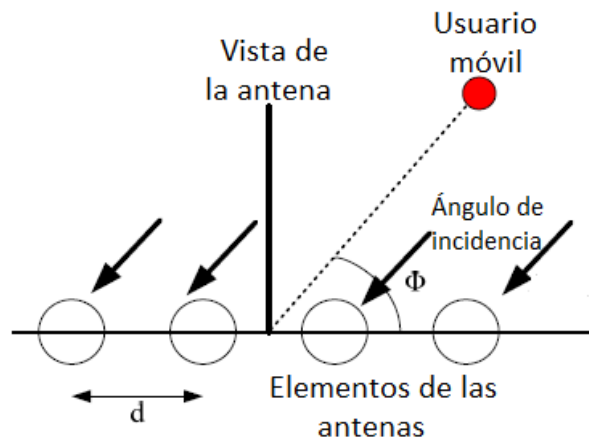


Figura 2. 7: Explicación de la impresión en antenas adaptativas.  
Fuente: (Salas Natera et al., 2011)

El vector de dirección para cada usuario se puede encontrar calculando el ángulo de incidencia de acuerdo con el punto medio del sistema de antena adaptativa. Los vectores de peso ( $w$ ) compensan la diferencia de fase entre cada señal para enfocar la potencia en una dirección en la dirección máxima en la formación del haz.

El vector de peso y la ganancia de antena total para cada elemento de antena se muestran en las fórmulas a continuación:

$$w_n = |w_n| e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}nd \cos \Phi}$$

$$G_{total}(\theta)[dB] = 20 \log_{10} \left( \sum_{n=0}^{N-1} g_n(\theta) w_n e^{j\frac{2\pi}{\lambda}nd \sin(\theta)} \right)$$

Donde,  $\theta$  es el ángulo desde la dirección de vista de la antena hasta la dirección del usuario objetivo en sentido horario.  $g_n(\theta)$  muestra el valor de ganancia de cada elemento de antena, y está definido por:

$$g_n(\theta) = 10^{\frac{g_n[dB](\theta)}{20}}$$

### 2.6.2. Ejemplo de formación de haces.

La figura 2.8 muestra el diagrama orientación del punto del haz de antenas adaptativas. En la dirección del usuario objetivo ( $111^\circ$ ) y la fuente que causa interferencias en la dirección de  $91^\circ$ . Para minimizar la interferencia, el haz se ha reducido en la dirección del usuario objetivo. Aquí, el haz principal



se muestra en azul, el haz que cambia de forma debido a la interferencia es de color rojo, y el patrón de orientación de antena única se muestra en verde.

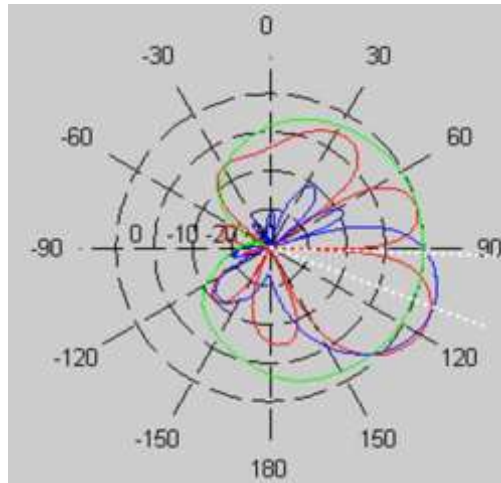


Figura 2. 8: Diagrama de orientaciones de la formación de haces.  
Fuente: (Salas Natera et al., 2011)

### 2.6.3. Ejemplo de antenas adaptativas.

Las características de antena adaptativa de dos fabricantes, Andrew y RFS, se dan como ejemplos:

Andrew: APW425-12014 (2500 MHz), APW435-12014 (3500 MHz)

RFS: W425-90ANV (2500 MHz), W435-90ANV (3500 MHz)

Los parámetros de la antena adaptativa se especifican en la tabla 3.1.

Tabla 2. 5: Cuadro de parámetros de antenas adaptativas Andrew y RFS.

	Andrew	RFS
Frecuencia (MHz)	2300 – 2700 3300 – 3800	2300 – 2700 3300 – 3800
Número de elementos	4	4
Ganancia de elementos (dBi)	17	15.5
Valor HPBW de un elemento	90° horizontal 5° – 6° vertical	90° horizontal 5° – 6° vertical
Ganancia de dirección de visión (dBi)	23	21.5
Ganancia de patrón de transmisión (dBi)	18	17
Longitud	1.35 m (2500 MHz) 1 m (3500 MHz)	

Fuente: (Salas Natera et al., 2011)

## Capítulo 3: Desarrollo de la propuesta.

### 3.1. Descripción general del desarrollo.

En este capítulo se realiza la planificación de redes de radio utilizando herramienta de simulación. Como herramienta de simulación, se utilizó la herramienta de planificación de redes de radio A9155.

### 3.2. Ambiente de trabajo de herramienta de simulación.

La herramienta de simulación A9155 puede simular tecnología como GSM, UMTS, CDMA 2000, TD-SCDMA, WiMAX 802.16d, WiMAX 802.16e, tal como se muestra en la figura 3.1. En este estudio, se simula la red WiMAX móvil, pero se seleccionó WiMAX 802.16e.

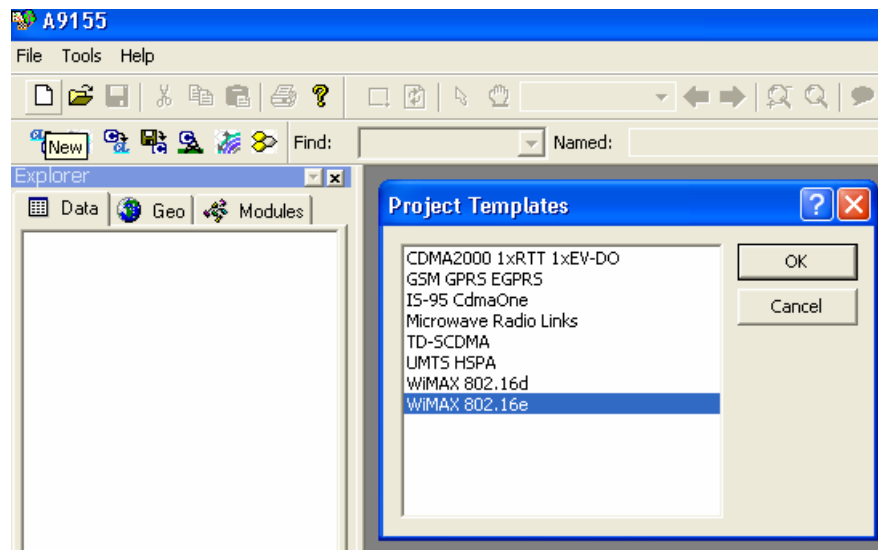


Figura 3. 1: Presentación de herramienta de selección de proyectos.  
Elaborado por: Autor

El entorno de trabajo consta de 3 pestañas principales: "Datos", "Geo" y "Módulos", tal como se muestra en la figura 3.2. La pestaña "Datos" es la pestaña donde se encuentra la información del campo, la estación base, la antena utilizada y los parámetros del equipo de la estación del usuario de estos campos. Esta pestaña también incluye la subpestaña "Predicciones", donde se realizan estimaciones de cobertura. En la pestaña "Geo", se tiene la información geográfica de la región que será simulado. Finalmente, en la pestaña "Módulos", se encuentra la información del modelo de propagación que se encuentra disponible.

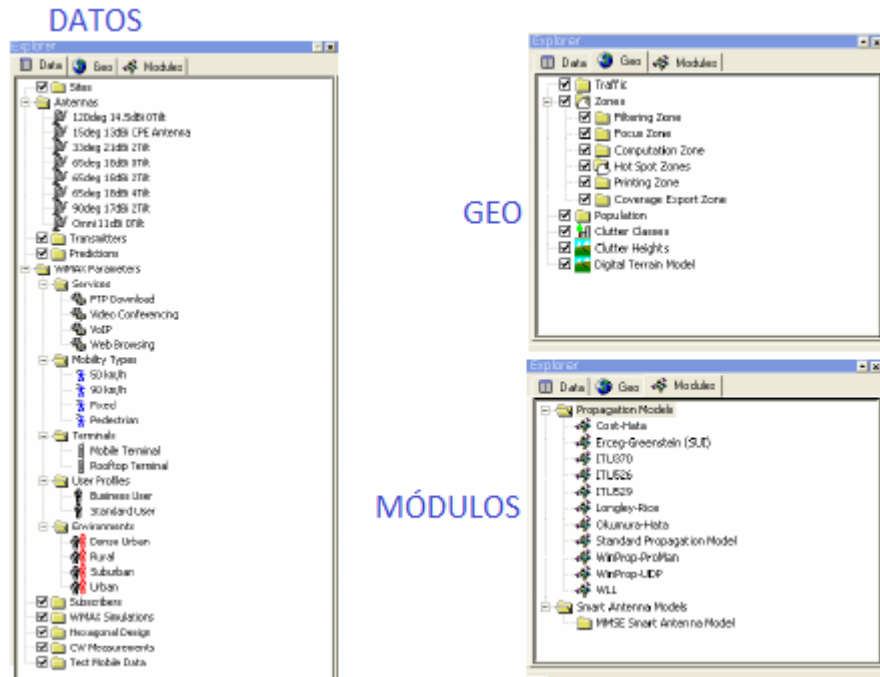


Figura 3. 2: Diferentes ventanas del entorno de trabajo para WiMAX.  
Elaborado por: Autor

### 3.3. Modelado de redes WiMAX.

Al modelar redes WiMAX, en primer lugar, se define la frecuencia de la banda que se utilizará en este sistema. Luego, se determinan uno por uno, la estructura de la trama de radio, las propiedades del operador, las características del equipo WiMAX que se utilizará, los parámetros de cada sitio y las celdas que pertenecen a estos sitios. En segundo lugar, se selecciona el modelo de propagación apropiado que se utilizará durante la simulación. Al elegir el modelo de propagación que se empleará, se tendrá en cuenta la frecuencia a utilizar y las características de la región de los usuarios. Finalmente, se realiza el modelado del tráfico. Al modelar el tráfico, se tienen en cuenta las características del equipo del usuario y qué servicios utilizará el usuario.

#### 3.3.1. Determinación de frecuencia y ancho de banda

En la figura 3.3 se muestran los datos seleccionados para la determinación de frecuencias en el rango de 3.4 GHz y se prefiere un ancho de banda ampliamente utilizado de 5 MHz.

General

Name: 3.4 GHz - 5 MHz

DL Start Frequency: 3,400 MHz UL Start Frequency: MHz

First Channel Number: 0 Last Channel Number: 48

Channel Width: 5 MHz

Excluded Channels:

Adjacent Channel Suppression Factor: 20 dB

Sampling Factor: 1.12

Duplexing Method: TDD

OK Cancel Apply

Figura 3. 3: Ventana para la selección de frecuencia y ancho de banda.  
Elaborado por: Autor

Al seleccionar la frecuencia, se determinan los números de canal, el valor del factor de supresión del canal adyacente, el valor del factor de muestreo y el método de duplicación necesarios para evitar la interferencia entre canales.

### 3.3.2. Determinación de la estructura de tramas.

Los valores por considerar al determinar la estructura de tramas son los siguientes (véase la figura 3.4):

- Duración de la trama: el tiempo desde el principio hasta el final de la trama se denomina duración de trama. Este período se define como 5 ms.
- Relación de prefijo cíclico: la repetición al principio del final del símbolo para evitar interferencias entre símbolos y canales, pero también para garantizar la sincronización, se denomina velocidad de prefijo periódica. Esta tasa se define como 1/8.
- Sobrecarga (Overhead) fija: es el valor expresado en la duración del símbolo y tiene funciones, como garantizar que la sincronización no pertenezca a los usuarios. Para enlaces descendentes se selecciona “2” y para enlaces ascendentes se escoge “1”.
- Sobrecarga variable: es el valor que varía según el tiempo de trama o el ancho de banda y se calcula como la relación entre el enlace ascendente y el enlace descendente.

- **Parámetros TDD:** el valor que muestra el porcentaje de enlace descendente asignado como porcentaje en la trama utilizada es la velocidad de enlace descendente (relación DL). Aquí, se utilizó el 75%. Los valores de tiempo de protección de remitente a remitente (TTG) y de tiempo de protección de remitente a remitente (RTG) son los valores determinados para garantizar la sincronización y evitar interferencias.

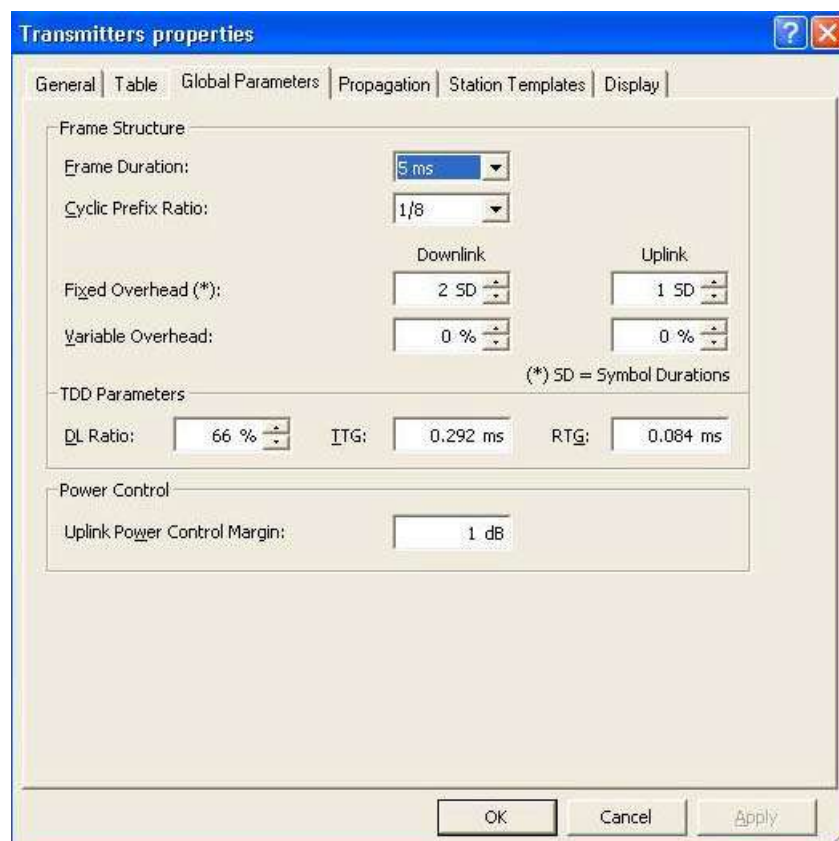


Figura 3. 4: Determinación de la estructura de tramas.  
Elaborado por: Autor

### 3.3.3. Determinación de la portadora de radio.

Al determinar las portadoras de radio, se debe tener en cuenta los parámetros de la técnica de modulación, la velocidad de código y la efectividad de la portadora (bit/símbolo), tal como se muestra en la figura 3.5.

Para utilizar el espectro de manera más efectiva, se selecciona la portadora que se utilizará de acuerdo con la relación portadora/interferencia (C/I) o portadora/ruido (C/N), tal como se muestra en la figura 3.6. A medida

que mejoran las condiciones de radio, la técnica de modulación utilizada varía desde el cambio de fase dual (BPSK) a 64 QAM. Esto aumenta la eficiencia al causar un aumento en el número de bits que pueden transportarse con un símbolo.

Radio Bearer Index	Name	Modulation	Channel Coding Rate	Bearer Efficiency (bits/symbol)
1	BPSK1/2	BPSK	0.5	0.5
2	QPSK1/2	QPSK	0.5	1
3	QPSK3/4	QPSK	0.75	1.5
4	16QAM1/2	16QAM	0.5	2
5	16QAM3/4	16QAM	0.75	3
6	16QAM1	16QAM	1	4
7	64QAM2/3	64QAM	0.67	4
8	64QAM3/4	64QAM	0.75	4.5
9	64QAM1	64QAM	1	6

Figura 3. 5: Parámetros de técnicas de modulación, velocidad y efectividad de portadora.

Elaborado por: Autor

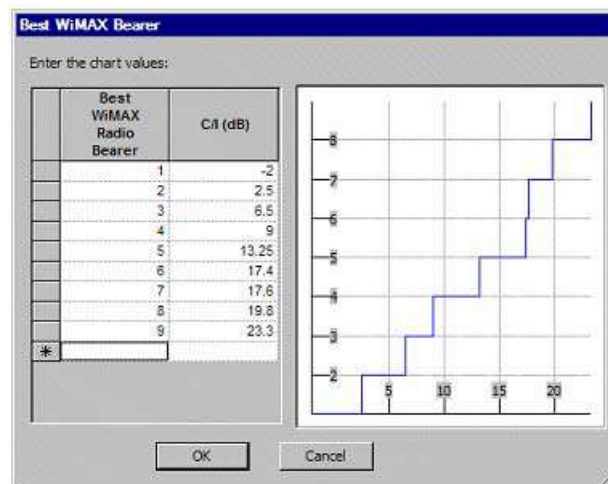


Figura 3. 6: Opciones de selección de portadora.

Elaborado por: Autor

### 3.3.4. Características del transmisor

Al definir las características del transmisor, primero se determina el nombre del transmisor. Luego, se determinan las posibles pérdidas y se ingresan las características de la antena, tal como se observa en la figura 3.7. En consecuencia, las posibles pérdidas debido al cableado y otros factores se indican aquí. Se ingresan los parámetros de la antena, como el modelo de antena utilizado, la altura de la antena desde el suelo, el ángulo de visión y la curvatura de la antena. También se selecciona el modelo de propagación que se utilizará en la pestaña de propagación. Los modelos de propagación utilizados en WiMAX se describen en la sección 3.4.

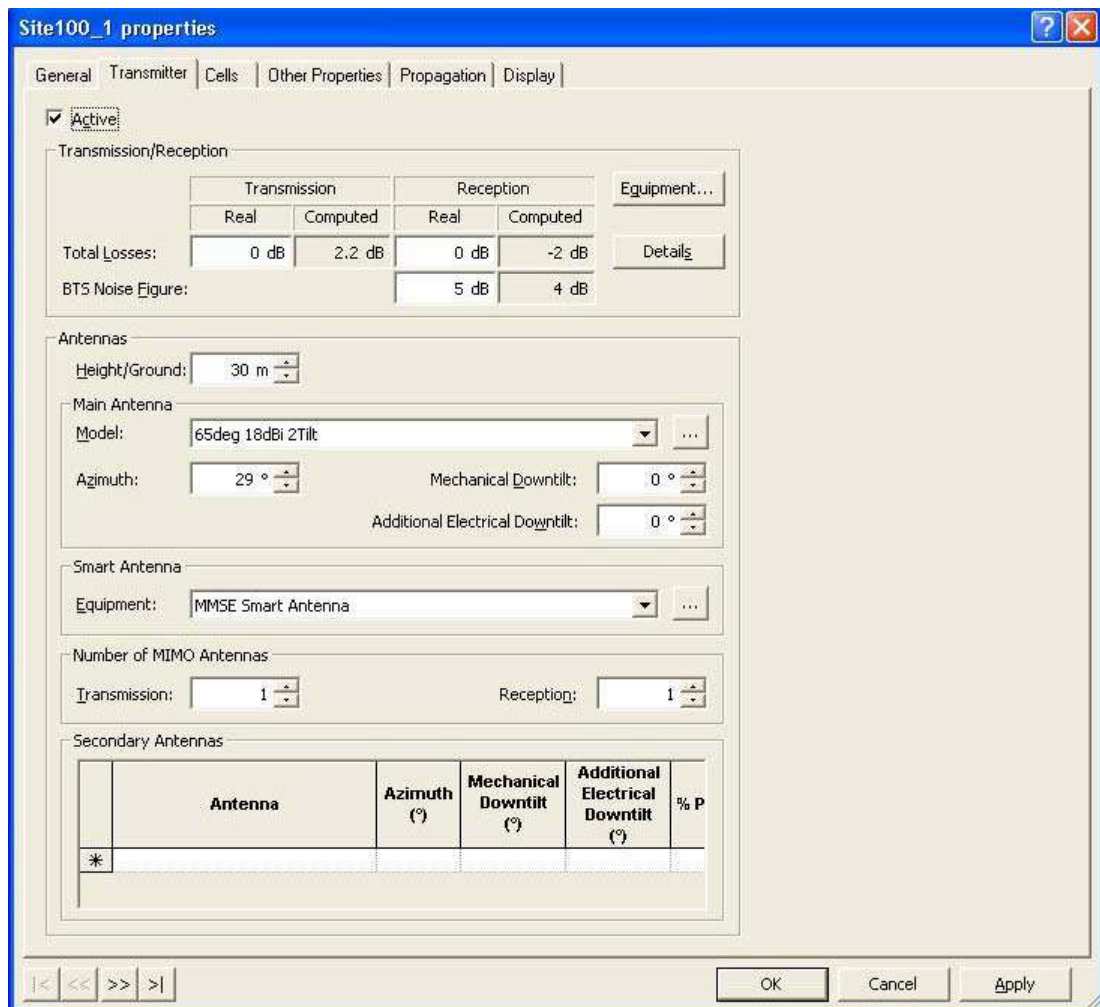


Figura 3. 7: Ventana de configuración de las características de la antena.  
Elaborado por: Autor

### 3.3.5. Parámetros de celda

A continuación, se definen los parámetros de celda:

- ✓ Nombres de celdas,
- ✓ A qué transmisor pertenecen,
- ✓ Identidad de estación base (BS),
- ✓ Potencia de salida de la estación base,
- ✓ Frecuencia utilizada,
- ✓ Configuración de tramas,
- ✓ Información de canal utilizada,
- ✓ Densidad de tráfico de enlace ascendente y enlace descendente,
- ✓ Equipo WiMAX utilizado,
- ✓ Los valores de relación de ruido de enlace ascendente (UL) están definidos según lo observado en la figura 3.8.

Name	Transmitter	BSID	Power (dBm)	Frequency band	Frame Configuration	Channel Number	UL Traffic Load (%)	DL Traffic Load (%)	WIMAX Equipment	UL noise rise (dB)	AAS Simulation
Site001_1(1)	Site001_1		43	2.5 GHz - 10 MHz	FFT Size 128	0	100	100	Default WIMAX R	0	
Site001_2(1)	Site001_2		43	3.3 GHz - 5 MHz	FFT Size 1024	0	100	100	Default WIMAX R	0	
Site001_3(1)	Site001_3		43	3.3 GHz - 5 MHz	FFT Size 128	0	100	100	Default WIMAX R	0	
Site002_1(1)	Site002_1		43	3.3 GHz - 5 MHz	FFT Size 2048	0	100	100	Default WIMAX R	0	
Site002_2(1)	Site002_2		43	3.3 GHz - 5 MHz	FFT Size 512	0	100	100	Default WIMAX R	0	
Site002_3(1)	Site002_3		43	3.3 GHz - 5 MHz		0	100	100	Default WIMAX R	0	
Site003_1(1)	Site003_1		43	3.3 GHz - 5 MHz		0	100	100	Default WIMAX R	0	
Site003_2(1)	Site003_2		43	3.3 GHz - 5 MHz		0	100	100	Default WIMAX R	0	
Site003_3(1)	Site003_3		43	3.3 GHz - 5 MHz		0	100	100	Default WIMAX R	0	
Site004_1(1)	Site004_1		43	3.3 GHz - 5 MHz		0	100	100	Default WIMAX R	0	
Site004_2(1)	Site004_2		43	3.3 GHz - 5 MHz		0	100	100	Default WIMAX R	0	
Site004_3(1)	Site004_3		43	3.3 GHz - 5 MHz		0	100	100	Default WIMAX R	0	
Site005_1(1)	Site005_1		43	3.3 GHz - 5 MHz		0	100	100	Default WIMAX R	0	

Figura 3. 8: Despliegue de los parámetros de celdas.

Elaborado por: Autor

### 3.4. Selección del modelo de propagación de WiMAX.

La herramienta de simulación utilizada admite muchos modelos de propagación, tal como se muestra en la figura 3.9. Sin embargo, se prefirió para la simulación el modelo de propagación estándar SPM, que se preparó mediante la adaptación del modelo de propagación COST-Hata en términos de la frecuencia empleada y la región que será simulada.

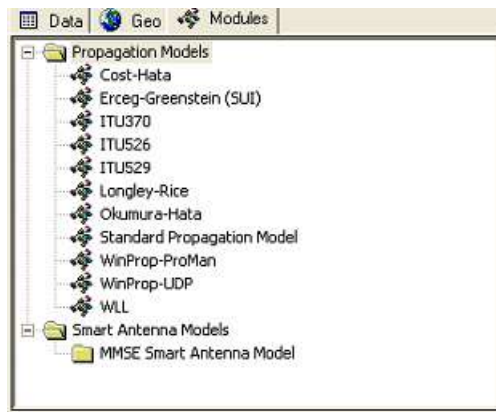


Figura 3. 9: Ventana de selección de modelos de propagación.

Elaborado por: Autor

#### 3.4.1. Modelo de propagación de COST-231 Hata.

El modelo Hata es un modelo de propagación ampliamente utilizado en la banda de 800 – 900 MHz en redes celulares. Con el comienzo de la expansión de las comunicaciones en la banda 1800 – 1900 MHz, fue adoptado el modelo de cooperación en el campo de la ciencia y la investigación (*Cooperation in the field of Scientific and Research, COST*), comúnmente denominado modelo COST y que fue adaptado junto al modelo Hata a esta banda de frecuencia. En consecuencia, este modelo es válido entre los siguientes parámetros:



- $150 \text{ MHz} \leq f \leq 2000 \text{ MHz}$
- $30 \text{ m} \leq h_b \leq 200 \text{ m}$
- $1 \text{ m} \leq h_m \leq 10 \text{ m}$
- $1 \text{ km} \leq d \leq 20 \text{ km}$

Aquí,

$f$ , se refiere a la frecuencia utilizada,

$h_b$ , la altura de la antena de la estación base,

$h_m$ , la altura de la antena del usuario, y

$d$ , se refiere a la distancia entre el usuario y la estación base.

Según el modelo COST-231 Hata, el valor de pérdida de ruta (*Path Loss*,  $PL$ ) a 1800MHz se expresa como:

$$PL = 46.3 + 33.9 \log(f) - 13.82 \log(h_b) + [44.9 - 6.55 \log(h_b)] \log(d) - a(h_m) + C_f$$

A continuación, se definen los valores que corresponden a  $a(h_m)$  y  $C_f$ .  $a(h_m)$  es el factor de corrección de la antena del dispositivo móvil que se expresa de la siguiente manera:

$$a(h_m) = [1.11 \log(f) - 0.7]h_m - [1.56 \log(f) - 0.8]$$

Mientras, que  $C_f$  es el valor de la función de corrección de tierra, que para regiones urbanas densas y asentamientos se determina como 3dB y 0dB, respectivamente. Inclusive WiMAX-Forum propone utilizar para estudios de simulación el modelo COST-231 Hata para áreas urbanas densas y asentamientos.

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

Este modelo se ha adaptado del modelo COST-231 Hata y está preparado para utilizarse en la banda de frecuencia de 3.5 GHz. La fórmula SPM es la siguiente:

$$PL = K_1 + K_2 \log(d) + K_3 \log(H_{T_{eff}}) + K_4 DL + K_5 \log(d) \log(H_{T_{eff}}) + K_6 H_{R_{eff}} + K_{clutter} f(clutter)$$

Donde,

$K_1$ , es el valor de desviación constante en dB,

$K_2$ , es un valor constante para el producto con  $\log(d)$ ,

$d$ , es la distancia entre el receptor y transmisor en m,

$K_3$ , es un valor constante para el producto con  $\log(H_{T_{eff}})$ ,

$H_{T_{eff}}$ , es el valor efectivo de la altura de la antena del transmisor,

$K_4$ , es el valor de multiplicación constante de la pérdida por difracción,

$DL$ , es la pérdida por difracción en carreteras deshabilitadas en dB,

$K_5$ , es un valor constante para el producto con  $\log(d) \log(H_{T_{eff}})$ ,

$K_6$ , es un valor constante para el producto con  $H_{T_{eff}}$ ,

$K_{clutter}$ , es un valor constante para el producto con  $f(clutter)$ , y

$f(clutter)$ , es el valor de pérdida promedio determinado por la forma de la tierra.

A continuación, se puede escribir la ecuación para el modelo Cost-231 Hata como:

$$PL = A_1 + A_2 \log(f) + A_3 \log(h_b) + [B_1 + B_2 \log(h_b)] \log(d) - a(h_m) + C_f$$

La comparación del modelo de propagación estándar y el modelo de error COST-231 se puede resumir como en la Tabla 4.1.

Tabla 3. 1: Comparativa de parámetros para los modelos SPM y COST-231.

Parámetros SPM	Parámetros COST-231
$K_1$	$A_1 + A_2 \log(f) - 3B_1 - 0.87$
$K_2$	$B_1$
$K_3$	$A_3 - 3B_2$
$K_4$	-
$K_5$	$B_2$
$K_6$	$C_f$
$K_{clutter}$	-

Elaborado por: Autor.

Al comparar el modelo de propagación SPM con el modelo COST-231 Hata, se puede observar los valores de  $K_4$  y  $K_{clutter}$  en SPM. Se ha agregado el valor  $K_4$  para mostrar las pérdidas causadas por la difracción y el valor  $K_{clutter}$  para mostrar las pérdidas que pueden ocurrir de acuerdo con los accidentes geográficos. Los valores fijos de los parámetros SPM se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3. 2: Parámetros del modelo SPM para frecuencias de 2.5 a 3.5 GHz.

Parámetros SPM	2.5 GHz	3.5 GHz
$K_1$	25.4	27.8
$K_2$	44.9	44.9
$K_3$	5.83	5.83
$K_4$	0.2 – 0.8	0.2 – 0.8
$K_5$	-6.55	-6.55
$K_6$	0	0
$K_{clutter}$	1	1

Elaborado por: Autor.

### 3.5. Modelado de tráfico

Al modelar el tráfico, se debe tener en cuenta el entorno de los usuarios, los perfiles de los usuarios, las características del dispositivo del usuario, el tipo de movilidad y qué servicio utilizará el usuario, tal como se ilustra en la figura 3.10).

#### 3.5.1. Definición de tipos y pesos regionales.

Los tipos de región en el área simulada y la definición de estas regiones como un porcentaje se determinan en esta sección. Además, aquí se definen cuántos usuarios por kilómetro en las regiones y cuánta movilidad tienen en su mayoría (véase la figura 3.11). Los tipos de región se pueden clasificar como la región con alta densidad de usuarios (urbana densa), región densa (urbana), área residencial (suburbana), área rural (rural), área forestal y área de mar o lago.

#### 3.5.2. Definición de perfil de usuario.

Al definir los perfiles de usuario, los usuarios se dividen primero en dos como usuario comercial y usuario estándar. Luego, se realizan estimaciones

tales como los tipos de servicios que utilizará el usuario, cómo usará el dispositivo el usuario, con qué frecuencia y durante cuánto tiempo usará el servicio, tal como se muestra en la figura 3.12.

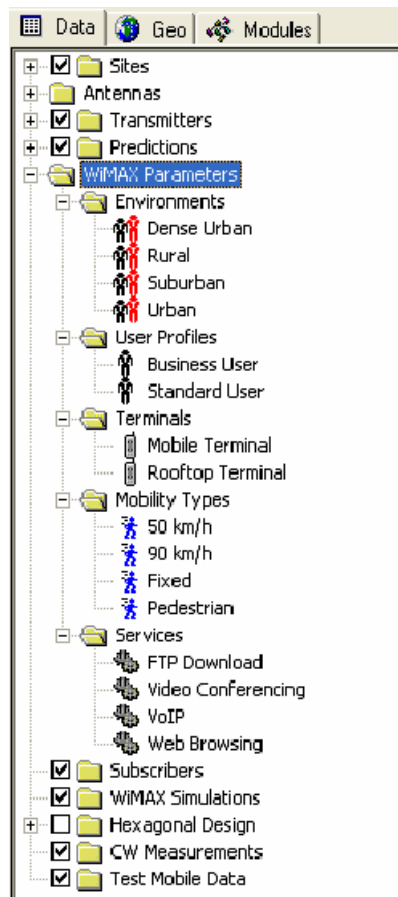


Figura 3. 10: Ventana de asignación del modelo de tráfico para WiMAX.

Elaborado por: Autor



Figura 3. 11: Configuración de propiedades del tipo de zona.

Elaborado por: Autor

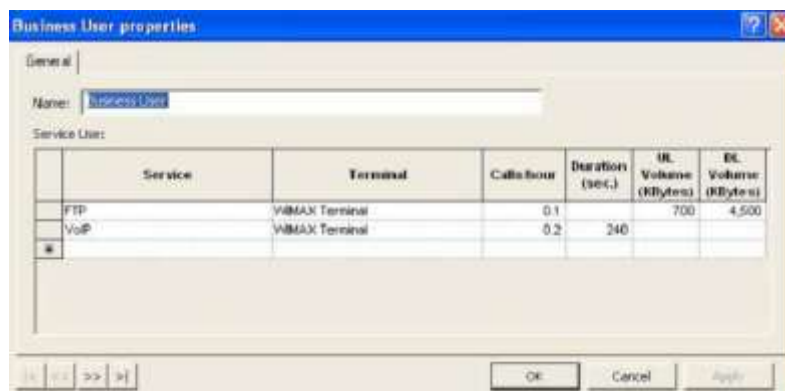


Figura 3. 12: Características del perfil de usuario.

Elaborado por: Autor

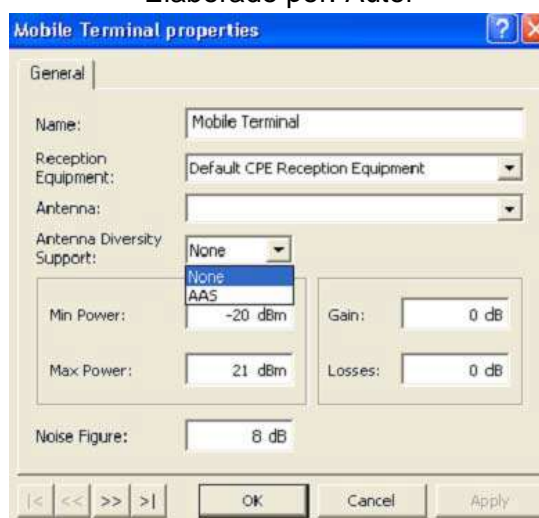


Figura 3. 13: Funciones del dispositivo de usuario.

Elaborado por: Autor

### 3.5.3. Definición del tipo de movilidad del usuario.

El tipo de movilidad del usuario está determinado por si el usuario es estacionario o móvil. Si es móvil, se determina la velocidad promedio estimada, tal como se ilustra en la figura 3.14.

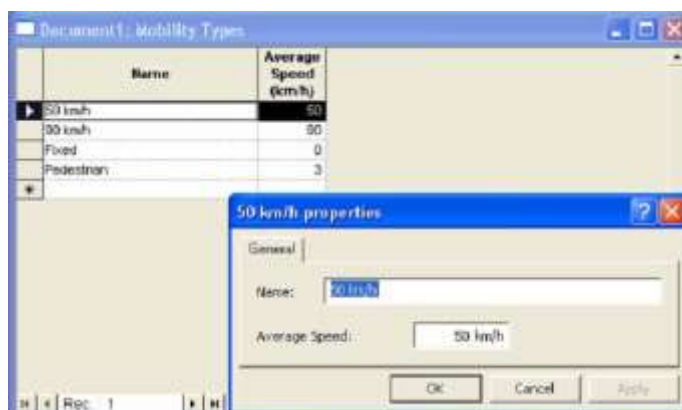


Figura 3. 14: Propiedades de identificación de movilidad del usuario.

Elaborado por: Autor

### 3.5.4. Identificación de tipos de servicios de usuario.

Al determinar el tipo de servicio del usuario, el tipo de servicio, la clase de calidad de servicio (QoS), el tipo de operador más eficiente que se utilizará, la velocidad máxima y mínima del usuario a la que se puede acceder y otros parámetros que afectarán la velocidad son ingresados como datos tal como en la figura 3.15.

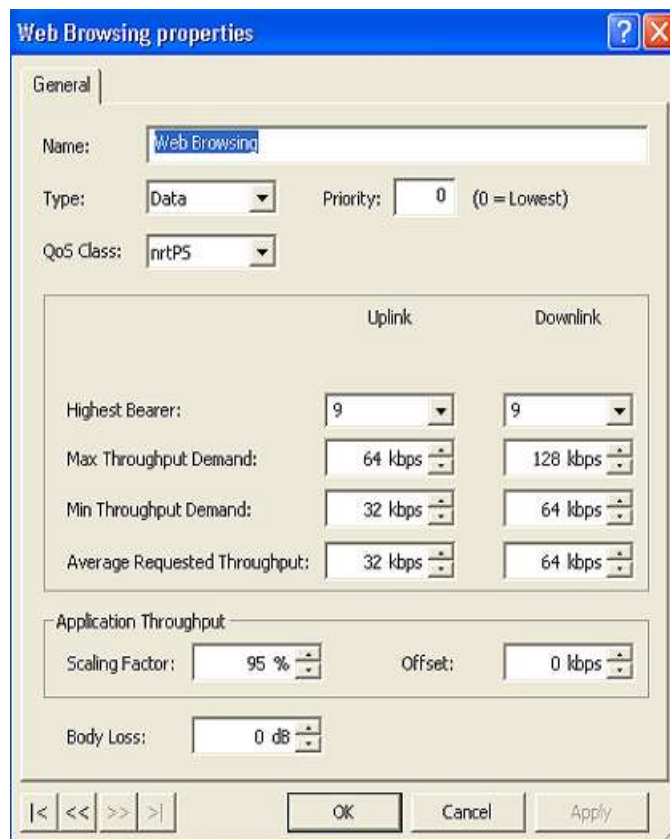


Figura 3. 15: Propiedades de los tipos de servicios del usuario.  
Elaborado por: Autor

### 3.6. Inclusión de datos geográficos

Al agregar datos geográficos, primero se ingresa la región de coordenadas donde se ubica el área a planificar (véase la figura 3.16). Luego, los mapas previamente preparados que muestran la estructura del terreno, las densidades de asentamiento, las dimensiones del edificio y la red de transporte de esa región son cargados en la herramienta de planificación, tal como se muestra en la figura 3.17).

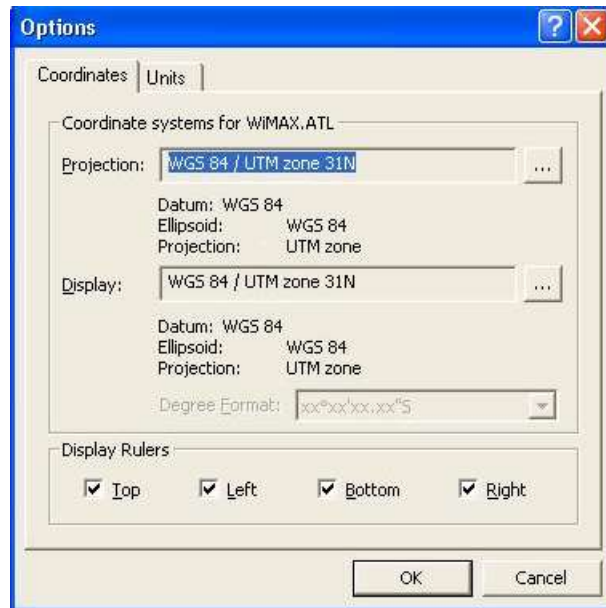


Figura 3. 16: Ejemplo de selección de coordenadas regionales.  
Elaborado por: Autor

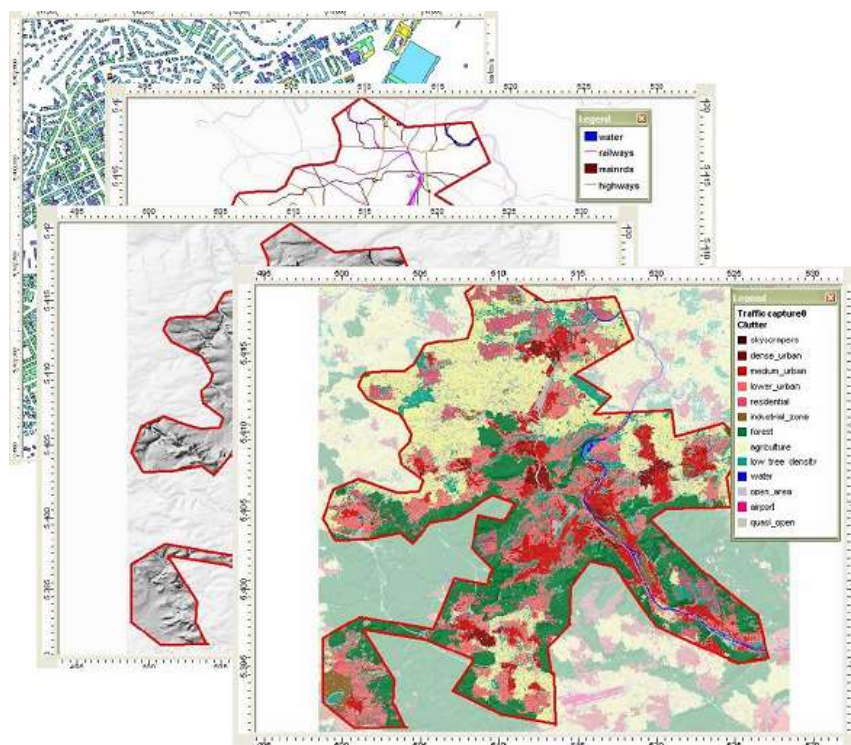


Figura 3. 17: Ejemplo del tipo de mapas agregados a la herramienta de planificación.

Elaborado por: Autor

### 3.7. Características de equipos para el modelado de WiMAX.

La ciudad de Guayaquil, Ecuador fue elegida para el estudio de simulación. Se planificó la región central de Guayaquil y se seleccionaron 4

áreas durante la planificación. Se utilizaron un total de 9 estaciones base en estos cuatro sitios. En consecuencia, se seleccionaron 3 campos como 2 sectores, 1 campo como 3 sectores. Fueron descritas las propiedades de la estación base y el dispositivo de usuario simulados sin simulación. Luego, se ingresaron datos relacionados con la planificación de la radio y se realizaron estimaciones en el marco de estos datos.

Al realizar el estudio de simulación, los resultados de cuánto podría estar el nivel de señal en qué región, independientemente del tráfico, se estimaron por primera vez con el dispositivo de planificación de radio utilizado. Luego, se realizó un estudio de simulación bajo el supuesto de que hay tráfico de usuarios. También, al realizar los estudios de simulación independiente del tráfico y dependiente del tráfico, se discute el uso de la antena AAS y condiciones de uso de la antena AAS. Por lo tanto, se observa la medida en que la antena AAS afecta la calidad de la señal y su efecto en el aumento de la cobertura.

### **3.7.1. Características del equipo simulado.**

En el estudio de simulación, se tomaron como base las características de la estación base de Alcatel-Lucent con el código 9116. Se eligió una antena de Kathrein como antena de la estación base. Como dispositivo de usuario, se utilizó la tarjeta PCMCIA con el código MAX-110 de Zyxel.

#### **3.7.1.1. Estación base.**

A continuación, se muestran las características de la estación base:

- Potencia de salida de 35 dBm,
- Método de partición TDD,
- Soporte de antena AAS,
- Operación en rangos de banda de frecuencia de 2.3 – 2.4, 2.5 – 2.7, 3.3 – 3.4, 3.4 – 3.6, 3.6 – 3.8 GHz,
- Cumplimiento con los estándares IEEE 802.16e,
- GPS incorporado para sincronización,
- Compatible con técnicas de modulación QPSK, 16-QAM, 64-QAM,
- Compatible con FFT de tamaños 512 y 1024,



- 4 Tx/Rx de antena de entrada/salida,
- Soporta anchos de banda de 3.5 MHz, 5 MHz, 10 MHz.

### 3.7.1.2. Características de la antena.

En los estudios de simulación, se utilizó una antena Kathrein con un ancho de haz de media potencia de 65°, que funciona en la banda de frecuencias de 3300 – 3600 MHz, con una ganancia de 18 dBi. Esta antena también se utiliza como modelo de antena AAS de 4 segmentos. En la figura 3.18 se muestra el modelo de patrón horizontal y vertical de la antena Kathrein.

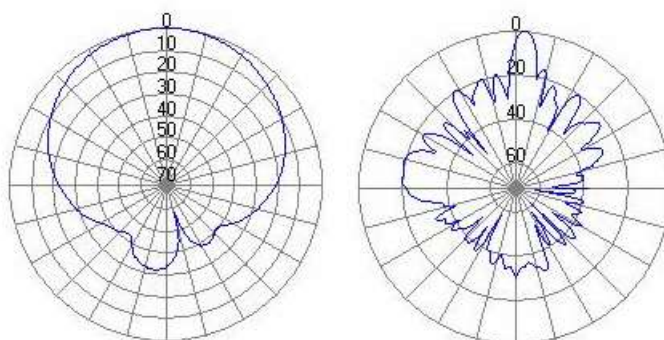


Figura 3. 18: Diagrama del patrón horizontal y vertical de la antena Kathrein.  
Elaborado por: Autor

### 3.7.1.3. Funciones del dispositivo del usuario

A continuación, se enumeran las características del dispositivo MAX-110 WiMAX PCMCIA pertenecientes a Zyxel de la siguiente manera:

- Estándar de referencia: IEEE 802.16e SOFDMA
- Método de partición: TDD
- Frecuencia: 3400 – 3600 MHz
- Ancho de banda de canal: 3.5 MHz/512 FFT, 5 MHz/512 FFT, 7 MHz/1024 FFT, 8.75 MHz/1024 FFT, 10 MHz/1024 FFT
- Modulación: QPSK, 16QAM, 64QAM (enlaces descendentes, DL)
- Antena: soporte AAS, potencia de salida máxima de 28 dBm, ganancia de antena de 2 dBi, ancho de haz de 65°.
- Velocidad máxima: 5 Mbps para enlaces descendentes, 2 Mbps para enlaces ascendentes.

### 3.7.2. Entradas de planificación de radio.

La información de radiofrecuencia y la información de la región a planificar se utilizaron como entradas de planificación de radio.

#### 3.7.2.1. Información de radiofrecuencia.

La información de radiofrecuencia utilizada en la simulación es:

- Frecuencia: 3.5 GHz.
- Ancho de banda total utilizado: 30 MHz.
- Canales utilizados: 3500-3505 MHz, 3505-3510 MHz, 3510-3515 MHz, 3515-3520 MHz, 3520-3525 MHz, 3525-3530 MHz.
- Método de partición utilizado: TDD.
- Ancho de banda del canal WiMAX: 5 MHz.
- Modelo de propagación utilizado: modelo de propagación estándar: 3500 MHz.

#### 3.7.2.2. Información de campo.

Al hacer la selección del sitio, se eligió un área con alta densidad de usuarios en Guayaquil y estaba destinada a cubrirla. En consecuencia, se seleccionaron 4 campos. Un campo tiene 3 sectores y los otros campos son 2 sectores cada uno, tal como se muestra en la tabla 3.3.

Tabla 3. 3: Parámetros del modelo SPM para frecuencias de 2.5 a 3.5 GHz.

Nombre del sitio	Nombre del sector	Azimut	Curvatura	Banda de frecuencias (MHz)	Potencia de salida (dBm)	Altura de la antena (m)
Sitio0	Sitio0_2	140°	2°	3500-3505	35	30
Sitio0	Sitio0_3	200°	2°	3505-3510	35	30
Sitio1	Sitio1_1	330°	2°	3505-3510	35	30
Sitio1	Sitio1_3	270°	2°	3500-3505	35	30
Sitio2	Sitio2_1	30°	2°	3500-3505	35	30
Sitio2	Sitio2_2	100°	2°	3510-3515	35	30
Sitio3	Sitio3_1	0°	2°	3515-3520	35	30
Sitio3	Sitio3_2	120°	2°	3520-3525	35	30
Sitio3	Sitio3_3	240°	2°	3525-3530	35	30

Elaborado por: Autor.

### 3.7.3. Cálculos de presupuesto de enlace.

Al calcular el presupuesto de enlace, se realizaron dos cálculos diferentes de acuerdo con el uso de AAS como antena y sin ella. Se hicieron cálculos asumiendo que los usuarios estaban fuera del edificio. Más tarde, los diámetros de las células se calcularon de acuerdo con la pérdida de ruta máxima permitida (MAPL).

#### 3.7.3.1. Cálculo del presupuesto de enlace bajo la condición de que no se utiliza antena adaptativa

El cálculo del presupuesto de enlace se muestra en la tabla 3.4.

Tabla 3. 4: Parámetros del cálculo del presupuesto de enlace sin antena adaptativa.

Parámetros	Enlaces descendentes (DL)	Enlaces ascendentes (UL)	Fórmula
Parámetros del Tx	BS	CPE	
Potencia de salida del Tx	35 dBm	23 dBm	a
Ganancia de antena de Tx	18 dBi	2 dBi	b
Número de elementos de la antena	1	1	c
Ganancia de antena AAS de Tx	-	-	d
Perdidas de cableado en Tx	1.21 dB	0 dB	e
PIRE	51.8 dBm	25 dBm	$A = a + b + d - e$
Parámetros del Rx	CPE	BS	
Ganancia de antena de Rx	2 dBi	18 dBi	f
Perdidas de cableado en Rx	0 dBi	1.21 dBi	g
Ganancia de antena AAS de Rx	-	-	h
$N_f$	-130.8 dB	-129.3 dB	x
SNR	11 dB	11 dB	y
Sensibilidad del Rx	-119.8 dB	-128.3 dB	$B = x + y$
Min. nivel de antena Rx	-121.8 dB	-156.9 dB	$C = B - f + g - h$
Ganancia del sistema	173.6 dB	181.9 dB	$D = A - C$
Interferencia	1.5 dB	1.5 dB	m
Shading	8.8 dB	8.8 dB	n
MAPL	163.3 dB	171.6 dB	$M = D - m - n$

Elaborado por: Autor.

La siguiente ecuación se utiliza para calcular el valor de  $N_f$ . En esta fórmula, la frecuencia de una sola subportadora es 10940 Hz como valor de ancho de banda (BandWidth, BW), 1.12 para el valor n de muestreo, 460 para el valor FFT de los usuarios ( $N_{usado}$ ) y 512 como el valor  $N_{FFT}$  que indica la

FFT total. El valor de  $N_{figura}$  se utiliza como 5 dB para enlaces descendentes (DL) y 3.5 dB para enlaces ascendentes (UL).

$$N_f = -174.3 + 10 \log \left( BW \cdot n \cdot \frac{N_{usado}}{N_{FFT}} \right) + N_{figura}$$

La siguiente expresión matemática se utiliza para calcular el tamaño del diámetro de la celda. El valor MAPL es 163.3 dB, la altura de la estación base ( $h_{BS}$ ) es 30 m, el valor de Shading (sombreado) es 8.8 dB. En consecuencia, HB (tamaño del diámetro de la celda) resultó ser 1.05 km.

$$HB = 10^{\frac{MAPL - 39.5 - 5.83 \log(h_{BS}) - Shading}{44.9 - 6.55 \log(h_{BS})}}$$

### 3.7.3.2. Cálculo del presupuesto de enlace bajo la condición de que se utiliza antena adaptativa.

El cálculo del presupuesto de enlace se muestra en la tabla 3.5.

Tabla 3. 5: Parámetros del cálculo del presupuesto de enlace sin antena adaptativa.

Parámetros	Enlaces descendentes (DL)	Enlaces ascendentes (UL)	Fórmula
Parámetros del Tx	BS	CPE	
Potencia de salida del Tx	35 dBm	23 dBm	a
Ganancia de antena de Tx	18 dBi	2 dBi	b
Número de elementos de la antena	4	1	c
Ganancia de antena AAS de Tx	6	-	d
Perdidas de cableado en Tx	1.21 dB	0 dB	e
PIRE	57.8 dBm	25 dBm	$A = a + b + d - e$
Parámetros del Rx	CPE	BS	
Ganancia de antena de Rx	2 dBi	18 dBi	f
Perdidas de cableado en Rx	0 dBi	1.21 dBi	g
Ganancia de antena AAS de Rx	-	7.3	h
$N_f$	-130.8 dB	-129.3 dB	x
SNR	11 dB	11 dB	y
Sensibilidad del Rx	-119.8 dB	-128.3 dB	$B = x + y$
Min. nivel de antena Rx	-121.8 dB	-164.2 dB	$C = B - f + g - h$
Ganancia del sistema	179.6 dB	189.2 dB	$D = A - C$
Interferencia	1.5 dB	1.5 dB	m
Shading	8.8 dB	8.8 dB	n
MAPL	169.3 dB	178.9 dB	$M = D - m - n$

Elaborado por: Autor.

En el cálculo realizado con la ecuación de HB y tomando el valor de AAS MAPL activo 169.3 dB para DL, se encontró que el tamaño del diámetro de la celda fue 1.58 km.

### 3.8. Resultados de simulación.

Durante el estudio de simulación, se tuvieron en cuenta 4 escenarios o situaciones diferentes. El primer escenario, es que no está activo la AAS y es independiente del tráfico de acuerdo con el nivel de señal, tal como se muestra en la figura 3.19.

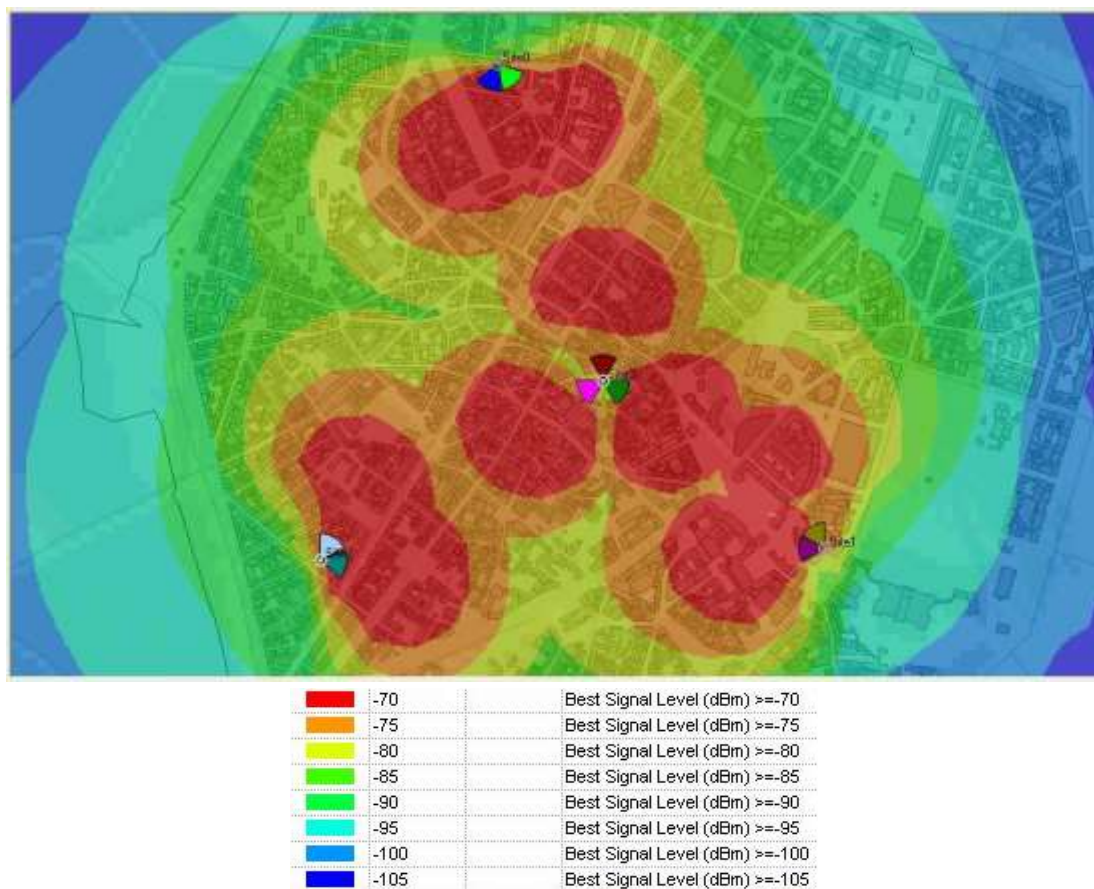


Figura 3. 19: Resultados de nivel de señal sin AAS fuera del edificio.

Elaborado por: Autor

El segundo escenario, es el estado de la independencia del tráfico de acuerdo con el nivel de señal en el que AAS está activa, tal como se ilustra en la figura 3.20.

En la tabla 3.5 se muestran los cálculos en términos de ganancias como resultado del estudio de simulación de acuerdo con el nivel de señal. En

consecuencia, se ve que para alcanzar el valor de cobertura con la antena AAS, es necesario aumentar el nivel de señal en aproximadamente 6 dB. Por lo tanto, la potencia de salida de la antena debe aumentarse de 35 dBm (3.16 Vatios) a 41 dBm (12.59 Vatios). Esto muestra que cuando se incrementa la potencia de salida en 9.43 Vatios, solo se puede lograr la cobertura utilizando antenas AAS.

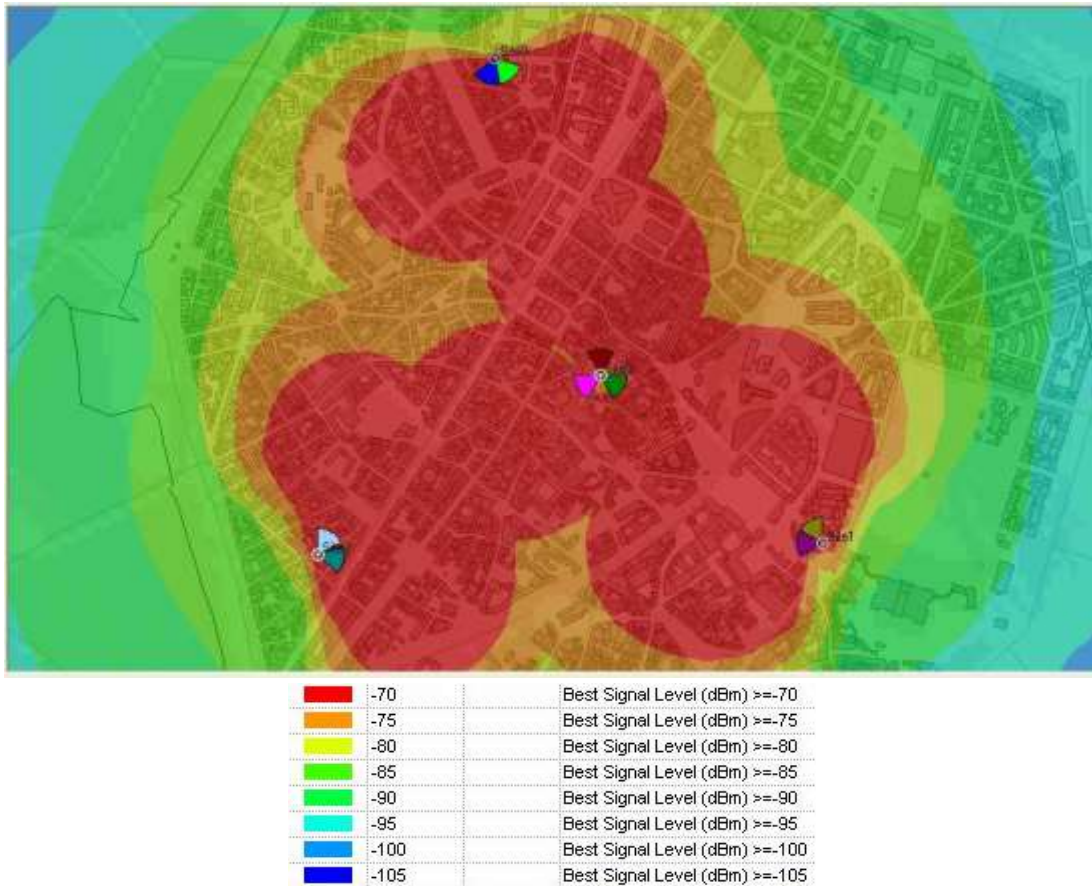


Figura 3. 20: Resultados de nivel de señal con AAS fuera del edificio.  
Elaborado por: Autor

Tabla 3. 6: Áreas de cobertura según nivel de señal.

Niveles de señal	Con ASS	Sin AAS	Ganancias
$dBm \geq -70$	1.33592	0.650008	0.684992
$dBm \geq -75$	1.887172	1.223436	0.663736
$dBm \geq -80$	2.435788	1.77634	0.021256
$dBm \geq -85$	3.408368	2.304564	1.103804
$dBm \geq -90$	5.212376	3.1523	2.060076
$dBm \geq -95$	8.22688	4.757824	3.469056
$dBm \geq -100$	11.311156	7.504844	3.806312
$dBm \geq -105$	13.89582	10.662988	3.232832

Elaborado por: Autor.

El tercer escenario, es la dependencia del tráfico de acuerdo con el nivel  $C/(I + N)$  donde AAS no está activo, tal como se puede ver en la figura 3.21.

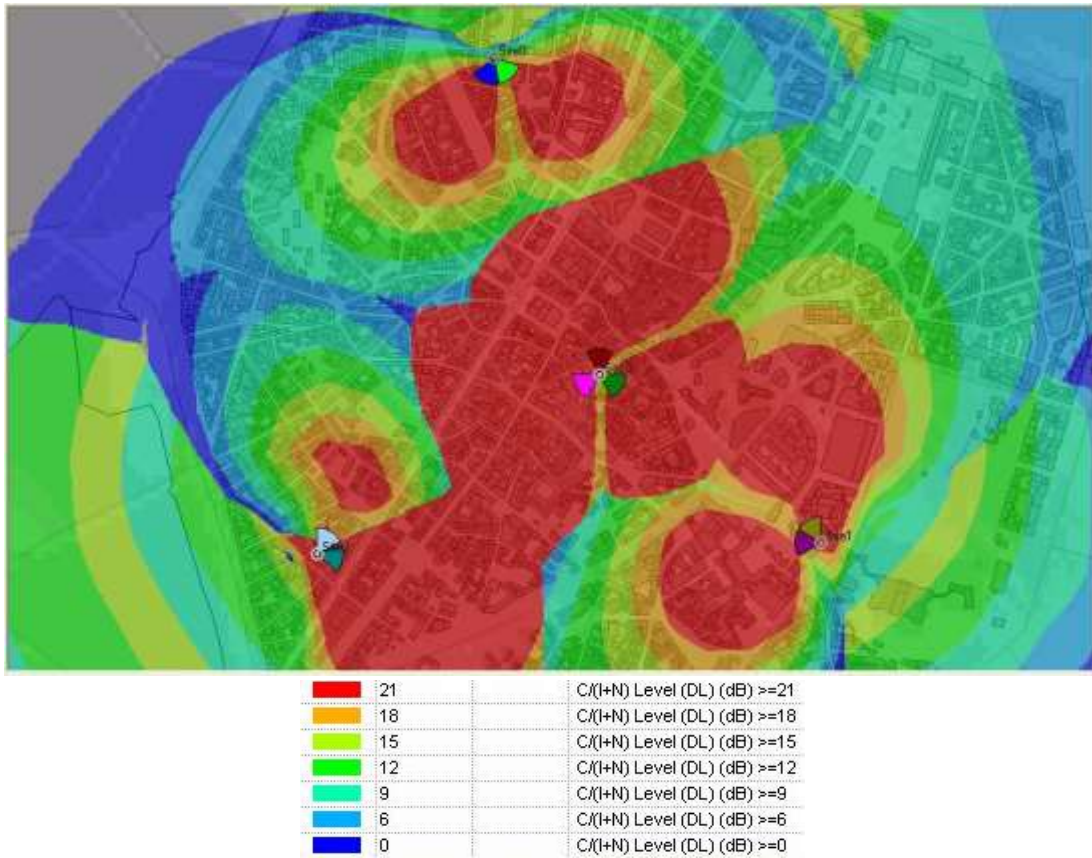


Figura 3. 21: Resultados de nivel de señal  $C/(I + N)$  sin AAS fuera del edificio.  
Elaborado por: Autor

El cuarto escenario, es cuando la antena AAS está activa, y depende del tráfico según el nivel de  $C/(I + N)$ , tal como lo ilustrado en la figura 3.22. En la tabla 3.7, se compara el uso y la ausencia de antena AAS y se calculan las ganancias y el porcentaje.

Tabla 3. 7: Áreas de cobertura según niveles de  $C/(I + N)$ .

Niveles de $C/(I + N)$	Con AAS ( $km^2$ )	Sin AAS ( $km^2$ )	Ganancia ( $km^2$ )	Ganancia (%)
$C/(I + N) \geq 21$	2.604936	1.046132	1.558804	149.0064351
$C/(I + N) \geq 18$	3.908012	1.363184	2.544828	186.6826489
$C/(I + N) \geq 15$	6.14854	2.134992	4.013548	187.9889011
$C/(I + N) \geq 12$	8.307408	3.651052	4.656356	127.5346393
$C/(I + N) \geq 9$	10.517812	6.030904	4.486908	74.39859762
$C/(I + N) \geq 6$	12.575884	8.441448	4.134436	48.9778057
$C/(I + N) \geq 0$	14.630168	12.546552	2.083616	16.60708057

Elaborado por: Autor.

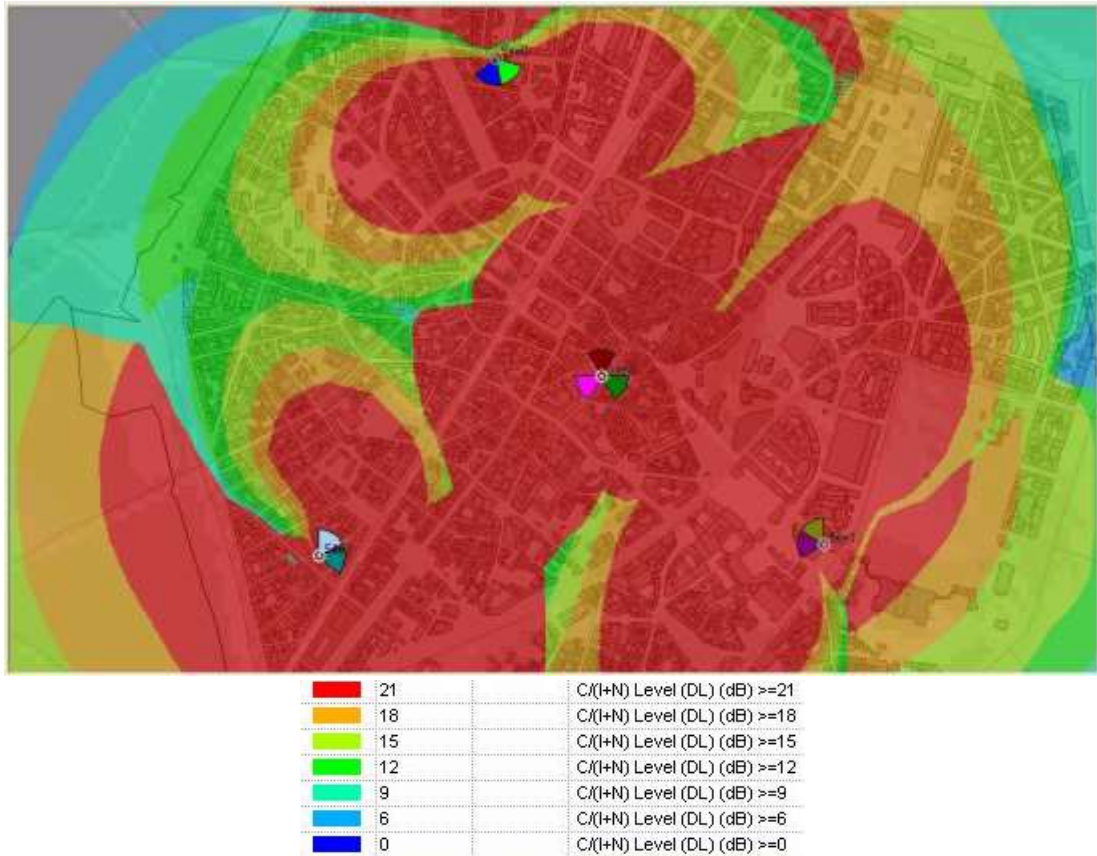


Figura 3. 22: Resultados de nivel de señal  $C/(I + N)$  con AAS fuera del edificio.

Elaborado por: Autor

Finalmente, en el estudio de simulación realizado independientemente del tráfico utilizando un dispositivo de planificación seleccionando una región en Guayaquil; cuando se utiliza una antena adaptativa, se ha observado que el área de cobertura ha aumentado en un 40% - 50% en comparación con la simulación sin antena de adaptación. En el estudio de simulación basada en el tráfico, se observó que el alto valor  $C/(I+N)$  del uso de antena adaptativa se proporcionaba en puntos más distantes en comparación con la simulación sin usar antena adaptativa. Se concluyó que el uso de antena adaptativa aumenta la eficiencia de la estación base, ya que el aumento en el valor  $C/(I+N)$  permite utilizar una técnica de modulación superior.

La tecnología de antena adaptativa también está dejando su lugar a otra tecnología de antena inteligente, la tecnología de antena MIMO. Las compañías fabricantes de antenas como ArrayComm han realizado muchos estudios sobre tecnologías de antenas adaptativas y luego utilizaron estas experiencias para desarrollar la tecnología de antenas MIMO. Al igual que con



WiMAX, la tecnología de antena adaptativa también ha hecho contribuciones significativas a la transición a otras tecnologías que se prevé que se generalicen en el futuro y permitan a los usuarios transmitir datos a altas velocidades

## Conclusiones

1. Con la creciente importancia de la comunicación inalámbrica, las nuevas tecnologías para satisfacer esta necesidad se han vuelto cada vez más comunes. El propósito de la comunicación inalámbrica es alcanzar velocidades de datos más altas al mantener alta la calidad del servicio y aumentar el área de cobertura tanto como sea posible, reduciendo así los costos de la estación base. Con su interfaz SOFDMA, WiMAX permite un uso más eficiente del espectro, utilizando antenas adaptativas, aumentando la velocidad de datos a niveles altos y aumentando aún más el área de cobertura.
2. Los cálculos del presupuesto del enlace se realizaron primero para ver cuánto afecta el uso de la antena adaptativa al área de cobertura. Utilizando estos resultados, se calcularon los diámetros de las células y se calculó teóricamente que el uso de antenas adaptativas podría aumentar el diámetro de las células en un 50%.
3. La tecnología de antena adaptativa utilizada en los sistemas WiMAX es una de las tecnologías que desempeña un papel activo en el aumento del área de cobertura y la velocidad de los datos. En este trabajo de titulación, se muestra el éxito de las tecnologías de antena adaptativa en el sistema WiMAX.
4. La frecuencia utilizada por los sistemas WiMAX tiene muchas desventajas para la comunicación móvil y el hecho de que los estudios de estandarización no se puedan lograr al nivel deseado hace que la idea de WiMAX se vuelva más común en el futuro. WiMAX ha sido pionero en la transición a tecnologías con características similares como LTE y ha contribuido en gran medida al desarrollo de estas tecnologías.

## Recomendaciones

A continuación, se realizan las recomendaciones del presente trabajo que se pueden dar a futuro:

1. *Desarrollo de algoritmos de programación distribuida en redes WiMAX enmalladas utilizando antenas inteligentes.*
2. *Evaluación del desempeño de una red WiMAX móvil en el contexto de antenas inteligentes*

## Bibliografia

- Aalamifar, F., & Lampe, L. (2017). Optimized WiMAX Profile Configuration for Smart Grid Communications. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(6), 2723–2732. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2536145>
- Akashdeep, Kahlon, K. S., & Kumar, H. (2014). Survey of scheduling algorithms in IEEE 802.16 PMP networks. *Egyptian Informatics Journal*, 15(1), 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.eij.2013.12.001>
- Aldmour, I. (2013). LTE and WiMAX: Comparison and Future Perspective. *Communications and Network*, 05(04), 360–368. <https://doi.org/10.4236/cn.2013.54045>
- Bulbenkiene, V., Pareigis, V., Andziulis, A., Kurmis, M., & Jakovlev, S. (2011). Simulation of IEEE 802.16j Mobile WiMAX Relay Network to Determine the Most Efficient Zone to Deploy Relay Station. *Electronics And Electrical Engineering*, 112(6), 81–84. <https://doi.org/10.5755/j01.eee.112.6.451>
- Chou, Z.-T., Huang, C.-Q., & Chang, J. M. (2014). QoS Provisioning for Wireless LANs With Multi-Beam Access Point. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 13(9), 2113–2127. <https://doi.org/10.1109/TMC.2013.85>
- Garg, D., & Tyagi, H. O. (2017). Analysis of QoS for WiMax. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 6(10), 18–23.
- Hendaoui, M., & Kahoul, K. (2019). Comparative Study Between The IEEE 802.16 and The IEEE 802.11 Using OPNET. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3375001>

- Hernando Rábanos, J. M., Riera Salís, J. M., Mendo Tomás, L., & Centro de Estudios Ramón Areces. (2014). *Transmisión por radio*. Centro de Estudios Ramón Areces.
- Joe, A., Umamaheswari, & Karthikumar. (2019). A Multiband Patch Antenna for WiMAX and S Band RADAR Applications. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 8(6S3).
- Kamali, B., Bennett, R. A., & Cox, D. C. (2012). Understanding WiMAX: An IEEE-802.16 Standard-Based Wireless Technology. *IEEE Potentials*, 31(5), 23–27. <https://doi.org/10.1109/MPOT.2012.2195220>
- Mokhtar, A. (2016). Physical Layer Comparison Between LTE, OFDM and WIMAX. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 5(5), 151–157.
- Salas Natera, M. A., Garca, A., Mora, J., Manuel, J., La Torre, P. P. D., Garca-Gasco, J., Martnez, R., Sierra-Perez, M., Haro Ariet, L. D., & Sierra, M. (2011). New Antenna Array Architectures for Satellite Communications. En M. Karimi (Ed.), *Advances in Satellite Communications*. InTech. <https://doi.org/10.5772/22487>
- Song, S., & Issac, B. (2014). Analysis of Wifi and Wimax and Wireless Network Coexistence. *International journal of Computer Networks & Communications*, 6(6), 63–77. <https://doi.org/10.5121/ijcnc.2014.6605>
- Thatere, A., & Zade, P. L. (2020). Defected Ground Structure Microstrip Antenna for WiMAX. En V. Janyani, G. Singh, M. Tiwari, & A. d'Alessandro (Eds.), *Optical and Wireless Technologies* (Vol. 546, pp. 333–346). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-6159-3\\_36](https://doi.org/10.1007/978-981-13-6159-3_36)

Uthansakul, M., Uthansakul, P., & Wongchompa, P. (2010). Performance evaluation of automatic switched-beam antennas for indoor WLAN systems. *WSEAS Transactions on Communications*, 9(12), 782–792.



## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Sosa Calero, Sandra María** con C.C: # 080335864-7 autor del trabajo de titulación: Evaluación de escenarios de simulación del área de cobertura en redes inalámbricas WiMAX utilizando herramientas de planificación de radio, previo a la obtención del título de **Magister en Telecomunicaciones** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 3 de marzo del 2020

f. \_\_\_\_\_

Nombre: **Sosa Calero, Sandra María**

C.C: 080335864-7

<b>REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA</b>			
<b>FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN</b>			
<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	Evaluación de escenarios de simulación del área de cobertura en redes inalámbricas WiMAX utilizando herramientas de planificación de radio.		
<b>AUTOR(ES)</b>	Sosa Calero, Sandra María		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	MSc. Córdova Rivadeneira, Luis Silvio; MSc. Zamora Cedeño, Néstor / MSc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Sistema de Posgrado		
<b>PROGRAMA:</b>	Maestría en Telecomunicaciones		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Magister en Telecomunicaciones		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	3 de marzo del 2020	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	47
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Teoría de la Comunicación, Sistemas de Comunicaciones		
<b>PALABRAS CLAVES/KEYWORDS:</b>	Multiplexación, Antenas, Adaptativa, Cobertura, WiMAX, OFDMA.		
<b>RESUMEN/ABSTRACT:</b>	<p>El presente trabajo de posgrado se introduce la tecnología WiMAX en general, donde primero se explican los estándares de WiMAX, luego se explica la estructura de la red, se explican los servicios utilizados y finalmente se explica la estructura de trama OFDMA. Posteriormente, se explican las características de la tecnología de antena AAS y los modelos matemáticos y se especifican algunos modelos de antena adaptativa. Se presenta el dispositivo de planificación que se simulará. Mientras se introduce el dispositivo, también se determinan los parámetros y el modelo de propagación que se utilizaron en la simulación. Después de definir la región seleccionada en Guayaquil, y las propiedades de campo utilizadas en la región, se realizó el estudio de simulación en la región. En primer lugar, el presupuesto de enlace se calcula de acuerdo con el uso de AAS y sin utilizar AAS donde se discutió de situaciones dependientes e independientes del tráfico.</p>		
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> 0993384892	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:sandrita_sosita0605@hotmail.com">sandrita_sosita0605@hotmail.com</a>	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):</b>	<b>Nombre:</b> Manuel Romero Paz		
	<b>Teléfono:</b> 0994606932		
	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:mromeropaz@yahoo.com">mromeropaz@yahoo.com</a>		
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>			
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>			
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>			
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>			