

DISEÑO DE UNA RED DE ACCESO DE BANDA ANCHA IEEE 802.22 PARA UNA ZONA RURAL DEL DEPARTAMENTO DEL CAUCA



**Germán Alexander Domínguez de la Rosa
Héctor Fabián Gómez Recalde**

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Línea de Investigación Gestión Integrada de Redes, Servicios y
Arquitecturas de Telecomunicaciones
Popayán, Enero de 2014**

DISEÑO DE UNA RED DE ACCESO DE BANDA ANCHA IEEE 802.22 PARA UNA ZONA RURAL DEL DEPARTAMENTO DEL CAUCA



**Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el
título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

**Germán Alexander Domínguez de la Rosa
Héctor Fabián Gómez Recalde**

Director: MsC. Guefry Léider Ágredo Méndez

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Línea de Investigación Gestión Integrada de Redes, Servicios y
Arquitecturas de Telecomunicaciones
Popayán, Enero de 2014**

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2 MOTIVACIÓN	3
1.3 ENFOQUE	4
1.4 ALCANCE.....	5
1.5 CONTENIDO DEL DOCUMENTO FINAL DEL TRABAJO DE GRADO.....	6
<i>Capítulo 2: Revisión Consideraciones Iniciales para el Diseño de un Sistema WRAN.</i>	6
<i>Capítulo 3: Determinación Mediante Simulación de la Cobertura para la Zona Rural Objeto</i>	6
<i>Capítulo 4: Throughput del Sistema</i>	6
<i>Capítulo 5: Conclusiones, Recomendaciones y Trabajos Futuros</i>	6
2. REVISIÓN DE LAS CONSIDERACIONES INICIALES PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA WRAN	7
2.1 CONCEPTOS GENERALES.....	7
2.2 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA.....	10
2.3 REGULACIÓN DE FRECUENCIAS	12
2.4 REVISIÓN DEL ESTÁNDAR IEEE 802.22	15
2.4.1 <i>Arquitectura de Referencia</i>	15
2.4.2 <i>Capa Física</i>	16
2.4.3 <i>Capa MAC</i>	24
2.5 PLANEACIÓN DE LA RED	27
2.5.1 <i>Cobertura</i>	27
2.6 SELECCIÓN DEL LUGAR DE DESPLIEGUE.....	29
2.6.1 <i>Recomendaciones de Distancia</i>	29
2.7 CONSIDERACIONES DE INTERFERENCIA.....	30
2.7.1 <i>Interferencia con Sistemas de Televisión Y Televisión Digital</i>	30
2.7.2 <i>Interferencia de Servicios Incumbentes</i>	31
2.7.3 <i>Expansión de la Red</i>	31
2.8 <i>FRONT END</i> DE RF	31
2.9 MEDIDA DEL RETARDO RESIDUAL	31
3. DETERMINACIÓN MEDIANTE SIMULACIÓN DE LA COBERTURA PARA LA ZONA RURAL OBJETO	32
3.1 ESTUDIO DE COBERTURA	32
3.1.1 <i>Descripción Breve del Estudio de Cobertura que se Realizará</i>	33
3.2 MODELO DE PROPAGACIÓN DE LONGLEY-RICE	33
3.2 CÁLCULO DE EMPLAZAMIENTOS.....	34
3.3 UBICACIÓN DE EMPLAZAMIENTOS	34
3.4 SOFTWARE DE SIMULACIÓN	43
3.4.1 <i>Herramientas</i>	44
3.4.2 <i>Comparación de las Herramientas</i>	45
3.5 MONTAJE DE LA RED EN RADIO MOBILE.....	46
3.5.1 <i>Parámetros de Propagación de La Red</i>	46
3.5.2 <i>Cálculo de la Potencia de Transmisión</i>	48
3.5.3 <i>Configuración del Sistema DL</i>	48
3.5.4 <i>Configuración del Sistema UL</i>	49
3.6 ZONA DE COBERTURA.....	50

3.7 NIVELES DE RECEPCIÓN DE LOS CPES.	52
4. THROUGHPUT DEL SISTEMA	66
4.1 CONCEPTO DE BANDA ANCHA EN COLOMBIA	66
4.2 VELOCIDAD DE TRANSFERENCIA OBJETIVO	66
4.3 EFICIENCIA ESPECTRAL REQUERIDA	67
4.3.1 Eficiencia Espectral para QPSK.....	68
4.3.2 Eficiencia Espectral para 16-QAM	68
4.3.3 Eficiencia Espectral para 64-QAM	69
4.4 VELOCIDAD DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA	70
4.4.1 Velocidad de Transferencia del Sistema con un Prefijo Cíclico de 1/4	71
4.4.2 Velocidad de Transferencia del Sistema con un Prefijo Cíclico de 1/8	72
4.4.3 Velocidad de Transferencia del Sistema con un Prefijo Cíclico de 1/16.....	72
4.4.4 Velocidad de Transferencia del Sistema con un Prefijo Cíclico de 1/32.....	73
4.5 BER OBJETIVO	73
4.5.1 Cálculo de BLER	74
4.6 CÁLCULO DEL THROUGHPUT DEL SISTEMA.....	75
4.7 REQUERIMIENTOS DE POTENCIA.....	76
4.7 RED DEFINITIVA	78
4.7.1 Cálculo de la Potencia de Transmisión para DL.....	78
4.7.2. Cálculo de la Potencia de Transmisión para UL.....	79
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	80
5.1 CONCLUSIONES	80
i. Respecto a la Literatura Consultada.....	80
ii. Respecto al Diseño y la Cobertura de la Red	80
iii. Respecto al Throughput del Sistema	80
5.2 RECOMENDACIONES	81
5.3 TRABAJOS FUTUROS	81
BIBLIOGRAFÍA	82
ANEXOS	85

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 CICLO COGNITIVO.....	9
FIGURA 2.2 UNA CELDA WRAN CON SU BS Y SUS CPES.....	10
FIGURA 2.3 ESTÁNDARES DE REDES INALÁMBRICAS.....	12
FIGURA 2.4 ATRIBUCIÓN DE BANDAS DE FRECUENCIAS DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO EN COLOMBIA.....	13
FIGURA 2.5 BANDAS DE VHF PARA LOS CANALES 1 – 6.....	14
FIGURA 2.6 BANDAS DE UHF PARA LOS CANALES 7 – 13.....	14
FIGURA 2.7 BANDAS DE UHF PARA EL RESTO DE CANALES DE TELEVISIÓN ANALÓGICA.....	14
FIGURA 2.8 SUB-CANALIZACIÓN EN OFDMA.....	16
FIGURA 2.9 FORMATO DEL SÍMBOLO OFDM.....	17
FIGURA 2.10 PATRÓN DE REPETICIÓN DE LAS SUB-PORTADORAS PILOTO.....	18
FIGURA 2.11 DIAGRAMA DE CONSTELACIÓN DE LA MODULACIÓN BPSK.....	19
FIGURA 2.12 DIAGRAMA DE CONSTELACIÓN DE QPSK.....	19
FIGURA 2.13 DIAGRAMA DE CONSTELACIÓN DE 16-QAM.....	20
FIGURA 2.14 DIAGRAMA DE CONSTELACIÓN DE 64-QAM.....	21
FIGURA 2.15 ESTRUCTURA DE UNA SUPER-TRAMA WRAN.....	25
FIGURA 2.16 ESTRUCTURA DE UNA TRAMA WRAN.....	25
FIGURA 3.1 MAPA DEL RESGUARDO INDÍGENA DE PURACÉ.....	35
FIGURA 3.2 VISTA SATELITAL DE LA UBICACIÓN DE LA BS.....	37
FIGURA 3.3 VISTA SATELITAL DE LA UBICACIÓN DEL CPE1.....	38
FIGURA 3.4 VISTA SATELITAL DE LA UBICACIÓN DEL CPE2.....	38
FIGURA 3.5 VISTA SATELITAL DE LA UBICACIÓN DEL CPE3.....	39
FIGURA 3.6 VISTA SATELITAL DE LA UBICACIÓN DEL CPE4.....	39
FIGURA 3.7 VISTA SATELITAL DE LA UBICACIÓN DEL CPE5.....	40
FIGURA 3.8 VISTA SATELITAL DE LA UBICACIÓN DEL CPE6.....	40
FIGURA 3.9 VISTA SATELITAL DE LA UBICACIÓN DEL CPE7.....	41
FIGURA 3.10 VISTA SATELITAL DE LA UBICACIÓN DEL CPE8.....	41
FIGURA 3.11 VISTA SATELITAL DE LA UBICACIÓN DEL CPE9.....	42
FIGURA 3.12 VISTA SATELITAL DE LA UBICACIÓN DEL CPE10.....	42
FIGURA 3.13 VISTA SATELITAL DE LA UBICACIÓN DEL CPE11.....	43
FIGURA 3.14 VISTA SATELITAL DE LA UBICACIÓN DEL CPE12.....	43
FIGURA 3.15 PARÁMETROS DE PROPAGACIÓN DE LA RED WRAN.....	47
FIGURA 3.16 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DL.....	49
FIGURA 3.17 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA UL.....	50
FIGURA 3.18 EMPLAZAMIENTOS DE LA RED.....	51
FIGURA 3.19 ZONA DE COBERTURA Y NIVELES DE RECEPCIÓN DE POTENCIA.....	51
FIGURA 3.20 VISTA TRIDIMENSIONAL DE ENLACE BS-CPE1.....	52
FIGURA 3.21 VISTA TRIDIMENSIONAL DEL ENLACE BS-CPE2.....	53
FIGURA 3.22 VISTA TRIDIMENSIONAL DE ENLACE BS-CPE3.....	53
FIGURA 3.23 VISTA TRIDIMENSIONAL DE ENLACE BS-CPE4.....	54
FIGURA 3.24 VISTA TRIDIMENSIONAL DE ENLACE BS-CPE5.....	54
FIGURA 3.25 VISTA TRIDIMENSIONAL DE ENLACE BS-CPE6.....	55
FIGURA 3.26 VISTA TRIDIMENSIONAL DE ENLACE BS-CPE7.....	55
FIGURA 3.27 VISTA TRIDIMENSIONAL DE ENLACE BS-CPE8.....	56
FIGURA 3.28 VISTA TRIDIMENSIONAL DE ENLACE BS-CPE9.....	56
FIGURA 3.29 VISTA TRIDIMENSIONAL DE ENLACE BS-CPE10.....	57
FIGURA 3.30 VISTA TRIDIMENSIONAL DE ENLACE BS-CPE11.....	57
FIGURA 3.31 VISTA TRIDIMENSIONAL DE ENLACE BS-CPE12.....	58
FIGURA 3.32 ESTADO DEL ENLACE ÉNTRE LA BS Y EL CPE1.....	59

FIGURA 3.33 ESTADO DEL ENLACE ENTRE LA BS Y EL CPE2.	59
FIGURA 3.34 ESTADO DEL ENLACE ENTRE LA BS Y EL CPE3.	60
FIGURA 3.35 ESTADO DEL ENLACE ENTRE LA BS Y EL CPE4.	60
FIGURA 3.36 ESTADO DEL ENLACE ENTRE LA BS Y EL CPE5.	61
FIGURA 3.37 ESTADO DEL ENLACE ENTRE LA BS Y EL CPE6.	61
FIGURA 3.38 ESTADO DEL ENLACE ENTRE LA BS Y EL CPE7.	62
FIGURA 3.39 ESTADO DEL ENLACE ENTRE LA BS Y EL CPE8.	62
FIGURA 3.40 ESTADO DEL ENLACE ENTRE LA BS Y EL CPE9.	63
FIGURA 3.41 ESTADO DEL ENLACE ENTRE LA BS Y EL CPE10.	63
FIGURA 3.42 ESTADO DEL ENLACE ENTRE LA BS Y EL CPE11.	64
FIGURA 3.43 ESTADO DEL ENLACE ENTRE LA BS Y EL CPE12.	64
FIGURA 4.1 CURVAS DE DESEMPEÑO PARA QPSK.	76
FIGURA 4.2 CURVAS DE DESEMPEÑO PARA 16-QAM.	76
FIGURA 4.3 CURVAS DE DESEMPEÑO PARA 64-QAM.	77

LISTA DE TABLAS

TABLA 2.1 CANALIZACIÓN DE TELEVISIÓN ANALÓGICA EN COLOMBIA Y EEUU.....	13
TABLA 2.2 DURACIÓN DE SÍMBOLO.....	17
TABLA 2.3 PARÁMETROS DE SÍMBOLO.....	18
TABLA 2.4 MODULACIÓN 16-QAM: SÍMBOLO, FASE Y AMPLITUD DE PORTADORA.	21
TABLA 2.5 MODULACIÓN 64-QAM: SÍMBOLO, FASE Y AMPLITUD DE PORTADORA.	23
TABLA 2.6 PARÁMETROS DE UN SISTEMA WRAN.....	24
TABLA 2.7 MODOS PHY PARA UN CANAL DE 6 MHZ.	24
TABLA 2.8 NÚMERO DE SÍMBOLOS POR TRAMA DE ACUERDO CON EL CP Y EL ANCHO DE BANDA DEL CANAL.	26
TABLA 3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS POSIBLES PUNTOS DE LOCALIZACIÓN DE LA BS.	36
TABLA 3.2 COORDENADAS GEOGRÁFICAS DE LOS COMPONENTES DE LA RED.....	37
TABLA 3.3 COMPARACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS SOFTWARE DE SIMULACIÓN.	45
TABLA 3.4 PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN DE LA RED.....	46
TABLA 3.5 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DL.	48
TABLA 3.6 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA UL.....	49
TABLA 3.7 RESUMEN DE LOS PARÁMETROS DEL ESTADO DEL ENLACE BS-CPE.	65
TABLA 4.1 PERIODO DE SÍMBOLO DE LOS ESQUEMAS DE MODULACIÓN UTILIZADOS EN WRAN. .	68
TABLA 4.2 EFICIENCIA ESPECTRAL DE LOS DIFERENTES MCS.	70
TABLA 4.3 VELOCIDAD DE TRANSFERENCIA PARA LOS DISTINTOS MCS CON UN CP DE 1/4.....	71
TABLA 4.4 VELOCIDAD DE TRANSFERENCIA PARA LOS DISTINTOS MCS CON UN CP DE 1/8.....	72
TABLA 4.5 VELOCIDAD DE TRANSFERENCIA PARA LOS DISTINTOS MCS CON UN CP DE 1/16.	73
TABLA 4.6 VELOCIDAD DE TRANSFERENCIA PARA LOS DISTINTOS MCS CON UN CP DE 1/32.....	73
TABLA 4.7 TAMAÑO DE BLOQUE PARA LOS DISTINTOS MCS.	74
TABLA 4.8 VALORES DE BLER PARA LAS DISTINTAS BER OBJETIVO.	75
TABLA 4.9 THROUGHPUT PARA LOS DISTINTOS REQUERIMIENTOS DE BER Y CP=1/8.	75
TABLA 4.10 SNR REQUERIDO PARA EL MCS Y BER RELACIONADOS.....	77
TABLA 4.11 REQUERIMIENTO DE POTENCIA DE TRANSMISIÓN DE BS PARA LOS DISTINTOS MCS .	78
TABLA 4.12 POTENCIAS DE TRANSMISIÓN DEL CPE PARA LOS DISTINTOS MCS Y BER EN UL. ...	79

ANEXOS

ANEXO A. VARIACIÓN DE FRECUENCIA	85
-----------------------------------------------	-----------

LISTA DE ACRÓNIMOS

16-QAM	<i>16-Quadrature Amplitude Modulation</i> Modulación de Amplitud en Cuadratura de 16 Estados
64-QAM	<i>64-Quadrature Amplitude Modulation</i> Modulación de Amplitud en Cuadratura de 64 Estados
AGL	<i>Antenna Ground Level</i> Altura de la Antena sobre la Tierra
BER	<i>Bit Error Rate</i> Tasa de Error de Bit
BLER	<i>Block Error Rate</i> Tasa de Error de Bloque
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i> Modulación Binaria por Desplazamiento de Fase
BS	<i>Base Station</i> Estación Base
CBP	<i>Contention-Based Protocol</i> Protocolo Basado en Contención
CONPES	Consejo Nacional de Política Económica y Social
CR	<i>Cognitive Radio</i> Radio Cognitiva
CRC	Comisión de Regulación de Comunicaciones
CP	<i>Cyclic Prefix</i> Prefijo Cíclico
CPE	<i>Customer Premise Equipment</i> Equipo Local de Cliente
D/U	<i>Desired to Undesired Ratio</i> Tasa Deseada a Indeseada
DAMA	<i>Demand-Assigned Multiple Access</i> Acceso Múltiple Asignado según Demanda
DL	<i>Downlink</i> Enlace de Bajada

DS	<i>Downstream</i> Flujo de Bajada
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i> Línea de Abonado Digital
DTV	<i>Digital Television</i> Televisión Digital
FCH	<i>Frame Control Header</i> Encabezado de Control de la Trama
FCC	<i>Federal Communications Commission</i> Comisión Federal de Comunicaciones
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> Transformada Rápida de Fourier
IEEE	<i>Institute of Electric and Electronic Engineers</i> Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i> Transformada Inversa Rápida de Fourier
ISP	<i>Internet Service Provider</i> Proveedor de Servicios de Internet
LOS	<i>Line of Sight</i> Linea de Vista
LTE	<i>Long Term Evolution</i> Evolución a Largo Plazo
MCS	<i>Modulation and Codification Scheme</i> Esquema de Modulación y Codificación
MinTIC	Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> Agencia Nacional de Aeronáutica y del Espacio
NLOS	<i>Non Line of sight</i> Sin Linea de Vista
NTSC	<i>National Television System Committee</i> Comisión Nacional de Sistema de Televisión
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal

OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal
P-MP	<i>Point to Multi-Point</i> Punto a Multi-Punto
PYME	Pequeña y Mediana Empresa
PIRE	<i>Effective Isotropic Radiated Power</i> Potencia Radiada Isotrópica Efectiva
QoS	<i>Quality of Service</i> Calidad de Servicio
QP	<i>Quiet Period</i> Periodo de Silencio
QPSK	<i>Quaternary Phase Shift Keying</i> Modulación Cuaternaria por Desplazamiento de Fase
RIP	Resguardo Indígena de Puracé
SCH	<i>Superframe Control Header</i> Control de Encabezado de Súper-trama
SHF	<i>Super High Frequency</i> Frecuencia Súper Alta
SIR	<i>Signal to Interference Ratio</i> Relación Señal a Interferencia
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> Relación de Señal a Ruido
SOHO	<i>Small Office/Home Office</i> Oficina Pequeña/Oficina en el Hogar
STRM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i> Misión Topográfica de Radar a Bordo del Transbordador
TIC	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.
TDD	<i>Time Division Duplexing</i> Duplexación por División de Tiempo
UCS	<i>Urgent Co-existence Situation</i> Situación Urgente de Coexistencia
UHF	<i>Ultra High Frequency</i> Frecuencia Ultra Alta

UL	<i>Uplink</i> Enlace de Subida
US	<i>Upstream</i> Flujo de Subida
VHF	<i>Very High Frequency</i> Frecuencia Muy Alta
VoIP	<i>Voice over IP</i> Voz sobre IP
WG	<i>Working Group</i> Grupo de Trabajo
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i> Fidelidad Inalámbrica
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i> Interoperabilidad Mundial para el Acceso por Microondas
WMN	<i>Wireless Mesh Networks</i> Redes Inalámbricas en Malla
WRAN	<i>Wireless Regional Area Network</i> Red Inalámbrica de Área Regional
WS	<i>White Spaces</i> Espacios en Blanco



1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, se está dando una revolución de las telecomunicaciones, la cual impulsa al desarrollo de nuevas alternativas de comunicación que permita satisfacer las necesidades de la población en cuanto a requerimientos de calidad y costo. En América Latina, en concreto, hay una gran brecha digital entre las zonas urbanas y rurales referente a las comunicaciones de banda ancha, y se convierte básicamente en una obligación para los prestadores de servicios buscar una alternativa que brinde de manera económica y eficiente una buena cobertura, teniendo en cuenta, un modelo de negocio para realizar grandes despliegues a bajo costo con el objetivo siempre de disminuir esta brecha digital.

En el año 2004, con la intención de utilizar los espacios en blanco de los sistemas de televisión, se conforma un Grupo de Trabajo (WG, *Working Group*) IEEE 802.22 con el fin de buscar una forma de utilizar estos Espacios en Blanco¹ (WS, *White Spaces*) de manera eficiente y económica para brindar comunicaciones de banda ancha. En el año 2011, el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, *Institute of Electric and Electronics Engineers*) anuncia el estándar IEEE 802.22 que define la Red Inalámbrica de Área Regional (WRAN, *Wireless Regional Area Network*) la cual utiliza un nuevo concepto en radiocomunicaciones: la Radio Cognitiva (CR, *Cognitive Radio*).

Radio Cognitiva introduce unas nuevas funcionalidades a las radiocomunicaciones permitiendo crear sistemas adaptables que se configuran para funcionar en un ambiente radio sin causar interferencia a otros sistemas que funcionan con licencias o que bien, tienen prioridad en la zona.

1.1 Planteamiento del Problema

Los cambios constantes del mundo, siempre derivan en el surgimiento de nuevos retos y la creación de alternativas de solución para los mismos. Se crean eventualmente necesidades, que brindan nuevas oportunidades para la creación de modelos de desarrollo, permitiendo solventarlas de manera sostenible y económica y que sean aplicables (o adaptables) en cualquier parte del mundo.

Las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC), se han convertido en una herramienta de transformación social por la cual, las personas dentro de una sociedad, tienen la necesidad de acceder a la información ya sea para comunicarse, educarse o incluso, entretenerse.

Es debido a esto, que han surgido muchas tecnologías y estándares que buscan proveer conectividad a todas las poblaciones sin importar su ubicación geográfica o sus condiciones socioeconómicas, y es aquí donde se han dado distintos desarrollos de redes que van desde la más básicas como la telefonía, hasta las más complejas, como redes ópticas y satelitales.

¹ Los espacios en blanco son las frecuencias de servicios de difusión que no están siendo



Proveer conectividad es un interés general de los gobiernos para que todas las personas tengan Acceso Universal², con mayor interés en las áreas rurales y las poblaciones marginales [1], pues en áreas urbanas y de condiciones económicas favorables, el acceso ya está bastante desarrollado.

En Colombia, por ejemplo, el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC) trabajó en el programa Compartel [2], que tenía como objetivo permitir que las zonas rurales y la población marginada del país, accedieran a las tecnologías de telecomunicaciones tales como la telefonía y el servicio de Internet. Actualmente, se trabaja con el programa Vive Digital que busca que Colombia dé un gran salto tecnológico mediante la masificación de Internet y el desarrollo del ecosistema digital nacional [3].

Existen, sin embargo, condiciones que limitan la extensión de redes que han tenido éxito a pequeña y mediana escala, tal como la infraestructura cableada o incluso, las redes inalámbricas. En ese sentido, el problema de brindar acceso³ de banda ancha en regiones apartadas y con condiciones geográficas difíciles, obliga a proponer nuevas formas de garantizar que la información llegue a cualquier punto del planeta sin importar lo lejano que sea. La solución satelital, a pesar de tener una buena acogida (incluso en Colombia, con el proyecto SatCol⁴ del programa Compartel), no ha sido ampliamente aplicada, debido al alto costo que implica poner y mantener en órbita una plataforma que brinde el área de cobertura requerida para satisfacer las necesidades de acceso.

De acuerdo con esto, las tecnologías de acceso basadas en redes inalámbricas han tomado una gran relevancia, ya que permiten lograr velocidades de transferencia comparables a redes cableadas de gran difusión como la Línea de Abonado Digital (DSL, *Digital Subscriber Line*) y cable módem, pero con un alcance del enlace mucho mayor. Además, se adaptan a condiciones de propagación difíciles y se pueden implementar en un corto tiempo relativo y a un costo comparativamente bajo [4].

La transmisión inalámbrica de banda ancha en redes orientadas al acceso rural, presenta un problema entre cobertura y velocidad de transferencia⁵, esto quiere decir que a mayor distancia, menor velocidad de transferencia. En ese sentido, se ha buscado soluciones que minimicen esta dificultad. Es así, como en la década de los 90 surgieron alternativas de uso de bandas como las de 2,4 y 5,8 GHz popularizadas con la serie IEEE 802.11x, la Fidelidad Inalámbrica (Wi-Fi, *Wireless Fidelity*) y más adelante, en 2004, el estándar de Interoperabilidad Mundial para el Acceso por Microondas (WiMAX, *Worldwide Interoperability for Microwave Access*), IEEE 802.16, cuya intención, era corregir los

² En términos muy generales se puede decir que Acceso Universal significa poner al alcance de los ciudadanos un servicio de telecomunicaciones a una distancia razonable de su lugar de residencia, cuando no en su propia residencia [3].

³ Por acceso se entenderá como la posibilidad de brindar conectividad a los usuarios. Difiere del término de Cobertura, en el sentido de que la cobertura se refiere a brindar conectividad a un punto de la región sin que ello implique que haya acceso.

⁴ SatCol, sería el primer satélite colombiano en órbita originalmente planeado para entrar en funcionamiento entre 2012 y 2013. El 2 de septiembre de 2010 fue declarada desierta la licitación y actualmente se revalúa los alcances que debe tener el proyecto, pues aparte de brindar cobertura, se busca que ayude en la seguridad nacional y brinde servicios a los industriales [2].

⁵ En el contexto de éste trabajo de grado, velocidad de transferencia se entiende como la cantidad de información que se puede enviar a través de una conexión de red en un período de tiempo dado.



problemas de seguridad y robustez de Wi-Fi, además de mejorar el área de cobertura (esto gracias a que funciona en las bandas de 2,3; 2,5; 3,3 y 3,5 GHz [5]) para ofrecer una solución más económica en áreas de baja densidad poblacional, pero que en realidad resultó insuficiente para redes de alcance regional. Si bien, el tamaño de las celdas WiMAX alcanza típicamente entre 3 y 10 Km de radio (teóricamente puede alcanzar los 50Km de radio), se proyectó que el despliegue de una red de WiMAX de alcance nacional o regional con calidad de servicio (QoS, *Quality of Service*) aceptable para las áreas rurales con baja densidad de usuarios, resultase muy costosa para los países tercermundistas [6]. La necesidad de alternativas tecnológicas más eficientes en costo, prestaciones y uso del espectro para brindar acceso de banda ancha en zonas rurales, llevó a explorar el concepto de WRAN, mediante el uso de CR⁶ y sistemas de coexistencia en canales disponibles de la televisión analógica abierta, incluyendo la formalización en 2004 de un grupo de trabajo para desarrollar un nuevo estándar internacional: IEEE 802.22 [6].

IEEE 802.22 plantea hacer uso de frecuencias asignadas a canales de televisión⁷ en zonas u horarios donde éstas se encuentran disponibles mediante distintas técnicas de adaptación que buscan la coexistencia con otros sistemas que funcionan en el mismo rango de frecuencias, sin que existan interferencias. Entre estas técnicas están: la geolocalización, señalamiento o baliza y caracterización de usuarios mediante sensores de radiofrecuencia, entre otras. Conceptualmente busca el aprovechamiento residual de los espacios en blanco (WS, *White Spaces*) de UHF (UHF, *Ultra High Frequency*) y los presentes en VHF (VHF, *Very High Frequency*) entre 54 y 698 MHz originalmente asignados a la televisión abierta, donde el despliegue de macro celdas WRAN puede alcanzar distancias considerables [6].

Sin embargo, IEEE 802.22 aún no es un estándar de amplia difusión y existen muchos vacíos teóricos y prácticos para enfrentar una posible implementación. Este trabajo de grado, se centró en el análisis de las condiciones bajo las cuales el estándar funcionaría en el contexto colombiano, para diseñar una red que brinde acceso de banda ancha teniendo en cuenta condiciones geográficas y poblacionales, en un área rural del Departamento del Cauca, para responder la siguiente pregunta: ¿Cómo diseñar una red de acceso de banda ancha IEEE 802.22 para una zona rural del Departamento del Cauca⁸?

1.2 Motivación

La facultad de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca se ha destacado siempre a nivel nacional e internacional por estar a la vanguardia en el uso y la enseñanza de tecnologías de comunicaciones que dotan a sus egresados de capacidades para afrontar el mundo laboral actual. Sin embargo, a pesar de que el

⁶ Radio Cognitiva es un sistema de comunicación que implementa un número de componentes de un sistema tradicional como filtros, moduladores, amplificadores, etc. Que se configuran por software en lugar de hardware y que se pueden reprogramar y adaptar de acuerdo a las necesidades presentes [30].

⁷ El estándar IEEE 802.22 plantea el uso de espacios en blanco presentes en las bandas asignadas para televisión analógica, desde los 54 hasta los 698 MHz y que se extiende además, hasta los 862 MHz, por lo tanto tiene un rango desde 54 hasta los 862 MHz [10].

⁸ La zona de estudio, a priori, sería el Resguardo Indígena de Puracé.



estándar IEEE 802.22 venía siendo elaborado desde finales de 2004, y que fue publicado a mediados del 2011, ha tenido poca mención y difusión, no sólo en la Facultad, sino a nivel general, en los círculos académicos que se centran en las comunicaciones inalámbricas; En Colombia, por ejemplo, pocas universidades han publicado trabajos sobre éste estándar.

Por otro lado, la naturaleza misma de WRAN, permite inferir que es una tecnología con grandes posibilidades para dotar a las personas más vulnerables de las herramientas necesarias para afrontar el mundo tecnológico y reducir, por fin, la brecha digital que existe entre las zonas rurales y las zonas urbanas. El hecho de aprovechar los espacios en blanco destinados a televisión, implica una disminución en costos por licencias y un gran alcance de la tecnología debido principalmente al uso de frecuencias relativamente bajas.

Actualmente, existe un interés en utilizar el espectro electromagnético por parte de las empresas proveedoras de servicios de banda ancha y del Gobierno mismo, para brindar acceso a más lugares disminuyendo costos. Es ahí, donde ha tenido cabida la implementación de tecnologías como Wi-MAX o incluso, híbridos de otras tecnologías como Wi-Fi con utilización de topologías en malla presentes en el Departamento Cauca [7]. También, está por definir un espacio del espectro para la implementación de LTE (*Long Term Evolution*), un estándar que cuenta con una eficiencia espectral alta y que brinda velocidades de transferencias muy elevadas⁹, con tamaños óptimos de celdas de 5 Km de radio.

WRAN, por el contrario, no alcanza grandes velocidades en comparación con LTE [8], pero sí permite garantizar banda ancha en celdas que alcanzan hasta los 100 Km de radio, con lo cual se piensa en llegar a todos los hogares de las zonas rurales del país, de la misma manera como llega la televisión o la radio, siendo masiva y económica, e inclusive, pública.

Fue necesario entonces, el estudio del comportamiento de WRAN y la magnitud de su posible implementación, haciendo uso de escenarios de simulación y estudios teóricos. Además, se buscó en la facultad de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, un conocimiento teórico/práctico del estándar, lo que permitió considerar su posible aplicación en la región. Se contextualizó la pertinencia de esta tecnología dentro de lo que será el apagón analógico en el país, y de esta forma se dejó un precedente para el estudio futuro de la aplicación de este estándar como una solución real de acceso en zonas rurales, que no sólo aplica al departamento, sino que sirve a nivel nacional e internacional.

1.3 Enfoque

En el anteproyecto del presente trabajo de grado, se planteó una metodología en cascada que permitiera desarrollar por etapas y de manera secuencial el proyecto, a través del seguimiento de unas actividades que constituían unas fases que dieran a conocer la aplicación a partir de la teoría y las potencialidades del estándar IEEE 802.22 para su posible implementación en un entorno real del departamento del Cauca, además para la adopción de este estándar como una solución económica y eficiente para disminuir la brecha digital existente en Colombia. Estudiando el estado del arte de la aplicación, el

⁹ De hasta 100 Mbps en el enlace de bajada [38].



diseño y el despliegue de redes, pudo constatarse que es muy poca la acogida que ha tenido el estándar a pesar de ser una solución de bajo costo y gran potencial para el cubrimiento de extensas zonas donde se presenten canales de televisión no utilizados.

Teniendo en cuenta el documento CONPES (Consejo Nacional de Política Económica y Social) para el departamento del Cauca, en el cual, el MinTIC se fija como meta invertir 45,505 millones de pesos en tecnologías y sistemas de la información para desplegar una red de fibra óptica en todos los municipios del departamento, con el fin de brindar conectividad a más de 800 institutos educativos con una dotación de aproximadamente 23 mil equipos de cómputo (tabletas y computadores). La red propuesta en este trabajo de grado, puede ser tomada como una alternativa para brindar acceso de banda ancha en el Resguardo Indígena teniendo como base una posible integración a esta red de fibra óptica.

En cuanto al desarrollo del trabajo de grado, siguiendo el lineamiento de los objetivos específicos, se logró mediante simulación determinar la zona de cobertura dentro del departamento del Cauca con unos buenos niveles de recepción para la prestación del servicio. Posteriormente, se estableció bajo la legislación Colombiana, la velocidad de transferencia que garantice banda ancha en un CPE utilizando para esto, el mejor Esquema de Modulación y Codificación (MCS, *Modulation and Codification Scheme*) dentro de los indicadores del estándar IEEE 802.22 y las recomendaciones del WG 802.22, fijando para esto, unos valores de calidad objetivo y analizando las condiciones para las cuales estos se cumplen.

El enfoque del trabajo de grado, por tanto, fue hacer un desarrollo teórico de las condiciones de funcionamiento de una red WRAN para sentar un precedente que permitiera pensar en la utilización del estándar IEEE 802.22 como una opción real para cubrir las necesidades de prestar aplicaciones de banda ancha a zonas rurales de difícil acceso o con densidades poblacionales muy bajas dentro del departamento del Cauca y de Colombia.

1.4 Alcance

El presente trabajo de grado, se realizó utilizando las recomendaciones del WG 802.22 y las indicaciones del estándar IEEE 802.22 con valores típicos, demostrando así la gran aplicabilidad que tiene el establecimiento de redes WRAN en una zona rural como la del Departamento del Cauca.

Además, gracias a que utiliza Duplexación por División de Tiempo (TDD, *Time Division Duplexing*) se logró superar valor típico de 1,5 Mbps de velocidad de transferencia que indica el estándar, garantizando banda ancha para varios CPEs de acuerdo con los indicadores de calidad para los servicios de telecomunicaciones que emitió en el año 2011 la Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC), a la vez que para el resto de CPEs se garantizó la velocidad típica del estándar, con el fin de poder utilizar servicios como navegación, VoIP e incluso videoconferencia.

Con el objetivo de mejorar la calidad del servicio prestado, se hicieron consideraciones de variación de frecuencia¹⁰ de transmisión, permitiendo comprobar la versatilidad y el

¹⁰ La frecuencia es uno de los parámetros de configuración que se pueden variar de acuerdo a las condiciones del ambiente de radiofrecuencia en CR.



dinamismo que sugiere un paradigma como Radio Cognitiva, en el momento de enfrentarse a un ambiente real de radiofrecuencia y a la asignación flexible de frecuencia, potencia y MCS.

Por último, se fijó una BER objetivo necesaria para la transferencia de datos en tiempo, logrando optimizar los requerimientos de potencia de los equipos, buscando garantizar un buen nivel de recepción de la señal tanto en la BS como en los distintos CPEs.

1.5 Contenido del Documento Final del Trabajo de Grado

A continuación se presenta un breve resumen de los temas tratados en cada capítulo del presente trabajo de grado.

Capítulo 2: Revisión Consideraciones Iniciales para el Diseño de un Sistema WRAN.

Se aborda el estudio de las bases teóricas sobre las consideraciones que se deben tener en cuenta para el diseño y despliegue de un sistema WRAN: estudio de las recomendaciones del WG 802.22 y del estándar. Además, se hacen las definiciones correspondientes de la terminología y las tecnologías necesarias para realizar el diseño de la red WRAN.

Capítulo 3: Determinación Mediante Simulación de la Cobertura para la Zona Rural Objeto

Se centra en el modelo de propagación y en la herramienta software que permitirá ejecutar el diseño de la red y la predicción del comportamiento del canal, estas herramientas software permiten modelar justamente la cobertura de la red, teniendo en cuenta las recomendaciones y el modelo de propagación. Además, se presentan los parámetros de configuración de la simulación para más adelante, presentar los resultados y dar cumplimiento así, al primer objetivo específico planteado en el anteproyecto de este trabajo de grado.

Capítulo 4: *Throughput* del Sistema

Analiza los requerimientos de velocidad de transferencia del sistema, haciendo énfasis en la combinación de los MCSs y los *throughput* obtenidos, teniendo en cuenta estos datos se fija un BER objetivo y se determina la potencia de transmisión en UL y DL necesaria que garantice banda ancha ya sea a un CPE o a varios CPEs gracias a los principios de la duplexación TDD, con esto, se da cumplimiento al segundo objetivo específico planteado.

Capítulo 5: Conclusiones, Recomendaciones y Trabajos Futuros

Contiene las conclusiones hechas a partir del desarrollo de este trabajo y se plantean algunas ideas para continuar con la línea del mismo.



2. REVISIÓN DE LAS CONSIDERACIONES INICIALES PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA WRAN

Las comunicaciones inalámbricas utilizan el espectro radioeléctrico para brindar la posibilidad de conectar a regiones de difícil acceso como zonas remotas, áreas rurales, etc; por ende, la gran distancia y la difícil geografía imposibilitan el uso de cables de cobre o de fibra óptica debido a su alto costo. Esto ha impulsado a un amplio desarrollo en las tecnologías que permitan brindar acceso de banda ancha a estas regiones mediante la interfaz de aire.

El espectro radio está asignado casi en su totalidad, razón por la cual, es considerado como un recurso escaso.

Radio Cognitiva es vista como la solución al problema de aprovechamiento del espectro asignado que no está siendo utilizado, como lo son los canales de televisión analógica alojados en las bandas de VHF y UHF. Este paradigma es clave en la utilización del espectro, pues tiene la capacidad de transformarlo en flexible, eficiente y seguro, adaptando características de operación de los sistemas, a las condiciones en tiempo real del ambiente radio. CR tiene el potencial de valerse de grandes cantidades del espectro inutilizado de manera inteligente para no interferir con dispositivos incumbentes¹¹ en bandas de frecuencia licenciadas para usos específicos [9] [6].

El estándar IEEE 802.22 propone utilizar el espectro destinado al funcionamiento de la televisión analógica y ser una solución de bajo costo, para transmitir banda ancha alcanzando grandes distancias, esto se logra gracias a la naturaleza analógica de las señales que se utiliza [6].

En el año 2004, el IEEE y la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC, *Federal Communications Commission*) formalizaron la creación del WG 802.22 del IEEE para redes WRAN, destinado al desarrollo de un estándar que lograra utilizar los espacios en blanco del espectro asignados a la televisión analógica, con el fin brindar banda ancha. Este grupo de trabajo fue encargado de desarrollar la interfaz de la capa física (PHY) y capa de control de acceso al medio (MAC), basado en CR con el objetivo de permitir la operación de estas redes en bandas de difusión de televisión de tal forma que no necesitaran licencia.

En el año 2011, es publicado el estándar IEEE 802.22, el primer estándar basado en Radio Cognitiva que permite la coexistencia de sistemas para transmitir banda ancha con sistemas de televisión analógica en bandas de VHF y UHF y otros sistemas incumbentes.

2.1 Conceptos Generales

La proliferación de tecnologías inalámbricas ha traído consigo una escasez de frecuencias libres dentro del espectro radio. Esto, sin duda alguna, supone un gran desafío para el aprovechamiento máximo del espectro electromagnético. Así surge CR, una técnica que busca el máximo aprovechamiento de las frecuencias mediante la toma de decisiones inteligentes que permiten adaptar un sistema al ambiente de radiofrecuencia de su

¹¹ Dispositivos (o sistemas) incumbentes son aquellos que operan en las mismas bandas de frecuencia y que pueden verse afectados por la interferencia de un sistema basado en CR.



entorno, permitiendo así, la convivencia armónica entre sistemas inalámbricos en un mismo entorno geográfico. IEEE 802.22, el estándar que define las Redes WRAN, es el más claro ejemplo de la aplicación de CR, puesto que permite la coexistencia sin daños por interferencia con sistemas de televisión (y otros sistemas incumbentes).

Conceptualmente busca el aprovechamiento residual de los espacios en blanco en las frecuencias de VHF-UHF entre 54 y 698 MHz originalmente asignados a la televisión abierta, donde la distribución de macro-celdas WRAN puede alcanzar distancias considerables y además, funcionar en bandas por fuera del sistema de televisión analógica alcanzando los 862 MHz [10]. Para esto, utiliza tres componentes principales [6] [9] [11]:

- Detección de espectro (*Spectrum Sensing*): los dispositivos de radio cognitiva, pueden sensar el ambiente radio para identificar las bandas de frecuencia disponibles.
- Administración Dinámica de Espectro (*Dynamic Spectrum Management*): las redes con radio cognitiva pueden seleccionar dinámicamente la mejor frecuencia disponible para comunicaciones y monitorear el ambiente radio garantizando así, la coexistencia con otros sistemas inalámbricos.
- Comunicaciones Adaptativas (*Adaptive Communications*): los dispositivos de radio cognitiva, pueden configurar sus parámetros de transmisión para hacer el mejor uso del espectro disponible (que varía constantemente).

CR permite la utilización espacial y temporal del espectro, permitiendo a todo tipo de usuarios, acceder a sistemas de coexistencia sin ser intrusivos con los sistemas para los que fueron asignados las frecuencias originalmente [12].

Además, incorpora múltiples fuentes de información determinando su configuración actual de operación y colabora con otras redes que funcionan con CR compartiendo información del ambiente radio. Todo esto, permite que las redes que utilizan CR, reduzcan su complejidad, disminuyendo así, su tiempo de planeación y sus requerimientos de ingeniería [7].

Así, CR presenta dos funcionalidades especiales:

- Políticas y bases de datos de configuración: las políticas pueden especificar cuáles frecuencias pueden usarse en ciertos lugares. Las bases de datos de configuración describen las características de operación de radiofrecuencia y además, se usan para limitar al terminal radio a estar dentro de las regulaciones y los límites físicos. [7]
- Auto-configuración: los terminales se pueden obtener mediante la unión de diversos módulos. Por ejemplo, un procesador digital de señales, un controlador, etc. Cada módulo debe auto describirse, de esta manera el terminal se configurara automáticamente para la operación de los módulos disponibles. Esto es similar a los dispositivos “*plug and play*”¹².

¹² Tecnología que permite a un dispositivo informático ser conectado a un computador y funcionar sin tener que configurar nada. Literalmente traduce “enchufar y usar”.



Y además, presenta dos características principales:

- Capacidad Cognitiva (*Cognitive Capability*): la capacidad cognitiva, permite la interacción en tiempo real con el ambiente de operación para determinar los parámetros apropiados de radiofrecuencia. La figura 2.1 [13] muestra el ciclo de tareas que se requieren para la operación adaptativa en un espectro determinado. Esto se conoce como el ciclo cognitivo y tiene las siguientes etapas:
 - Detección de espectro (*Spectrum Sensing*): se monitorean las bandas de frecuencia, se captura la información y se procede a detectar los espacios en blanco presentes en el espectro.
 - Análisis de espectro (*Spectrum Analysis*): se analizan las características de los espacios en blanco detectados en el espectro.
 - Decisión de espectro (*Spectrum Decision*): se determinan los parámetros como modo de transmisión y ancho de banda. Entonces, se escoge la banda de espectro apropiada de acuerdo a los requerimientos del usuario.

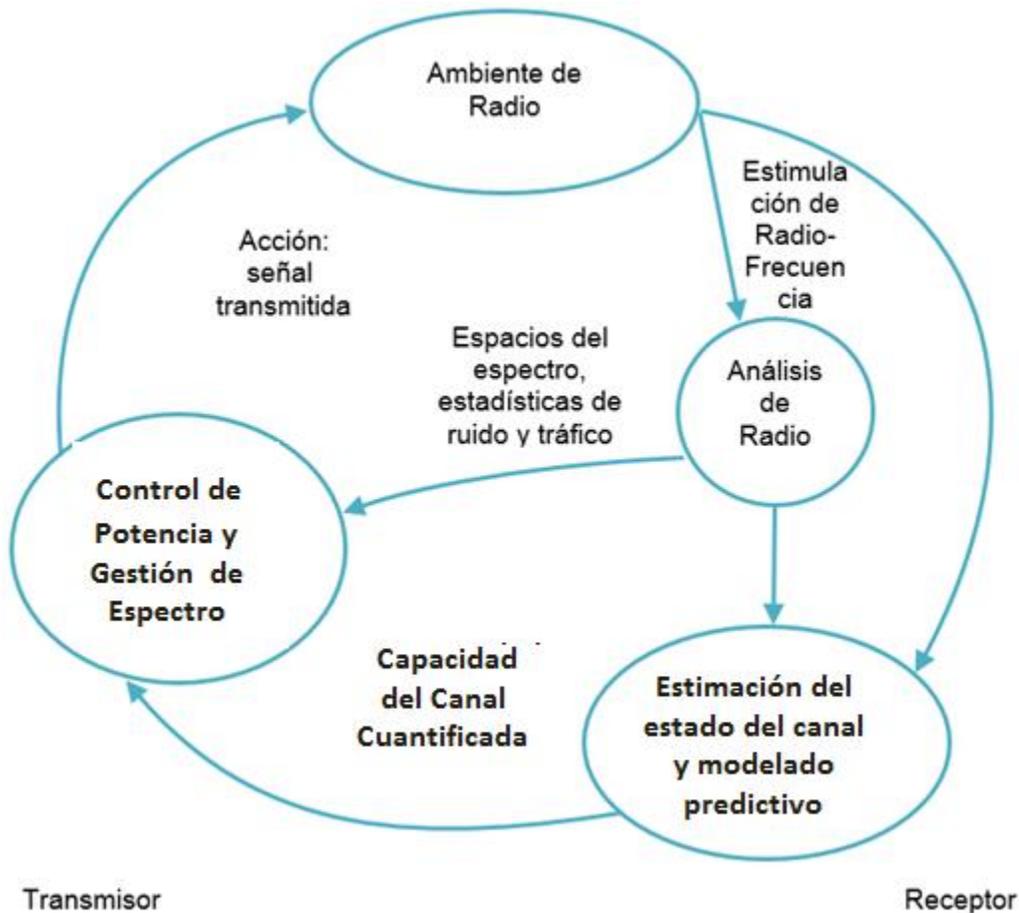


Figura 2.1 Ciclo Cognitivo.



- Reconfiguración (*Reconfigurability*): es la capacidad de ajustar los parámetros de transmisión permitiendo la adaptación a los cambios que se presenten en el ambiente de radiofrecuencia. Algunos de los parámetros que se pueden reconfigurar, son:
 - Frecuencia de Operación (*Operation Frequency*): se puede cambiar la frecuencia de operación escogiendo la más adecuada cuando se presenten cambios en el ambiente radio.
 - Tipo de Modulación (*Modulation Type*): se puede cambiar el esquema de modulación para adaptarlo a los requerimientos del usuario y las condiciones del canal.
 - Potencia de Transmisión (*Transmission Power*): se puede modificar la potencia de transmisión de manera dinámica. Si no se necesita una potencia de transmisión alta, se cambia a una más baja permitiendo a más usuarios el aprovechamiento del espectro a la vez que se reduce la interferencia.
 - Tecnología de Comunicación (*Communication Technology*): la radio cognitiva se puede usar para proveer interoperabilidad entre diferentes sistemas de comunicación.

2.2 Funcionamiento del Sistema

Un sistema IEEE 802.22 funciona mediante una Red Punto a Multipunto (PMP, *Point to Multi-Point*) conformada por los Equipos Locales de Cliente (CPE, *Customer Premise Equipment*) y una Estación Base (BS, *Base Station*) que administra el acceso al medio de dichos CPEs para el uso de aplicaciones de banda ancha [6] como se muestra en la figura 2.2 [11], y que además controla todas las características de Radiofrecuencia para el funcionamiento del sistema: codificación, modulación, etc. [14]. En la descripción de funcionamiento de la capa MAC se hará mayor énfasis en la forma como se transmiten los datos.

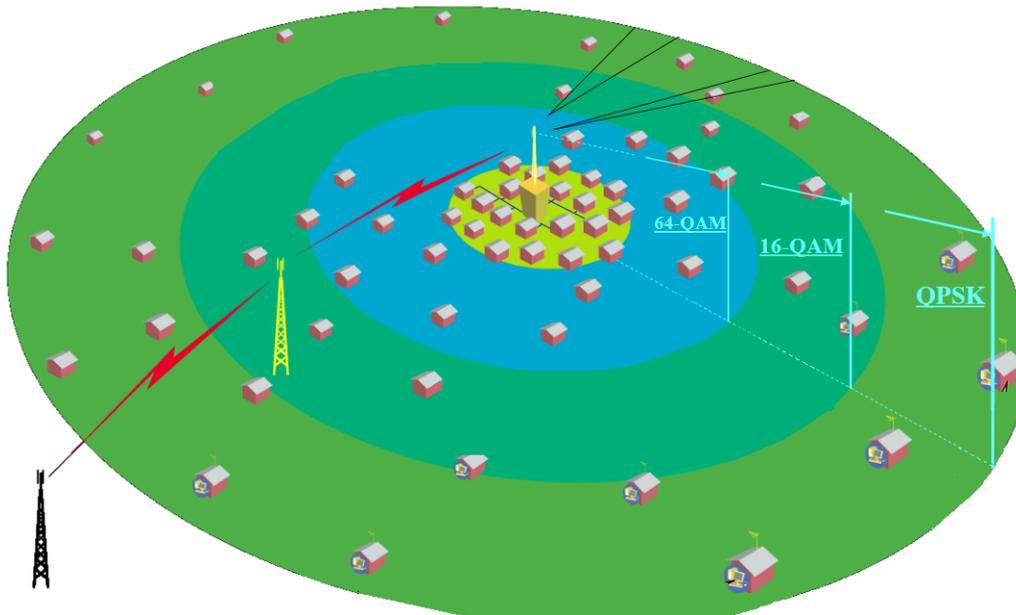


Figura 2.2 Una Celda WRAN con su BS y sus CPEs.



IEEE 802.22 se puede orientar para uso doméstico o de pequeñas oficinas sin grandes requerimientos de ancho de banda en áreas de baja densidad poblacional, como lo son: Pequeña Oficina, Oficina de Casa (SOHO, *Small Office/Home Office*) y la Pequeña y Mediana Empresa (PYME) para cubrir necesidades en cuanto a transmisión de datos [11].

La capa física es optimizada para evitar altos tiempos de respuesta de canal y desvanecimiento selectivo en alta frecuencia. La capa MAC brinda compensación para tiempos altos de retardo para los flujos de subida y bajada. Además, IEEE 802.22 permite movilidad (a pesar de que no está diseñado para esto) a una velocidad de 114 Km/h sin que esté configurado el *Handover*¹³, es decir, dentro de la misma celda [15].

El área de cobertura de IEEE 802.22 es mucho más grande que cualquiera de los otros estándares 802. El rango típico para los CPEs es de 33 Km y puede alcanzar un valor máximo de 100 Km [16]. Para lograr el valor de 33 Km, la Potencia Radiada Isotrópica Efectiva (PIRE, *Effective Isotropic Radiated Power*) debe ser de 4 Vatios para cubrir el 50% de una localidad con una intensidad de campo específica de 99,9% de tiempo en esa localidad y teniendo como referencia, una densidad poblacional de 1,25 personas/Km² [11]. El sistema ha sido definido para usar el canal de 6MHz¹⁴, aunque bien, existe la posibilidad de utilizar canales de 7 y 8 MHz. Teniendo en cuenta esto, WRAN puede brindar en la periferia de la celda, una velocidad de transferencia de 1,5 Mbps en el enlace de bajada y 384Kbps en el enlace de subida basado en TDD. La eficiencia espectral varía entre 0,5 bps/Hz hasta los 5 bps/Hz, tomando como valor típico el de 3 bps/Hz. De esta manera, para el canal de 6 MHz, la velocidad de transferencia¹⁵ del sistema es de 18Mbps [6].

$$R = \eta * BWch \quad (2.1)$$

$$R = \frac{3bit}{s * Hz} * 6MHz$$

$$R = 18Mbps$$

Donde R representa la velocidad de transferencia del sistema, η la eficiencia espectral y $BWch$ el ancho de banda del canal.

En la figura 2.3 [11] se muestra una gráfica comparativa entre las distintas tecnologías para acceso de banda ancha; donde pueden verse las diferencias de alcance y velocidad de transferencia entre ellas.

¹³ El *Handover* es un proceso de las redes inalámbricas que permite que un móvil utilice otra estación base cuando las condiciones del enlace con su estación actual no son las adecuadas.

¹⁴ Colombia se rige por la Comisión Nacional de Sistema de Televisión (*NTSC, National Television System Committee*), que implica un manejo de canales de 6 MHz [17].

¹⁵ Se refiere a la velocidad máxima que se pueden transmitir en el sistema. No debe confundirse con la tasa de datos, ni con la velocidad de transferencia de datos referida para cada usuario.

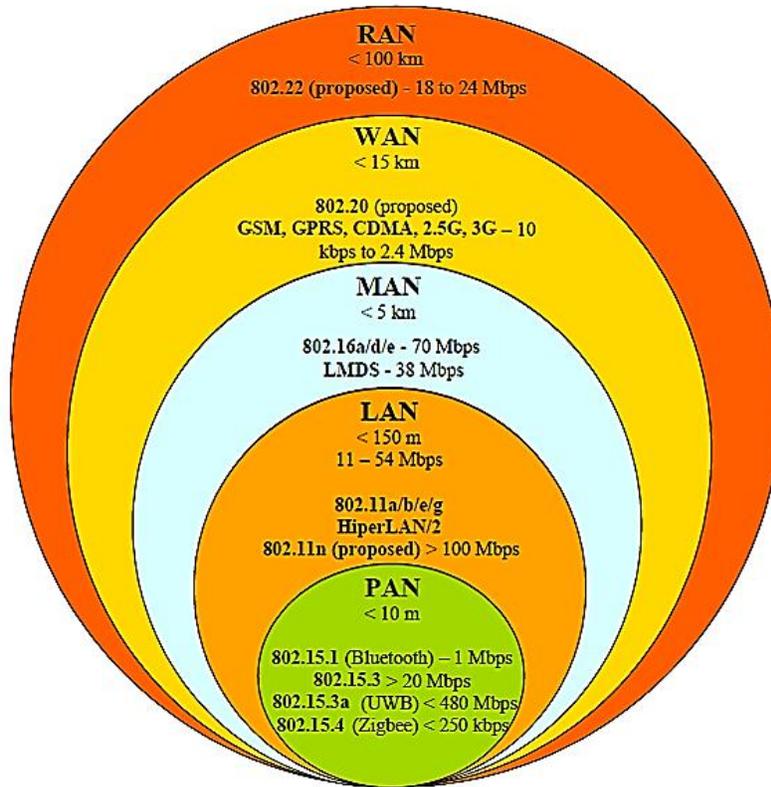


Figura 2.3 Estándares de Redes Inalámbricas.

2.3 Regulación de Frecuencias

IEEE 802.22, permite la coexistencia sin daños por interferencia de sistemas que funcionan en el mismo rango de frecuencias como la televisión analógica, televisión digital y dispositivos electrónicos como micrófonos inalámbricos, entre otros. Conceptualmente busca el aprovechamiento residual de espacios en blanco en las frecuencias de VHF-UHF entre 54 y logrando alcance de hasta los 862 MHz¹⁶, donde la distribución de macroceldas WRAN puede alcanzar distancias considerables [2].

En Estados Unidos, la FCC ha regulado el espectro radio, separando las bandas de frecuencia de acuerdo a diferentes propósitos. Para el año 2002, cerca del 75% de las bandas UHF habían sido asignadas, y según estudios de la misma comisión, cerca del 70% de este espectro asignado, no era utilizado. Esto, motivó a crear un nuevo concepto en el cuál, hubiese sistemas que tomaran prestadas estas frecuencias inutilizadas y las aprovecharan para el montaje de otras redes a partir de las frecuencias ya asignadas [12].

Colombia, en materia de televisión analógica, está regida por la NTSC el cual fue diseñado en Estados Unidos en el año 1940 [17] y que funciona con una canalización a 6MHz en frecuencias de VHF y UHF que van desde los 54 MHz hasta los 88 MHz para los

¹⁶ Cabe resaltar que abarca el rango del dividendo digital presente entre 698 y 806 MHz pero no interfiere con el.



canales 1 – 6; desde los 174 MHz hasta los 216 MHz para los canales 7 – 13; desde los 470 MHz hasta los 698 MHz para los canales 14 – 69. En Colombia, sin embargo, estas frecuencias para canalización varían según las disposiciones de la Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC), así: desde los 54 MHz hasta los 72 MHz; desde los 76 MHz hasta los 88 MHz para los canales 1 – 6; desde los 174 MHz hasta los 216 MHz para los canales 7 – 13; desde los 512 MHz a 608 MHz y desde los 614 MHz hasta los 698 MHz para los canales restantes. La figura 2.4, ilustra la distribución del espectro radio eléctrico en Colombia. La tabla 2.1 muestra una comparación de la canalización de televisión analógica en Colombia y en Estados Unidos.

Canales	Frecuencias Asignadas en Colombia (MHz)	Frecuencias Asignadas en EEUU (MHz)
1-6	54-72; 76-88	54-88
7-13	174-216	174-216
14-69	512-608; 614-698	470-806

Tabla 2.1 Canalización de Televisión analógica en Colombia y EEUU.

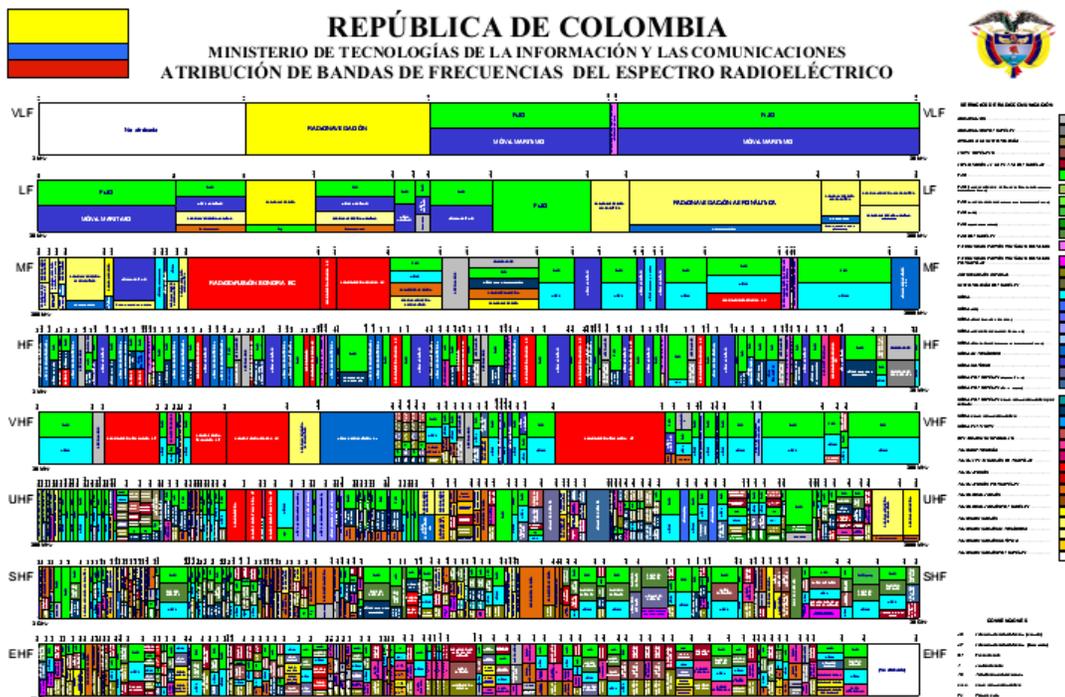


Figura 2.4 Atribución de Bandas de Frecuencias del Espectro Radioeléctrico en Colombia.

Las figuras 2.5, 2.6 y 2.7 se centran en las bandas de VHF y UHF donde está asignado el servicio de radiodifusión de televisión en Colombia.

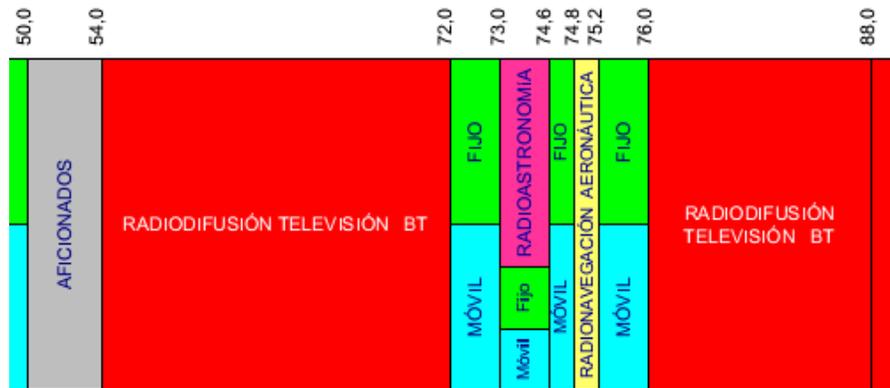


Figura 2.5 Bandas de VHF para los Canales 1 – 6.



Figura 2.6 Bandas de UHF para los Canales 7 – 13.



Figura 2.7 Bandas de UHF para el resto de Canales de Televisión Analógica.

Sin embargo, muchos de estos canales ubicados en las bandas de televisión no están siendo utilizados, es ahí donde los sistemas WRAN tienen cabida ya que por definición, funcionan en los espacios en blanco presentes en las bandas de frecuencia de VHF y



UHF destinadas a la radiodifusión de televisión (por definición del estándar, entre 54 MHz y 862 MHz).

Puesto que el estándar IEEE 802.22 está pensado para operar en bandas asignadas a sistemas de televisión, se especifican los niveles de potencia para desocupar un canal ante la detección del umbral de las siguientes señales [40]:

- Televisión Digital (ATSC): -114 dBm.
- Televisión Analógica (NTSC): -114 dBm.
- Micrófonos inalámbricos: -114 dBm.

Para mitigar la interferencia sobre estas señales, el protocolo 802.22 propone la utilización de tablas de ocupación de espectro, las cuáles se actualizan vía software, tanto por el propio CR como por el administrador del sistema. Además, también establece límites sobre la PIRE (La cual está sujeta a la regulación de cada país. En el caso de Colombia, la potencia máxima es de 4 Vatios [19] tanto para la BS como para los CPEs) e interferencias sobre bandas adyacentes.

2.4 Revisión del Estándar IEEE 802.22

Las redes inalámbricas de área regional (WRAN), para las cuales este estándar fue desarrollado, son óptimas para operar en áreas de baja densidad poblacional para brindar acceso de banda ancha usando los canales de televisión que no están siendo utilizados en el rango de frecuencias comprendido entre 54 MHz y 862 MHz, al mismo tiempo que evita la interferencia con sistemas de difusión que operan en estas bandas. Una aplicación típica sería brindar acceso de banda ancha en una zona rural con un radio de 17-30 Km, dependiendo de la PIRE, de la estación base utilizando modulación adaptativa, aunque podría extenderse hasta a 100 Km cuando se tienen buenas condiciones de propagación de radio frecuencia.

La velocidad de transferencia del usuario terminal, según el estándar, se espera que sea de 1,5 Mbps en el enlace de bajada y de 384 Kbps en el enlace de subida. La disponibilidad del servicio debido a la propagación de radiofrecuencia se asume del 50% de los lugares y el 99,9% del tiempo. En promedio, la eficiencia espectral sería alrededor de 3 bps/Hz, dada por la modulación adaptativa. El canal se toma de 6 MHz, de acuerdo con la regulación colombiana.

2.4.1 Arquitectura de Referencia

El sistema IEEE 802.22 especifica un arreglo PMP; por lo cual, una BS administra su propia celda y los CPEs asociados. En el Enlace de Bajada (DL, *Downlink*) los datos están configurados en espacios MAC consecutivos, mientras que en el Enlace de Subida (UL, *Uplink*) la velocidad de transferencia del canal es compartida por las unidades CPEs, basadas en el esquema de Acceso Múltiple Asignado según Demanda (DAMA, *Demand-Assigned Multiple Access*) [20].

Para asegurar la protección de los servicios que operan en la misma banda, el sistema IEEE 802.22 mantiene una estricta relación maestro/esclavo entre la BS y los CPEs. Ningún CPE puede transmitir sin recibir la autorización de la BS que también controla las



características de radiofrecuencia (modulación, codificación y frecuencias de operación) usadas por los CPEs. Además de las características típicas de una BS, IEEE 802.22 maneja una única característica de detección distribuida en la cual, los CPEs realizan actividades de medición del espectro y la BS toma las decisiones convenientes para la protección y funcionamiento correcto del sistema.

2.4.2 Capa Física

La capa física de IEEE 802.22 está especialmente diseñada para soportar un sistema que usa canales vacantes de televisión con el fin de brindar acceso inalámbrico en distancias de hasta 100 Km.

Las especificaciones de la capa física están basadas en Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) tanto para el enlace de subida como el de bajada [11].

2.4.2.1 OFDMA

El OFDMA es un esquema de acceso al medio (aire) que subdivide el canal en bloques de recursos, que resultan de la asignación de un periodo de tiempo y ancho de banda, porciones que corresponden al canal por el que se transmite y a la duración de la trama. Al dividir el ancho de banda del canal, las porciones resultantes se conocen como sub-portadoras, y se asignan a los usuarios de acuerdo a sus necesidades [21].

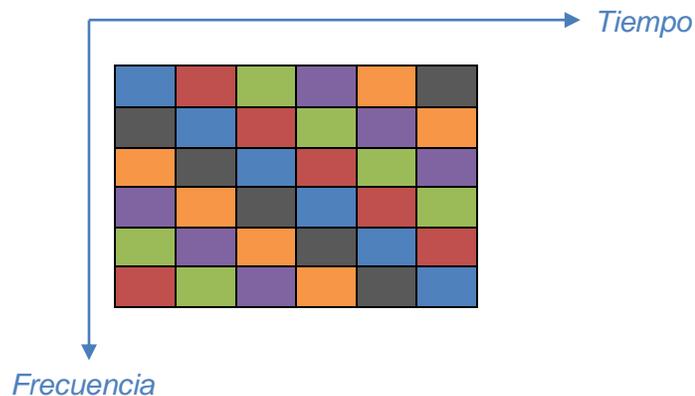


Figura 2.8 Sub-canalización en OFDMA.

En la figura 2.8 muestra la forma en que OFDMA asigna los bloques de recurso a cada usuario. Viendo esta figura como un arreglo de filas y columnas, estas últimas corresponderían a las sub-portadoras y forman sub-canales al transmitir con un mismo destino. Por ejemplo, el sub-canal de color naranja transmite utilizando varias sub-portadoras en distintas ranuras de tiempo.

La utilización de OFDMA es vital para garantizar la flexibilidad de la capa física, es decir, adaptar la transmisión a los requerimientos de cada usuario. Para esto, se deben utilizar además, distintos esquemas de modulación y codificación que permitan el dinamismo en la asignación de los recursos disponibles.



Para el caso de WRAN, IEEE 802.22 hace uso de los esquemas de modulación de BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM.

2.4.2.1.1 Dominio del Tiempo en OFDMA

El dominio de tiempo en OFDMA se basa en el cálculo de la duración de cada símbolo OFDM que se logra con la Transformada Inversa Rápida de Fourier (IFFT, *Inverse Fast Fourier Transform*) se utiliza la IFFT para transformar el dominio de frecuencia del canal, en un dominio de tiempo con un total de 2048 muestras y de esta manera calcular la duración del símbolo de OFDM¹⁷. La duración de símbolo de OFDM resulta de la suma del tiempo de la FFT con el tiempo del Prefijo Cíclico (CP) que se inserta a modo de delimitación de cada símbolo en el inicio de este. La figura 2.9 ilustra la composición de un símbolo de OFDM. Por cada siete sub-portadoras hay una sub-portadora piloto [11].

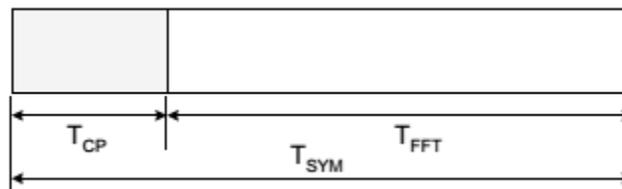


Figura 2.9 Formato del Símbolo OFDM.

La duración de símbolo (T_{SYM}) varía dependiendo del prefijo cíclico que se utilice. Para WRAN, el estándar IEEE 802.22 indica que los prefijos cíclicos a utilizar pueden ser 1/4, 1/8, 1/16 o 1/32. La tabla 2.2 muestra los distintos valores de la duración del símbolo para los diferentes canales y los diferentes prefijos cíclicos [11].

		CP=1/4	CP=1/8	CP=1/16	CP=1/32
$T_{SYM}(\mu s) = T_{FFT} + T_{CP}$	6 MHz	308,051	317,386	336,056	373,396
	7 MHz	264	272	288	320
	8 MHz	231,173	238,179	252,189	280,210

Tabla 2.2 Duración de Símbolo.

2.4.2.1.2 Dominio de Frecuencia de OFDMA

En el dominio de la frecuencia, el canal se divide en 2048 sub-portadoras (tamaño de FFT) las cuales se clasifican en 3 categorías de acuerdo con la funcionalidad que estas tengan, así [11]:

- Sub-portadoras de datos: en total 1440.
- Sub-portadoras de guarda: en total 368. Se utilizan para sincronización y para acomodar el tiempo de respuesta y retardo en la transmisión de UL a DL o viceversa.
- Sub-portadoras piloto: en total 240.

¹⁷ OFDM se encarga de asignar sub-portadoras de frecuencia para la transmisión de datos donde cada una está modulada en amplitud y fase.



Por cada 7 sub-portadoras, existe una sub-portadora piloto. La figura 2.10 lo ilustra. Los círculos grises representan las sub-portadoras piloto y los círculos blancos representan sub-portadoras de datos.

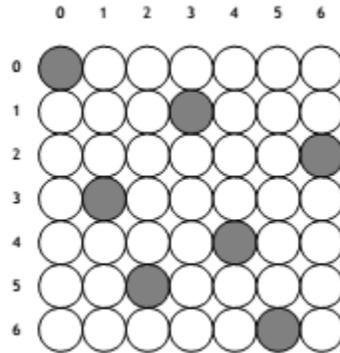


Figura 2.10 Patrón de Repetición de las Sub-portadoras Piloto.

2.4.2.1.3 Parámetros de Símbolo

Partiendo de una frecuencia de muestreo de $\frac{8}{7}$ del ancho de banda del canal, se obtienen unos parámetros de caracterización de símbolo que permiten realizar los cálculos de tasa de datos del sistema. La tabla 2.3 muestra los parámetros de símbolo para los 3 canales que se pueden utilizar en el estándar: 6 MHz, 7 MHz u 8 MHz [11].

Parámetro de Símbolo	Frecuencia de Muestreo F_s (MHz)	Espaciamiento de portadoras: $\Delta_f = \frac{F_s}{2048}$ (Hz)	Período de la FFT/IFFT $T_{FFT} = \frac{1}{\Delta_f}$ (μs)	Unidad de Tiempo $TU = \frac{T_{FFT}}{2048}$ (ns)
Canal de 6 MHz	6,857	3,3482	298,666	145,833
Canal de 7 MHz	8	3,9062	256	125
Canal de 8 MHz	9,142	4,4642	224	109,375

Tabla 2.3 Parámetros de Símbolo.

2.4.2.2 BPSK

BPSK es una modulación que toma la portadora y hace variar su fase entre dos valores discretos. Emplea solamente dos símbolos de un bit cada uno. Tiene una separación de símbolos amplia y las velocidades de transmisión que permite lograr son las más bajas. Es comúnmente utilizada en WRAN sin un esquema de codificación y para efectos de transmisión de paquetes o mensajes de control en el establecimiento de la conexión. Concretamente las sub-portadoras piloto siempre están moduladas con BPSK.



La figura 2.11 [22] muestra el diagrama de constelación de la modulación BPSK y permite observar el ángulo de separación de los dos estados de dicha modulación.

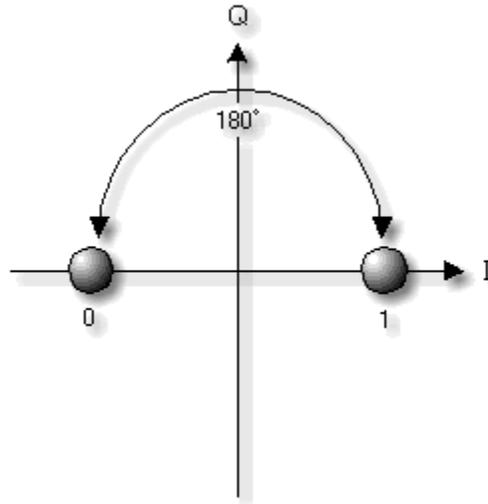


Figura 2.11 Diagrama de Constelación de la Modulación BPSK.

2.4.2.3 QPSK

QPSK es otra de las variaciones de la modulación por desplazamiento de fase, pero a diferencia de BPSK, utiliza cuatro estados, cada uno con dos bits de información. Estos estados son equidistantes entre sí con una separación de 90 grados. Tiene el doble de eficiencia que BPSK en lograr mejores velocidades de transmisión y se combina con codificación de 1/2, 2/3, 3/4 y 5/6.

La figura 2.12 [22] muestra el diagrama de constelación de QPSK y la separación de sus símbolos.

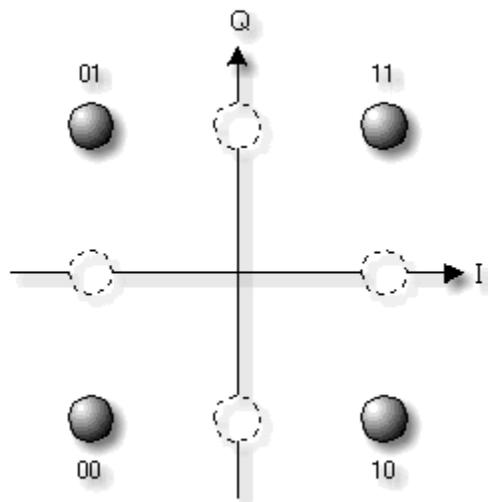


Figura 2.12 Diagrama de Constelación de QPSK.



2.4.2.4 16-QAM

16-QAM modula la señal portadora tanto en amplitud como en fase logrando 16 estados distintos utilizando para ello, 4 bits de información, lo que permite alcanzar velocidades de transmisión más altas que BPSK y QPSK al combinarla con codificación de 1/2, 2/3, 3/4 y 5/6.

La figura 2.13 [22] muestra el diagrama de constelación de 16-QAM con sus 16 estados formados por 4 bits de información. La tabla 2.3 resume los estados y las fases que modula 16-QAM en su símbolo de 4 bits.

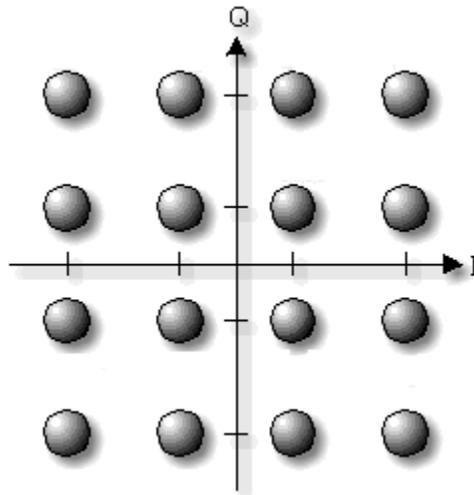


Figura 2.13 Diagrama de Constelación de 16-QAM.

Símbolo Transmitido	Fase de la portadora (°)	Amplitud de la Portadora
0000	225	$\sqrt{2}$
0001	135	$\sqrt{2}$
0010	243,43	$\sqrt{5}/2$
0011	225	$\sqrt{2}/2$
0100	206,56	$\sqrt{5}/2$
0101	153,43	$\sqrt{5}/2$
0110	315	$\sqrt{2}/2$
0111	135	$\sqrt{2}/2$
1000	337,5	$\sqrt{5}/2$
1001	116,56	$\sqrt{5}/2$
1010	296,56	$\sqrt{5}/2$
1011	315	$\sqrt{2}$
1100	45	$\sqrt{2}$
1101	26,56	$\sqrt{5}/2$
1110	63,43	$\sqrt{5}/2$



1111	45	$\sqrt{2}/2$
------	----	--------------

Tabla 2.4 Modulación 16-QAM: Símbolo, Fase y Amplitud de Portadora.

2.4.2.5 64-QAM

64-QAM utiliza un símbolo de 6 bits de información de acuerdo con la amplitud y la fase de la portadora y permite alcanzar velocidades de transmisión mucho más altas que los demás esquemas de modulación utilizados en WRAN. Se combina, al igual que 16-QAM con codificación de 1/2, 2/3, 3/4 y 5/6. Este esquema de modulación es vulnerable a distorsión en fase debido a la gran cantidad de estados que posee.

La figura 2.14 [23] muestra el diagrama de constelación de 64-QAM con sus 64 estados formados por 6 bits de información. Análogamente a la tabla 2.4, 64-QAM presenta un símbolo por cada combinación de fase y amplitud.

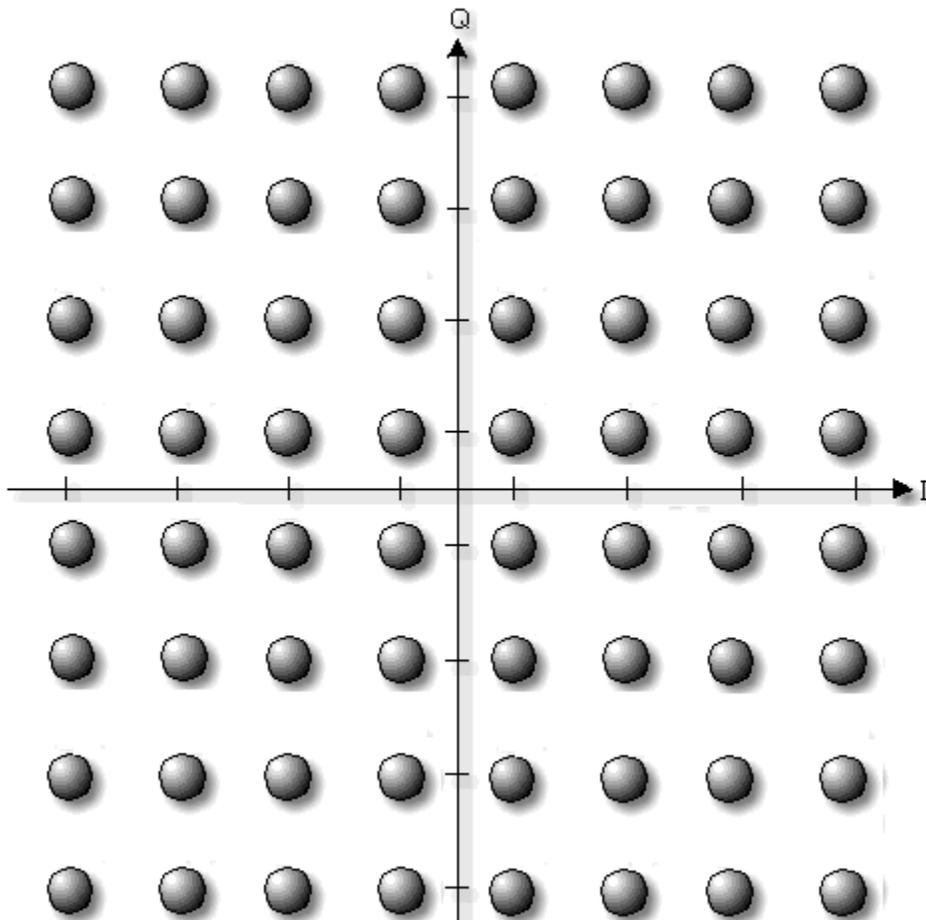


Figura 2.14 Diagrama de Constelación de 64-QAM.



Símbolo Transmitido	Fase de la portadora (°)	Amplitud de la Portadora
000000	45	$\sqrt{2}/4$
000001	26,56	$\sqrt{5}/4$
000010	18,43	$\sqrt{10}/4$
000011	14,03	$\sqrt{17}/4$
000100	45	$\sqrt{2}/2$
000101	33,69	$\sqrt{13}/4$
000110	25,56	$\sqrt{5}/2$
000111	45	$3\sqrt{2}/4$
001000	36,86	$5/4$
001001	45	$\sqrt{2}$
001010	53,13	$5/4$
001011	56,30	$\sqrt{13}/4$
001100	63,43	$\sqrt{5}/2$
001101	71,56	$\sqrt{10}/4$
001111	63,43	$\sqrt{5}/4$
010000	75,96	$\sqrt{17}/4$
010001	135	$\sqrt{2}/4$
010010	116,56	$\sqrt{5}/4$
010011	108,43	$\sqrt{10}/4$
010100	104,03	$\sqrt{17}/4$
010101	135	$\sqrt{2}/2$
010110	123,69	$\sqrt{13}/4$
010111	116,56	$\sqrt{5}/2$
011000	135	$3\sqrt{2}/4$
011001	126,86	$5/4$
011010	135	$\sqrt{2}$
011011	143,13	$5/4$
011100	146,30	$\sqrt{13}/4$
011101	153,43	$\sqrt{5}/2$
011111	161,56	$\sqrt{10}/4$
100000	153,43	$\sqrt{5}/4$
100001	165,96	$\sqrt{17}/4$
100010	225	$\sqrt{2}/4$
100011	206,56	$\sqrt{5}/4$
100100	198,43	$\sqrt{10}/4$
100101	194,03	$\sqrt{17}/4$
100110	225	$\sqrt{2}/2$
100111	213,69	$\sqrt{13}/4$
101000	206,56	$\sqrt{5}/2$
101001	225	$3\sqrt{2}/4$



101010	216,86	5/4
101011	225	$\sqrt{2}$
101100	233,13	5/4
101101	236,30	$\sqrt{13}/4$
101110	243,43	$\sqrt{5}/2$
101111	251,56	$\sqrt{10}/4$
110000	243,43	$\sqrt{5}/4$
110001	255,96	$\sqrt{17}/4$
110010	345,96	$\sqrt{17}/4$
110011	243,43	$\sqrt{5}/4$
110100	341,56	$\sqrt{10}/4$
110101	333,43	$\sqrt{5}/2$
110110	326,30	$\sqrt{13}/4$
110111	223,13	5/4
111000	315	$\sqrt{2}$
111001	306,86	5/4
111000	315	$3\sqrt{2}/4$
111001	296,56	$\sqrt{5}/2$
111010	303,69	$\sqrt{13}/4$
111011	315	$\sqrt{2}/2$
111100	284,03	$\sqrt{17}/4$
111101	288,43	$\sqrt{10}/4$
111110	296,56	$\sqrt{5}/4$
111111	315	$\sqrt{2}/4$

Tabla 2.5 Modulación 64-QAM: Símbolo, Fase y Amplitud de Portadora.

La tabla 2.6 [11] contiene los parámetros resumidos para la capa física. La tabla 2.7 contiene los modos PHY para un canal de televisión de 6 MHz (caso de Colombia) y utilizando un prefijo cíclico de 1/16.

Parámetros	Especificación	Observación
Rango de Frecuencia	54-862 MHz	
Ancho de Banda de Canal	6, 7 u 8 MHz	
Velocidad de transferencia	4,54 a 22,69 Mbps	Ver tabla 2.7
Eficiencia Espectral	0,76 a 3,78 bit/(s*Hz)	Ver tabla 2.7
Esquemas de Modulación	QPSK, 16-QAM y 64 QAM	
PIRE	Máximo 4 Vatios tanto para los CPEs como para la BS.	Puede variar de acuerdo a la regulación.
Técnica de Acceso Múltiple	OFDMA	
Tamaño del FFT	2048	



Modos del Prefijo Cíclico	1/4, 1/8, 1/16, 1/32
Duplexación	TDD

Tabla 2.6 Parámetros de un Sistema WRAN.

Modo PHY	Modulación	Tasa de Codificación	Velocidad de Transferencia (Mbps)	Eficiencia Espectral (para un canal de 6 MHz) (bps/Hz)
1	BPSK	Sin Codificación		
2	QPSK	1/2 Repetición: 4		
3	QPSK	1/2 Repetición: 3		
4	QPSK	1/2 Repetición: 2		
5	QPSK	1/2	4,54	0,76
6	QPSK	2/3	6,05	1,01
7	QPSK	3/4	6,81	1,13
8	QPSK	5/6	7,56	1,26
9	16-QAM	1/2	9,08	1,51
10	16-QAM	2/3	12,10	2,02
11	16-QAM	3/4	13,61	2,27
12	16-QAM	5/6	15,13	2,52
13	64-QAM	1/2	13,61	2,27
14	64-QAM	2/3	18,15	3,03
15	64-QAM	3/4	20,42	3,40
16	64-QAM	5/6	22,69	3,78

Tabla 2.7 Modos PHY para un Canal de 6 MHz.

Nota: el modo 1 sólo se utiliza para ráfagas de tráfico para el Acceso Múltiple por División de Código (CDMA, *Code División Múltiple Access*); el modo 2 sólo se utiliza en paquetes de transmisión de Control de Encabezado de Súper-trama (SCH, *Superframe Control Header*); el modo 3 sólo se utiliza para transmisión el Protocolo Basado en Contención (CBP, *Contention-Based Protocol*) y el modo 4 sólo es utilizado para transmisión del Encabezado de Control de la Trama (FCH, *Frame Control Header*). En estos cuatro modos no se especifica la tasa de datos ni la eficiencia espectral, ya que funcionan como modos dedicados al control de la transmisión [11].

La asignación de recursos se hace en términos de sub-portadoras y símbolos. Un canal está definido como un arreglo de 28 sub-portadoras contiguas y hay 60 sub-portadoras por símbolo para un total de 1680 sub-portadoras de las cuales 240 son sub-portadoras piloto.

2.4.3 Capa MAC

La capa MAC se centra en las características de CR para asegurar el funcionamiento con otros sistemas en las mismas bandas de frecuencia, auto-coexistencia con otros sistemas



WRAN y QoS. De esa forma, posee dos arreglos de trama para los dos modos de transmisión: normal y con auto-coexistencia.

En el modo normal, si existe una sola celda o varias celdas que transmitan en el mismo canal, se organizan todas las tramas en una súper-trama. Para el caso de auto-coexistencia, las tramas se organizan de manera independiente de acuerdo al canal en el que WRAN esté transmitiendo [11].

La duración de una súper trama es de 160 ms y se conforma a partir de 16 tramas, cada una con una duración de 10 ms, como lo muestra la figura 2.15.

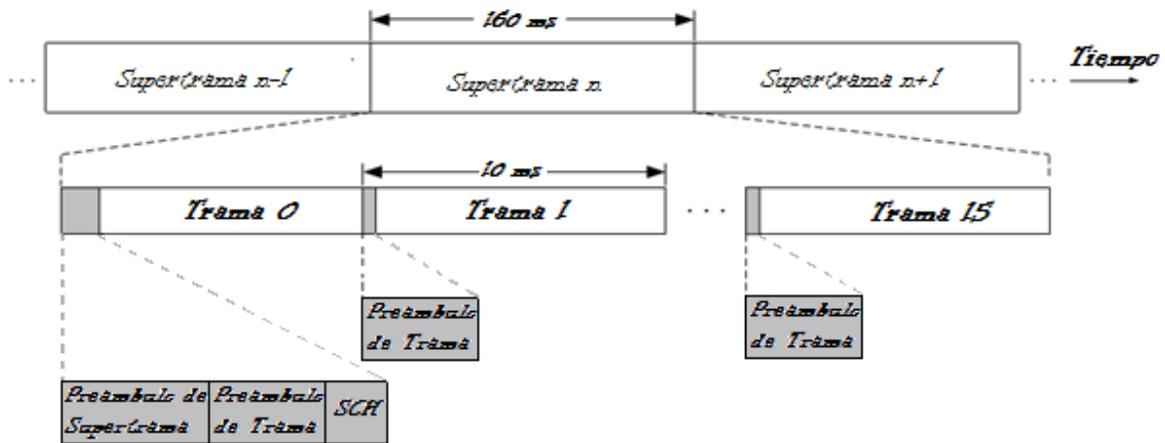


Figura 2.15 Estructura de una Super-trama WRAN.

Cada súper-trama se compone de 16 tramas (numeradas de la 0 a la 15), las cuales tienen una estructura que se puede dividir en 3 partes: una sub-trama para el enlace de bajada, una sub-trama para el enlace de subida y una ventana de auto-coexistencia. La figura 2.16 muestra la estructura de la trama.

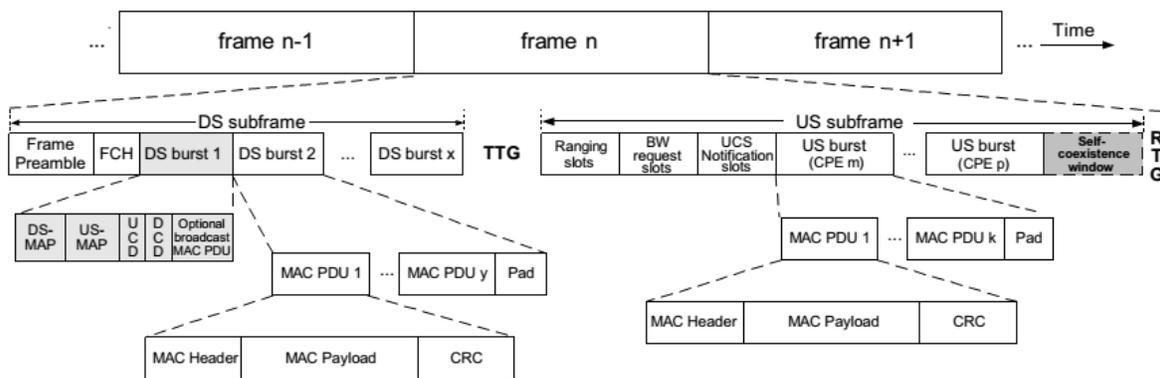


Figura 2.16 Estructura de una Trama WRAN.

En la trama WRAN, sobresalen varios campos: el primero de ellos, es el Preámbulo de la Trama que permite indicar el inicio de la trama. Posteriormente, está el FCH que se encarga de dar los tiempos de duración de las ráfagas de datos y otros datos importantes en el control de la trama y finalmente, la ráfaga de enlace de bajada (*DS burst 1*), la cual



contiene dos campos importantes: DS-MAP y US-MAP que son una especie de cartas de navegación que indican la posición de las ráfagas de datos en el resto de la trama.

La tabla 2.8 muestra el número de símbolos transmitidos por trama para los 4 prefijos cíclicos que se maneja en WRAN, para cada uno de los posibles canales de implementación [11].

Prefijo cíclico	Numero de símbolos por trama		
	6 MHz	7 MHz	8 MHz
1/4	24		
		28	
			32
1/8	26		
		33	
			36
1/16	28		
		33	
			38
1/32	29		
		34	
			39

Tabla 2.8 Número de Símbolos por Trama de Acuerdo con el CP y el Ancho de Banda del Canal.

El estándar define la capa MAC como orientada a conexión y centralizada. El acceso al medio es controlado por la BS que utiliza OFDMA y asigna recursos utilizando el esquema DAMA.

2.4.3.1 Características MAC

A continuación se presentan las características de la capa MAC de IEEE 802.22:

- Soporta *unicast*, *multicast* y *broadcast*.
- Funcionalidad cognitiva: permite la adaptación autónoma de las características de radio, dependiendo de las condiciones en tiempo real del ambiente radio.
- Programación dinámica y adaptativa de Periodos de Silencio (QP, *Quiet Period*) para permitir al sistema ajustar los requerimientos de QoS de acuerdo a las necesidades, además de tener tiempos de escucha para mejorar la función de *sensing* del espectro. El rango de QP va de 1 símbolo a una súper trama.
- Los suscriptores pueden informar a la BS de la presencia de dispositivos o sistemas funcionando en el mismo rango de frecuencias de diferentes maneras: Dedicado o Situación Urgente de Coexistencia (UCS, *Urgent Co-existence Situation*) o a través de mensajes MAC de baja prioridad.
- La BS puede pedirle a uno o más suscriptores un cambio de canal mediante dos formas: FCH o mensajes MAC dedicados.



2.5 Planeación de la Red

En esta sección se describen las características técnicas y estadísticas que deben considerarse para el cálculo de cobertura del sistema WRAN, así como las consideraciones para escoger su ubicación [18].

2.5.1 Cobertura

El modelo a utilizar debe tener ciertas características específicas que permitan realizar la predicción de la cobertura de un sistema WRAN. Dicho modelo, deberá tener como mínimo los siguientes componentes [24]:

- Modelo de predicción punto a punto.
- Tasas de protección deseada e indeseada para las distintas relaciones entre canales.
- Características de los patrones de radiación de la antena.
- Características del terreno.
- Efectos atmosféricos.
- Desvanecimiento.
- Datos de población del censo más reciente.
- Estadísticas.
- Disponibilidad de tiempo y lugar para IEEE 802.22.

2.5.1.1 Modelo de Predicción Punto a Punto

El modelo de predicción punto a punto determina la pérdida del nivel de potencia entre el lugar donde se ubica el transmisor y el lugar donde se ubica el receptor, tomando en cuenta para ello, las obstrucciones y los efectos atmosféricos del trayecto de propagación, con el fin de representar el comportamiento del enlace con base en las pérdidas que se predicen.

Es necesario también calcular las pérdidas que se presentan en el enlace recíproco, ya que, a pesar de que el trayecto suele ser el mismo, hay variantes como la potencia de transmisión dando lugar así, a cambios en las pérdidas en el enlace de bajada y en el enlace de subida.

2.5.1.2 Tasas de Protección Deseada e Indeseada

Estas tasas representan la diferencia de campos eléctricos que debe existir para que una señal no se considere interferente, esta tasa se representa como la señal deseada sobre la señal no deseada: D/U (*Desired to Undesired Ratio*).

Generalmente estas tasas se definen para relaciones de canales adyacentes y co-canales, cuando esta tasa sea menor que lo indicado por la regulación el canal se desocupa. Se toma la regulación de la FCC como referencia, la tasa de protección es de 23 dB [25].



2.5.1.3 Características de los Patrones de Radiación de la Antena

Se deben conocer las características de las antenas, para utilizar los patrones de radiación en configuración del modelo de propagación del sistema. Se debe tener en cuenta los patrones de radiación de las antenas tanto de transmisión y recepción en la BS y los CPEs. Entre los datos relevantes, está el patrón acimutal importante representado en grados que van de 0 a 359. El grado de elevación que va de -90 a 90 grados. Se debe tener en cuenta también todo tipo de rotación, así como cualquier tipo de inclinación. Hay que tener la mayor cantidad posible de datos de las antenas ya que esto permite una planeación idónea [18].

Los CPEs deben tener como característica una antena direccional cuyo lóbulo de radiación principal está en dirección del transmisor de la señal deseada.

Según las recomendaciones del WG 802.22, se debe utilizar una antena omnidireccional en la BS y una direccional en el CPE. En el caso de la BS, se utilizaría una antena omnidireccional con una ganancia de 8 dBi. En el receptor se utilizaría una antena *corner* para VHF con la ganancia de 11 dBi.

2.5.1.4 Datos del Terreno

Los datos del terreno son de especial importancia en sistemas montañosos y/o de gran altura, como se da en muchos lugares del departamento del Cauca. Estos datos son esenciales para los cálculos de cobertura y la predicción del comportamiento del enlace.

También, se deben tener en cuenta las condiciones climáticas del terreno, ya que de acuerdo a esto, se presentan factores que afectan el enlace: conductividad y permitividad; en el caso del Cauca, se considera el terreno como continental templado.

Es importante tener en cuenta todo tipo de irregularidades en el terreno que pueden convertirse en obstáculos para la propagación de la señal deseada: árboles, edificios, montañas, etc. Para evitar la atenuación de esta señal, lo recomendado es calcular la altura de la antena con el objetivo de minimizar los efectos de estas irregularidades del terreno así como el radio efectivo de la tierra.

2.5.1.5 Efectos Atmosféricos

El modelo de predicción debe tener en cuenta la refractividad en la superficie así como la dispersión troposférica que se presente, en caso de que el enlace (que se considera punto a punto) esté más allá de la línea de vista.

No se consideran efectos de las estaciones climáticas debido a la posición geográfica de Colombia.

2.5.1.6 Desvanecimiento

El modelo de predicción debe permitir ajustar las pérdidas que se producen por los efectos del desvanecimiento manifestado como la atenuación de la potencia en grandes



áreas; teniendo en cuenta la longitud de trayectoria, la altura de las antenas, las frecuencias de operación y el porcentaje de disponibilidad deseada.

2.5.1.7 Datos de Población del Censo más Reciente

Se toma el último censo de población realizado (el censo general en Colombia, se llevó a cabo en 2005), con el fin de que los resultados del modelo de propagación se puedan confrontar con la población a quien se va a brindar el servicio o a quien se pudiera interferir.

El Resguardo Indígena de Puracé cuenta con una población de 4200 personas que conforman aproximadamente 1100 familias, dando una densidad de población de 3.8 personas por familia [26].

2.5.1.8 Estadísticas

Para realizar un análisis de predicción de cobertura se tiene en cuenta [18]:

- Las simulaciones basadas en IEEE 802.22 deben utilizar entre el 90% y 10% de disponibilidad de tiempo como valores deseado e indeseado respectivamente para la comunicación bidireccional de los suscriptores WRAN y además, el 50% de disponibilidad de los lugares atendidos.

2.5.1.9 Disponibilidad de Tiempo y Lugar para IEEE 802.22

El sistema se debe diseñar para una disponibilidad máxima. La periferia a cubrir debe dividirse en áreas pequeñas de 500m x 500m. Al menos el 50% de estas áreas pequeñas debe tener como mínimo, un nivel de recepción aceptable el 99,9% del tiempo¹⁸.

A demás, los sistemas de televisión deben ser protegidos de interferencia.

2.6 Selección del Lugar de Despliegue

En esta sección se describen los parámetros a tener en cuenta con el objetivo de encontrar la mejor locación para ubicar la BS y hacer un correcto despliegue del sistema.

2.6.1 Recomendaciones de Distancia

2.6.1.1 Contornos de Protección de Estación de Televisión

Se deben determinar los canales de televisión disponibles para el despliegue del servicio WRAN. En caso de no tener una base de datos donde se especifique los canales y las

¹⁸ Para efectos de simulación, el estándar IEEE 802.22 recomienda utilizar entre el 90% y 99,9% como disponibilidad de tiempo como valor deseado. Para efectos reales, tendría que utilizarse el 99,9% como disponibilidad de tiempo deseada.



potencias permitidas en la zona, se debe buscar la máxima información de los canales de televisión con el fin de garantizar que se protejan estos de la posible interferencia causada por el sistema WRAN.

La televisión abierta en la banda VHF para el Cauca, tiene desplegados 5 canales nacionales y un canal regional, siendo estos: RCN (en el canal 2), Señal Institucional (en el canal 4), Señal Colombia (en el canal 5), Telepacífico (canal regional, en el canal 8), Canal Uno (en el canal 10) y Caracol TV (en el canal 12).

2.6.1.2 Recolección de Datos

Se toman los datos correspondientes al terreno en donde se propagará la radio frecuencia: la altura de los lugares de ubicación de las antenas, las variaciones de terreno, el clima, etc. Estos datos, generalmente van incluidos en los Sistemas de Información Geográfica y en las bases de datos geográficas que se encuentran en los sitios web de la Agencia Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA, *National Aeronautics and Space Administration*), el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, etc.

2.6.1.3 Modelo de Predicción

Los datos recolectados deben usarse en el modelo de predicción y en herramientas de simulación tal como se describe en la sección 2.5

2.7 Consideraciones de Interferencia

En esta sección se describen las características de interferencia con los distintos sistemas incumbentes.

2.7.1 Interferencia con Sistemas de Televisión Y Televisión Digital

Las bandas en las que funciona WRAN están dadas para los sistemas existentes de televisión. Es por esto que un sistema IEEE 802.22 no genera interferencia ni perjudica estos sistemas existentes.

Se deben conocer los detalles en cuanto a regulación de espectro y potencia en las bandas en las que se pretenda operar.

2.7.1.1 Separación entre el CPE y la Antena de Televisión

Dependiendo de las relación de canales posibles entre los utilizados por televisión y los utilizados por WRAN, se debe guardar una distancia del orden de los metros entre las antenas receptoras de cada sistema. Esta separación, depende en buena medida, de la polarización que esté utilizando cada antena.



2.7.2 Interferencia de Servicios Incumbentes

Se debe garantizar que no haya interferencia co-canal con sistemas de baja potencia.

2.7.3 Expansión de la Red

2.7.3.1 Ubicación Potencial de CPEs

Partiendo de la base de datos de la televisión y potencias contempladas en la legislación, se pueden definir nuevos lugares para la instalación de CPEs con el fin de expandir la red. Deberá revisarse la información de canales disponibles y así definir locaciones candidatas para instalar los correspondientes CPEs.

2.7.3.2 Recolección de Datos de Propagación de RF

Las estaciones base están en constante monitoreo de los datos de referencia de su zona de cobertura. Sin embargo, es importante tener en cuenta otros factores, como las facilidades de instalación: costos de terrenos, electricidad, falta de estructuras para antenas e incluso, falta de clientes en la zona.

2.7.3.3 Determinación de Distancias de Guarda

Se debe considerar la información recolectada en las secciones 2.6.1.3 y en 2.7.3.2 así como la información existente en los actuales CPEs para correcta ubicación y el mantenimiento de distancias de guarda que garanticen el no daño por interferencia.

2.8 Front End de RF

El *front end* se construye para permitir la recepción de diferentes canales para sistemas WRAN a la vez que se realice la función de *sensing*.

2.9 Medida del Retardo Residual

Se deben utilizar CPEs cuyo retardo haya sido medido por el fabricante con una precisión de al menos 30 ns.



3. DETERMINACIÓN MEDIANTE SIMULACIÓN DE LA COBERTURA PARA LA ZONA RURAL OBJETO

En el sistema de CR, se debe considerar el canal con el cual se va a transmitir según la legislación nacional, la potencia de la estación base (máxima permitida), los sistemas incumbentes en la zona, la disponibilidad de información geográfica de la zona y los canales disponibles. El objetivo primario, por ende, se convierte en utilizar de manera correcta los canales para que no afecte a los sistemas que funcionan bajo licencia, tales como la televisión analógica abierta, la DTV en caso de existir, e incluso, sistemas de baja potencia que pueden haber en la zona, como micrófonos inalámbricos y otros dispositivos similares.

Radio cognitiva, a pesar de utilizar varias funcionalidades (*spectrum sensing, channel classification, etc.*) orientadas precisamente a no interferir con otros sistemas, requiere de una correcta planeación del enlace y la utilización de los canales, de manera que permita una decisión dinámica dependiendo de las condiciones del ambiente de radio.

En el proceso de diseño, es de vital importancia tener en cuenta todas estas variables, así como también, los factores que inciden en la propagación de la señal de RF teniendo en cuenta condiciones no ideales.

3.1 Estudio de Cobertura

El estudio de la cobertura determina la cantidad, configuración y ubicación óptima de los puntos de acceso (CPE's) para proporcionar la cobertura de radiofrecuencia en la zona rural objeto, siendo un procedimiento determinante a la hora de realizar el diseño y la planificación de una red de radiocomunicaciones en cualquier proyecto.

Las ventajas de este estudio de cobertura serán:

- Predicciones radioeléctricas precisas.
- Lograr una mejor predicción del espectro, planificación, diseño y optimización de redes y servicios inalámbricos.
- Es sencillo y económico.
- Permite un gran ahorro de tiempo.

El estudio de cobertura permite la implementación de una red inalámbrica, en donde se define claramente el propósito y beneficios del estándar IEEE 802.22.

Con este estudio se evalúa las cuatro grandes áreas a considerar para el diseño, teniendo en cuenta también las posibilidades que existen para que el diseño permita una expansión futura de acuerdo a las necesidades:

- Alcance y cobertura.
- Datos y velocidad de transferencia.
- Inmunidad a Interferencia.
- Requerimientos de Conectividad y Energía.



3.1.1 Descripción Breve del Estudio de Cobertura que se Realizará

El estudio de la cobertura se realizará para el Resguardo Indígena del Puracé.

- Cubrir el área del Resguardo Indígena de Puracé correspondiente a 139.84 km² en donde se encuentra concentrada la población.

Esta es el área que abarca el Resguardo Indígena del Puracé, además de la mayoría de sus cabildos.

- Obtener información geográfica de la zona.

Es importante tener clara la zona donde se llevará a cabo el estudio, para poder realizar mejores predicciones.

- Implementar todos los suscriptores de la zona y definir sus características.

Se delimitó la cantidad de suscriptores, que tipo de receptores y cuáles serán las alturas de las antenas.

- Analizar el modelo de propagación.

Se consideran las especificaciones del modelo y sus características.

- Configuración de la red inalámbrica según la tecnología IEEE 802.22.

Se fijan características importantes como frecuencia de trabajo, ganancias, pérdidas potencia de transmisión entre otros.

- Generaciones de las predicciones.

Se realizará un análisis de los resultados de la simulación.

3.2 Modelo de Propagación de Longley-Rice

El modelo de propagación de Longley-Rice es un modelo semi-empírico que funciona para grandes distancias y para frecuencias que van desde los 0,002 GHz hasta los 20 GHz. Es un modelo que tiene en cuenta, las características de propagación terrestre tales como la refractividad, la conductividad y la permitividad. Funciona para zonas rurales y en condiciones de LOS y NLOS. El modelo de Longley-Rice utiliza los siguientes parámetros:

- Distancia entre transmisor y receptor.
- Altura de las antenas transmisora y receptora.
- Numero de onda o factor K.
- Características del terreno.
- Refractividad mínima mensual media.
- Curvatura efectiva de la tierra.
- Transimpedancia del suelo.
- Tipo de clima de la zona de propagación.



De acuerdo con las consideraciones que plantea el estándar IEEE 802.22 (ver capítulo 2), el modelo de Longley-Rice cumple con los requerimientos para la planeación del enlace.

3.2 Cálculo de Emplazamientos

El objetivo de la red, es abarcar zona rural del departamento del Cauca, con especial enfoque en brindar cobertura al Resguardo Indígena de Puracé.

El Resguardo Indígena de Puracé, consta de un área de 13.984 hectáreas (139,84 Km²) y se ubica aproximadamente a 18 Km de la ciudad de Popayán. Cuenta con una población aproximada de 4.200 personas, en su mayoría indígenas y con una minoría campesina con una tasa de 3,8 personas por familia. La densidad poblacional de la zona es de aproximadamente 30 personas por Km², lo que permite inferir que WRAN es una solución que satisface una baja densidad poblacional en un área rural de dimensiones considerables, ya que otras tecnologías pueden brindar mejores velocidades de transmisión de datos, sin embargo, su despliegue implica un desgaste tanto económico como técnico debido a la complejidad, el uso de las bandas de frecuencias, los costos de instalación y la relación costo/beneficio no resulta atractiva. WRAN por el contrario, permite el despliegue de redes relativamente económicas, con bajos tiempos de planeación y pocos requerimientos de ingeniería [8] [23].

Con base en los valores típicos de la literatura, se considera lo siguiente:

- El canal a utilizar, de acuerdo con la legislación nacional, es de 6 MHz.
- La eficiencia espectral varía entre 0,5 bps/Hz hasta los 5 bps/Hz, siendo el valor típico el de 3 bps/Hz.
- Tomando en cuenta los valores típicos de 6 MHz para el ancho de banda del canal, y la eficiencia espectral de 3 bps/Hz, daría como resultado, la velocidad de transferencia típica del sistema de 18 Mbps para el DL.
- El estándar propone que las velocidades típicas para los usuarios deben ser de 1.5 Mbps en el DL y de 384 Kbps en el UL.
- Siguiendo la ecuación 3.1 donde se relaciona la velocidad de transferencia de un CPE con la velocidad de transferencia del sistema, se obtiene:

$$\frac{\text{Velocidad de transferencia del Sistema}}{\text{Capacidad del CPE}} = \frac{18 \text{ Mbps}}{1,5 \text{ Mbps/CPE}} = 12 \text{ CPEs} \quad (3.1)$$

- Se pueden distribuir 12 CPEs por BS, partiendo de los valores típicos de WRAN.

3.3 Ubicación de Emplazamientos

Con el objetivo de atender a la población ubicada en el Resguardo Indígena de Puracé, la metodología usada fue de tipo descriptiva y no experimental. Se obtienen los datos geográficos del municipio de Puracé y concretamente de la ubicación y distribución poblacional del Resguardo Indígena. La figura 3.4 muestra la ubicación del resguardo indígena de Puracé:

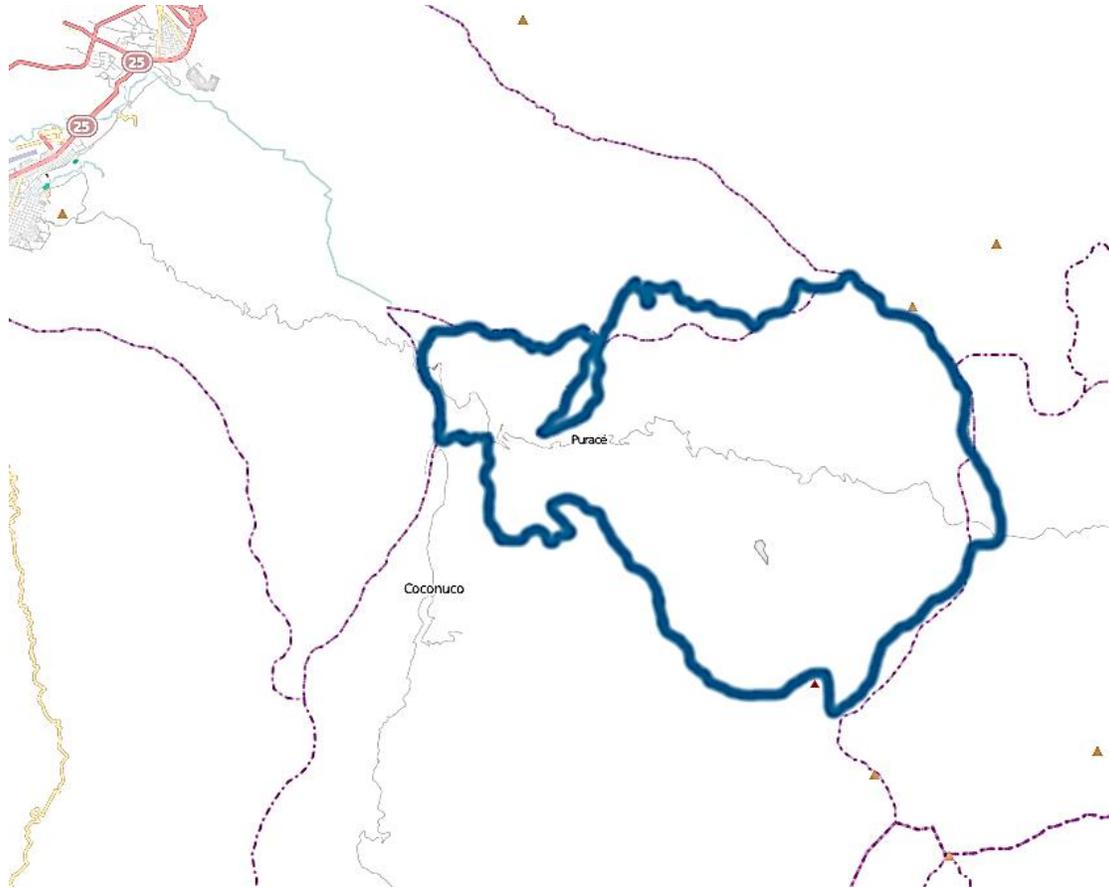


Figura 3.1 Mapa del Resguardo Indígena de Puracé.

Teniendo en cuenta que la topología de la red es PMP con la BS como maestro y los CPEs como esclavos, se diseñó un modelo de cobertura, que tiene como finalidad dar alcance y disposición de la tecnología de banda ancha a los distintos CPEs en el Resguardo.

Teniendo en cuenta esto, y ubicando las áreas de interés circundantes, se determinó cuáles fueron las mejores ubicaciones de la BS y los CPE's mediante un perfil topográfico.

Utilizando información de posicionamiento global, se logró determinar que posiciones eran factibles para la ubicación de la BS, considerando las siguientes variables:

- Acceso físico (carreteras, brechas, veredas, etc)
- Energía eléctrica
- Distancia a cubrir
- Acceso a Internet

Se analizan las condiciones de instalación y se consideran varios puntos para la instalación de la BS:

- **Cabecera Municipal de Puracé:** Coconuco está ubicado en una depresión, en medio de una zona montañosa lo que lo constituye en un lugar poco adecuado para la ubicación de una antena transmisora.



- **Munchique:** cerro de Munchique, cuenta con una altura de 3101 msnm y es el lugar de transmisión por excelencia para muchos de los municipios del Cauca. Este sitio requeriría de una antena direccional que apunte directamente a la zona del Resguardo Indígena de Puracé. Por otro lado, la distancia aproximada es de 80 Km del municipio de Puracé y, a pesar de que el estándar permite áreas de cobertura de hasta 100 Km, las limitaciones de potencia (4 *Vatios* en PIRE), hacen que las áreas abarcadas no sean tan grandes.
- **Cabildo de Puracé:** es el sitio administrativo y político por excelencia del resguardo indígena de Puracé, está ubicado a 2785 msnm.
- **Zona Montañosa del Municipio:** al estar ubicado en una zona de mucha accidentalidad geográfica, el *Resguardo Indígena del Puracé* (RIP) presenta diferentes altitudes que dificultan lograr la cobertura si ésta no se hace desde un punto con suficiente altura. Se considera entonces, ubicar la estación base en un lugar alto del municipio en el cual se cuente con electricidad y teniendo en cuenta la futura implementación de la red nacional de fibra óptica, que a través de la resolución 002 del 2011, asignó a Azteca Comunicaciones la conectividad para 753 municipios, entre los cuales está Puracé, que brindará acceso a internet de alta velocidad a todos los municipios del país, que, en este caso, tendrá epicentro en la cabecera municipal, cercana a la Zona Montañosa del Municipio.

La tabla 3.1 muestra una tabla comparativa de las características de los puntos considerados para la estación base.

Características	Coconuco	Munchique	Cabildo	Zona Montañosa
Altura (msnm)	2360	3101	2785	3020,6
Distancia al RIP ¹⁹ (Km)	7,12	80	1,19	2,97
Distancia al punto de conectividad a Internet (Km)	8,8	78,8	0	3,54

Tabla 3.1 Características de los posibles puntos de localización de la BS.

La altura promedio del municipio de Puracé, es de 2800 msnm, por lo cual, se descarta la opción de ubicar la BS en Coconuco y en el cabildo de Puracé, debido a su accidentalidad geográfica, poca cobertura y carencia de línea de vista con las principales zonas de gran densidad poblacional. Teniendo en cuenta la gran distancia que existe entre el cerro de Munchique y el RIP, se descarta este lugar por los altos requerimientos de potencia que implicaría establecer la BS en esa ubicación; por lo tanto, se decide ubicar la BS en las coordenadas: 2,355941 de latitud Norte y -76,46269 de longitud Oeste, cerca de algunas viviendas dentro del Resguardo Indígena de Puracé donde se cuenta con electricidad, acceso a carretera y la cercanía a conectividad de Internet.

La ubicación de los CPEs se escogen de acuerdo a los núcleos poblacionales más densos del Resguardo Indígena de Puracé como se muestran en la figura 3.1, y teniendo

¹⁹ La distancia se mide desde el lugar de mayor densidad poblacional del Resguardo Indígena de Puracé hasta las coordenadas de las ubicaciones de las posibles BS.



en cuenta también, la Mina de Azufre Natural “El Vinagre” que es un punto crucial en la economía de esta población.

La estación base y los CPEs se ubican en las coordenadas como lo indica la tabla 3.2.

Componente	Latitud	Longitud	Distancia a la BS (Km)
BS	2,355941	-76,46269	0
CPE1	2,368992	-76,46407	1,46
CPE2	2,359248	-76,43748	2,82
CPE3	2,638499	-76,47997	2,37
CPE4	2,373591	-76,50704	5,30
CPE5	2,363482	-76,41618	5,23
CPE6	2,377944	-76,41953	5,38
CPE7	2,35243	-76,4536	1,08
CPE8	2,366923	-76,45565	1,45
CPE9	2,360806	-76,44358	2,19
CPE10	2,342627	-76,45004	2,04
CPE11	2,371988	-76,4322	3,83
CPE 12	2,334819	-76,4197	5,32

Tabla 3.2 Coordenadas Geográficas de los Componentes de la Red.

Después de esto, se toman imágenes satelitales mediante GoggleMaps que permitieron visualizar los sitios y casonas principales, con la finalidad de tener una idea del área a cubrir y su distribución; la BS se muestra en la figura 3.2 y las figuras 3.3 a 3.14 muestran la ubicación de los CPEs.

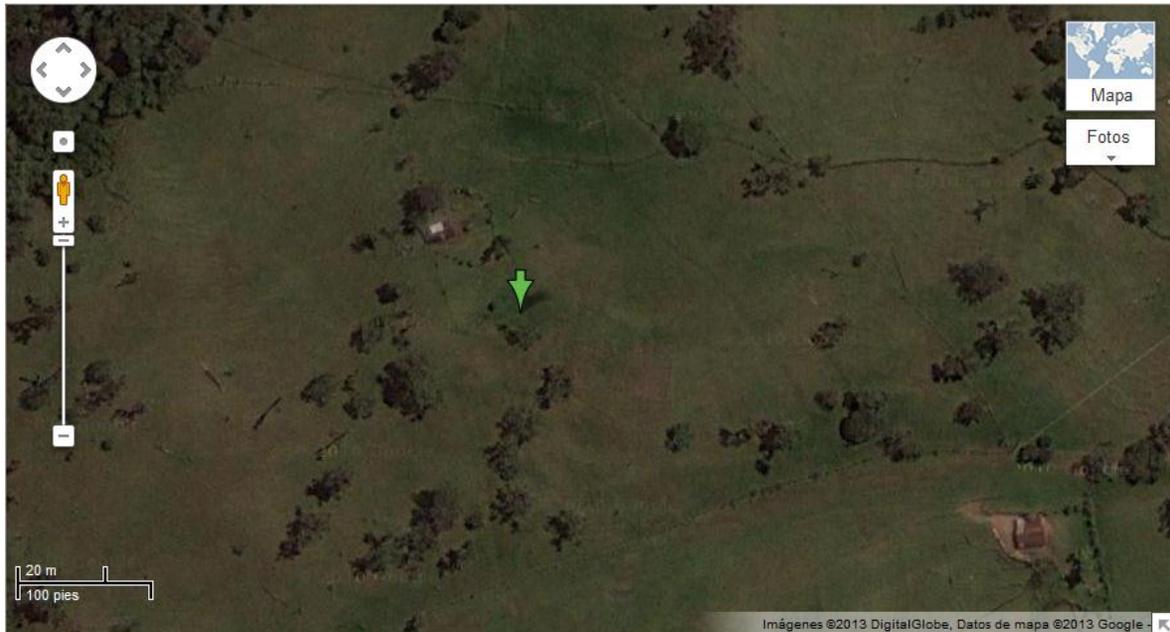


Figura 3.2 Vista Satelital de la Ubicación de la BS.

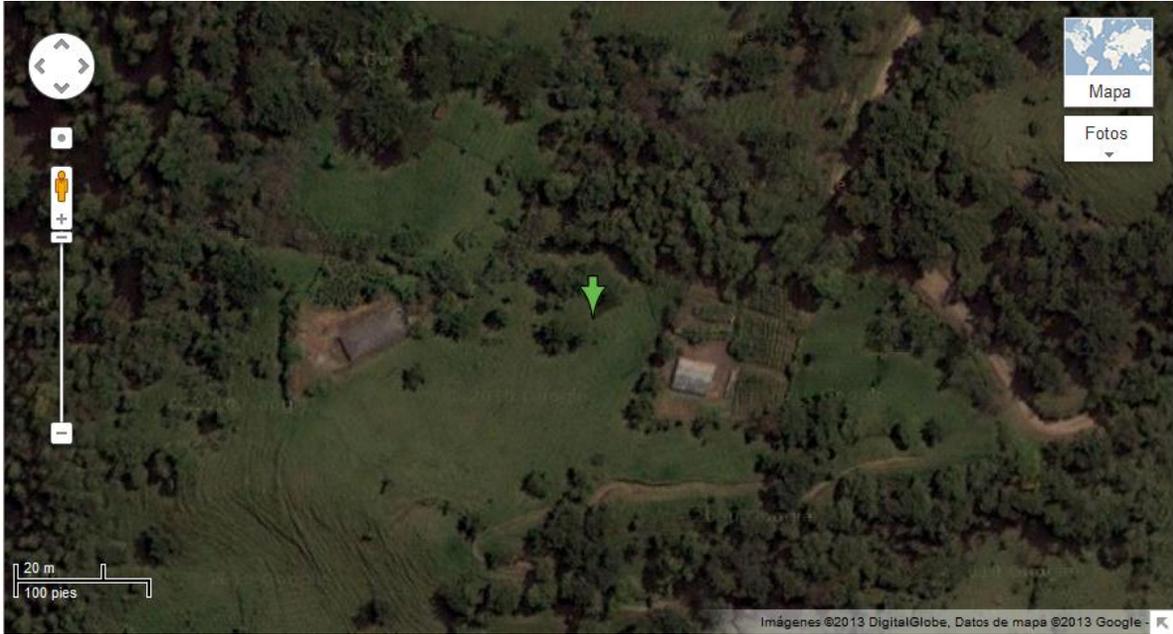


Figura 3.3 Vista Satelital de la Ubicación del CPE1.



Figura 3.4 Vista Satelital de la Ubicación del CPE2.



Figura 3.5 Vista Satelital de la Ubicación del CPE3.

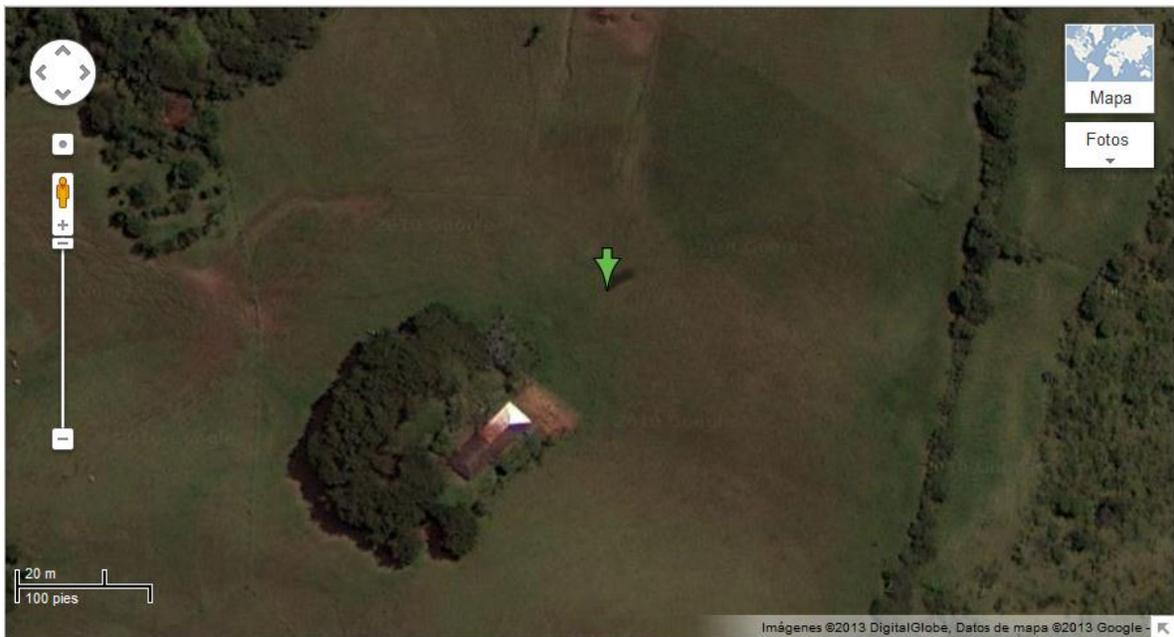


Figura 3.6 Vista Satelital de la Ubicación del CPE4.



Figura 3.7 Vista Satelital de la Ubicación del CPE5.



Figura 3.8 Vista Satelital de la Ubicación del CPE6.



Figura 3.9 Vista Satelital de la Ubicación del CPE7.



Figura 3.10 Vista Satelital de la Ubicación del CPE8.

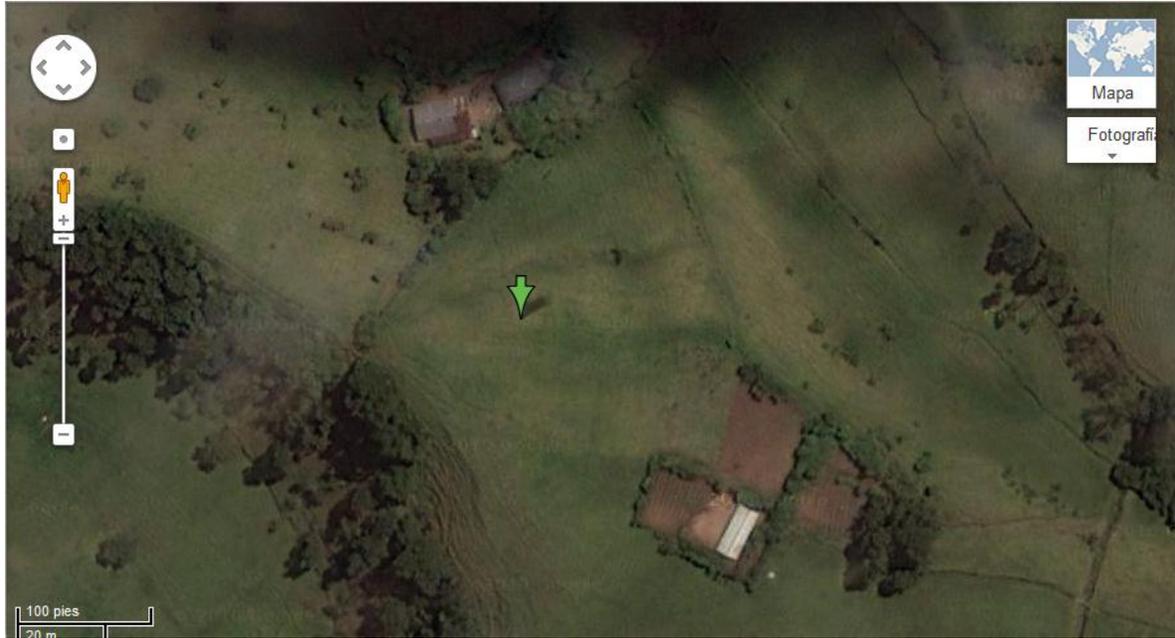


Figura 3.11 Vista Satelital de la Ubicación del CPE9.

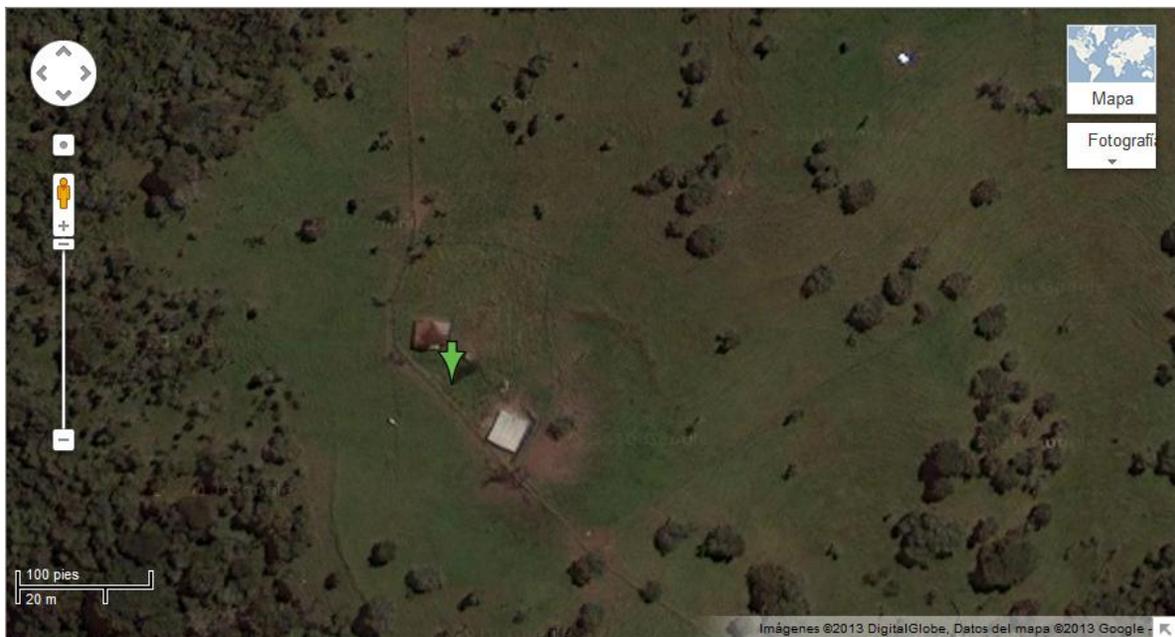


Figura 3.12 Vista Satelital de la Ubicación del CPE10.



Figura 3.13 Vista Satelital de la Ubicación del CPE11.



Figura 3.14 Vista Satelital de la Ubicación del CPE12.

3.4 Software de Simulación

Haciendo uso de la información contenida en el grupo de trabajo WG 802.22 del IEEE, y, de acuerdo con la sección 2.5.1, donde se tiene en cuenta las características con las que debe planear la red, se plantean unas características para la escogencia de una herramienta:



- Uso de parámetros geográficos de Colombia.
- Configuración de los parámetros de propagación.
- Configuración de los parámetros de los transmisores.
- Configuración de los parámetros de los receptores.
- Disponibilidad y acceso a la herramienta.
- Familiaridad previa del implementador.
- Usabilidad de la herramienta.
- Software libre.

3.4.1 Herramientas

En vista de la gran existencia de software orientado a las telecomunicaciones y específicamente a la simulación de cobertura o de planeación de sistemas de radio frecuencia, las herramientas analizadas fueron:

3.4.1.1 SPLAT!

SPLAT! es una herramienta de telecomunicaciones para realizar cálculos de radioenlaces y predicciones de áreas de cobertura desde la consola Shell de GNU/Linux utilizando el modelo de propagación de Longley-Rice, permite personalizar la herramienta y los parámetros de acuerdo con las exigencias de los usuarios y de la red teniendo en cuenta el marco regulatorio de cada país, a pesar de verse como un herramienta muy poderosa es compleja puesto que no cuenta con un familiarización adecuada de la consola GNU/Linux ®.

SPLAT! cuenta con una interfaz gráfica llamada SPLAT-GUI que permite y facilita al usuario la configuración de la red mediante un entorno amigable, en este entorno se puede configurar las variables y parámetros necesarios de transmisión, para posteriormente realizar los cálculos de telecomunicaciones (radioenlaces y cobertura) sin tener que preocuparse por la interacción con la consola da GNU/Linux ®. SPLAT-GUI está desarrollada con PHP aprovechando su capacidad de ejecutar instrucciones de línea de comando detrás del código PHP, permitiendo la interacción de la aplicación ya sea en la misma máquina del servidor o de cualquier otra que este en la misma red. Para acceder a esta interfaz gráfica, el cliente debe contar con el navegador web Mozilla Firefox ®.

3.4.1.2 LigoWave

LigoWave es un software libre que admite uso académico de algunas de sus funciones. Permite la simulación de varios tipos de redes inalámbricas, accediendo a funciones de capacidad del sistema utilizando el modelo de propagación Longley-Rice. Fue desarrollada como una solución inalámbrica versátil utilizada por proveedores de servicios de internet y telecomunicaciones.

LigoWave utiliza una interfaz web para calcular el rendimiento de un enlace PTP teniendo en cuenta la información geográfica, la distancia entre las unidades, altura de la antena, ganancia de la antena y potencia de transmisión.



3.4.1.3 Radio Mobile

Radio Mobile es un software de distribución gratuita que se orienta a la simulación de sistemas de radio frecuencia utilizando para ello, el modelo de propagación de Longley-Rice (ver la sección 2.1.1), el cual, acorde a las características dadas por el WG 802.22 del IEEE, es el ideal para la planeación de cobertura de una red WRAN. Es un software, en términos comparativos, poco potente respecto a sistemas similares (pero licenciados) tales como Atoll, sin embargo, da unos resultados aceptables para uso académico y cuenta con gran variedad de mapas e información geográfica, de distintas bases de datos o bancos.

3.4.2 Comparación de las Herramientas

Teniendo en cuenta las características deseadas, la tabla 3.3 presenta la comparación entre las 3 herramientas consideradas para determinar la más óptima.

CARACTERÍSTICA	SPLAT!	LigoWave	Radio Mobile
Parámetros geográficos de Colombia	3	5	5
Configuración de parámetros de propagación	5	2	5
Configuración de parámetros de transmisores	5	4	5
Configuración de parámetros de receptores	2	3	5
Valoración	15	14	20

Tabla 3.3 Comparación de las Herramientas Software de Simulación.

La herramienta que cuenta con las características deseadas es Radio Mobile, que, además, es una herramienta conocida por los implementadores, lo que le suma favorabilidad en cuanto a particularidades subjetivas.

Cabe resaltar, además, que de acuerdo con lo estudiado en el capítulo I y lo expuesto en el apartado 2.1, el modelo de propagación de Longley-Rice es el requerido por el WG 802.22 para el diseño de un sistema WRAN.

Para tener en cuenta, Radio Mobile, además, posee un sistema muy completo de cartografía que permite la utilización de diversos mapas. También se necesitan datos de elevación del terreno para ubicar las estaciones de transmisión y recepción teniendo en cuenta el relieve del terreno a cubrir.

Teniendo el rango de frecuencias de IEEE 802.22 (desde los 54 hasta los 862 MHz) y la literatura del WG 802.22, una resolución de mapas de 90m aceptable para el ejercicio de simulación.

Para Colombia, Radio Mobile ofrece una resolución de 3 segundos de arco con la utilización del sistema de Misión Topográfica de Radar a Bordo del Transbordador (STRM, *Shuttle Radar Topography Mission*) de la NASA, la cual da una resolución alrededor de los 90 m [19].



3.5 Montaje de la Red en Radio Mobile

La simulación es una técnica que permite predecir el comportamiento de una red. Además, facilita la posibilidad de probar diferentes configuraciones y cambios para mostrar los comportamientos que pudiera presentar la red ante las distintas condiciones del ambiente de radio frecuencia.

Radio Mobile integra unos cuadros de diálogo donde, a nivel de usuario, se utilizan unos parámetros (los mismos del Modelo de Longley-Rice) para configurar el sistema.

Lo primero que se define es la forma como va a funcionar la red. La tabla 3.4 muestra los parámetros de configuración y la figura 3.15 muestra la ventana de configuración de la red en Radio Mobile.

Además, debe configurarse las estaciones. Para esto, Radio Mobile hace la utilización de configuración de sistemas donde se establecen los parámetros para las estaciones, de acuerdo con el sistema al que pertenezcan. Es así, como se configuran dos sistemas: DL y UL, que representan la forma como se transmite de BS a CPE en el DL y de CPE a BS en el UL.

3.5.1 Parámetros de Propagación de La Red

La tabla 3.4 muestra los parámetros de propagación de la red que se utilizan para caracterizar la red WRAN.

Parámetro	Valor
Frecuencia mínima (MHz)	54
Frecuencia máxima (MHz)	862
Polarización	Vertical
Modo estadístico	Difusión
Refractividad de la superficie (N)	301
Conductividad del suelo (S/m)	0,005
Permitividad relativa al suelo	15
Clima	Continental Templado
Topología	Red de datos

Tabla 3.4 Parámetros de Configuración de la Red.

Radio Mobile, utiliza ciertos parámetros para la propagación que va a simular:

- Frecuencia mínima y máxima: el programa utiliza la frecuencia media como frecuencia de propagación. De acuerdo con la definición del estándar, la frecuencia mínima es de 54 MHz y la máxima de 862 MHz, por lo que Radio Mobile realiza su simulación con una frecuencia media de 458 MHz.
- Se define la polarización como la figura geométrica de la onda radiada en una determinada dirección; siendo la figura geométrica determinada por el extremo del vector que representa al campo eléctrico en función del tiempo. Las antenas que tienen orientación vertical, están polarizadas verticalmente. Las antenas horizontales tienen, por lo tanto, polarización horizontal. En el caso de la banda



ciudadana, se utilizan preferiblemente las antenas verticales tanto para las estaciones fijas, como para las estaciones móviles.

- Modo estadístico: se refiere al tipo de aplicación de la red. En este caso se selecciona el modo de difusión donde se configuran los parámetros descritos en el capítulo 1: 99,9% de disponibilidad de tiempo, 50% de lugares y un 50% de situaciones.
- Refractividad de la superficie: indica el índice de refracción de la superficie con respecto al de aire (cómo se refracta la onda al pasar del aire al suelo y viceversa). Se toma el valor de 301 ya que en la mayoría de casos (climas y ubicaciones geográficas) este es el valor típico.
- Conductividad del suelo: se refiere a la capacidad del suelo para transmitir la corriente eléctrica. Está relacionada con variables agronómicas, texturas del suelo, humedad, salinidad, materia orgánica y otras características del subsuelo, el terreno marítimo es el que presenta mayor conductividad. En el caso de la red, se toma el valor de 0,005, que es el valor para terreno de calidad media.
- Permitividad del suelo: es una constante que indica cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio. Depende del tipo de terreno. En el caso de la red, se toma el valor de 15 que es el valor para terreno de calidad media.
- Clima: se escoge de acuerdo con la ubicación geográfica del enlace. En el caso de la red, se toma el clima como continental templado.
- Topología: se escoge red de datos, debido a que permite la configuración maestro (BS) esclavo (CPEs) que indica el estándar.

La figura 3.15 muestra la ventana de configuración de la propagación en Radio Mobile.

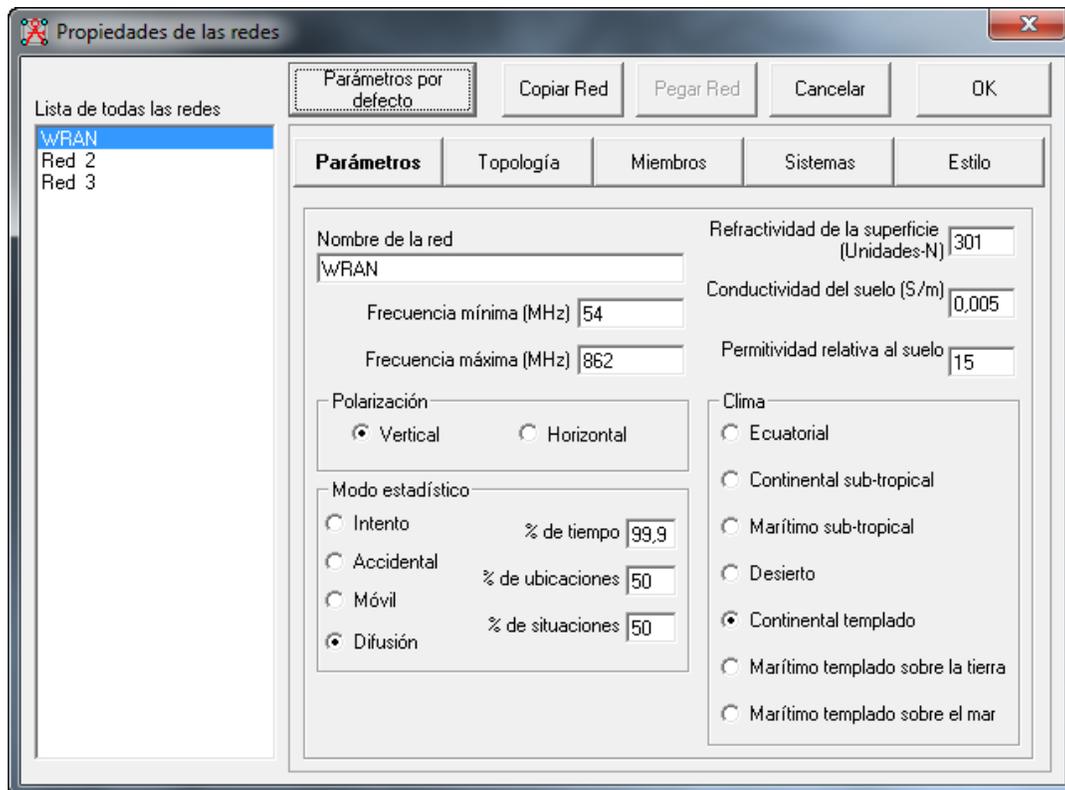


Figura 3.15 Parámetros de Propagación de la Red WRAN.



3.5.2 Cálculo de la Potencia de Transmisión

Se debe determinar la potencia de transmisión partiendo de una limitación de la PIRE, teniendo en cuenta que el máximo valor permitido por la legislación es de 4 Vatios. Desde esta constante se calcula la PIRE para la BS y los CPEs.

$$PIRE = P_{tx} + G_{antena} - \ell_{linea} \quad (3.2)$$

La ganancia de la antena de la BS es de 8 dBi y de los CPEs es de 11 dBi; las pérdidas de línea para la BS es de 4 dB y para los CPEs es de 2,8 dB [43].

3.5.2.1 Potencia de Transmisión la BS

Utilizando la ecuación 3.2 se obtiene la potencia de transmisión de la BS.

$$P_{tx} = PIRE - G_{antena} + \ell_{linea} = 36 \text{ dBm} - 8 \text{ dBi} + 4 \text{ dB} = 32 \text{ dBm}$$

$$P_{tx} = 1,594 \text{ Vatios}$$

3.5.2.2 Potencia de Transmisión del CPE

Utilizando la ecuación 3.2 se obtiene la potencia de transmisión del CPE.

$$P_{tx} = PIRE - G_{antena} + \ell_{linea} = 36 \text{ dBm} - 11 \text{ dBi} + 2,8 \text{ dB} = 27,8 \text{ dBm}$$

$$P_{tx} = 0,6 \text{ Vatios}$$

3.5.3 Configuración del Sistema DL

Radio Mobile, permite la configuración de parámetros de transmisión del enlace de manera que se garantice que éste sea bidireccional.

La tabla 3.5 muestra los parámetros de configuración del sistema DL.

Parámetro	BS
Potencia del transmisor (W)	1,594
Umbral del receptor (dBm)	-93 ²⁰
Tipo de antena	Omnidireccional
Ganancia de la antena (dBi)	8
Altura de antena (m)	75

Tabla 3.5 Configuración del Sistema DL.

La potencia de transmisor se establece como 1,594 Vatios con el objetivo de estudiar la red con la máxima PIRE estipulada dentro de la legislación y las recomendaciones de la FCC y el WG 802.22 del IEEE. El umbral de recepción es de -93 dBm según lo definido

²⁰ Se considera la sensibilidad del receptor en un valor de -93 dBm según [40].



por el WG 802.22 del IEEE (lo que permite alcanzar grandes distancias). La antena de transmisión se toma como omnidireccional de tal manera que pueda dar una propagación multidireccional (más no isotrópica). La ganancia se toma de 8 dBi y la altura de la antena de 75 m siguiendo las recomendaciones del WG 802.22 del IEEE. La figura 3.19 muestra la ventana de configuración del sistema en Radio Mobile.

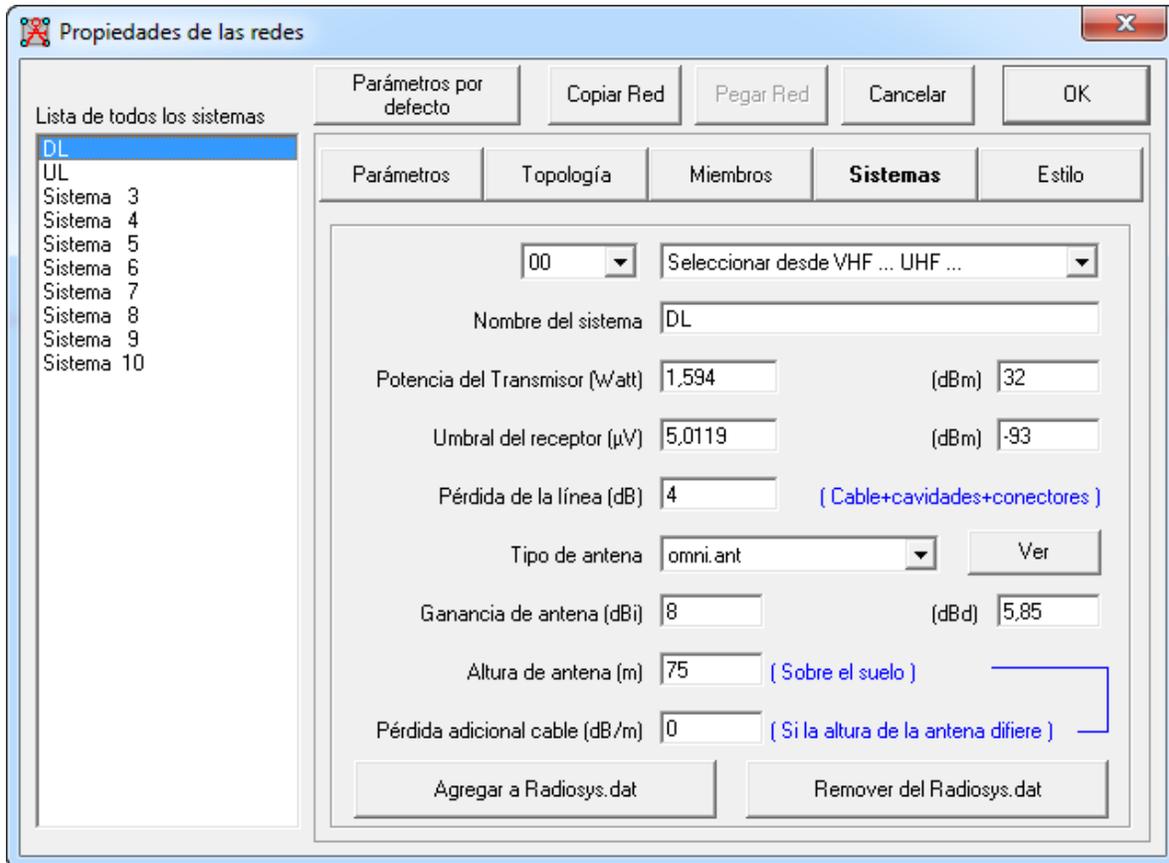


Figura 3.16 Configuración del Sistema DL.

3.5.4 Configuración del Sistema UL

Según lo hecho en 3.4.2, se configura el sistema UL, que comunica a cada CPE con la BS. La tabla 3.6 muestra los parámetros de configuración y la figura 3.19 muestra la ventana de Radio Mobile que permite configurar este sistema.

Parámetro	CPE
Potencia del transmisor (W)	0,6
Umbral del receptor (dBm)	-93
Tipo de antena	Corner
Ganancia de la antena (dBi)	11
Altura de antena (m)	9

Tabla 3.6 Configuración del Sistema UL.



La potencia de transmisor se establece como 0,6 vatios con el objetivo de estudiar la red con la máxima PIRE estipulada dentro de la legislación y las recomendaciones de la FCC y el WG 802.22 del IEEE. El umbral de recepción es de -93 dBm según lo definido por el WG 802.22 del IEEE. El tipo de antena es *corner* unidireccional. La ganancia es de 11 dBi y la altura de la antena de 9 m siguiendo las recomendaciones del WG 802.22 del IEEE. La figura 3.17 muestra la ventana de configuración del sistema en Radio Mobile.

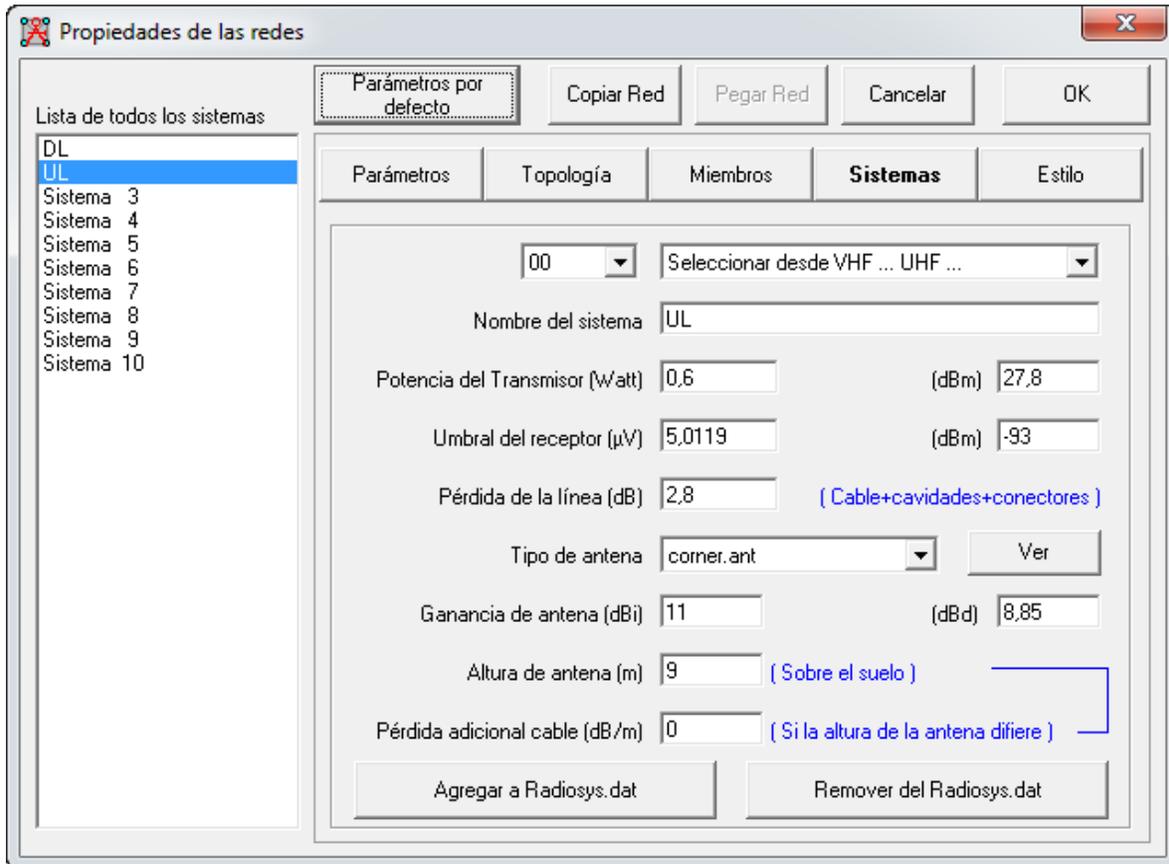


Figura 3.17 Configuración del Sistema UL.

3.6 Zona de Cobertura

Ubicando los emplazamientos en Radio Mobile, la figura 3.18 muestra la constitución de la red integrando los mapas de *Google Earth* con el software de simulación.

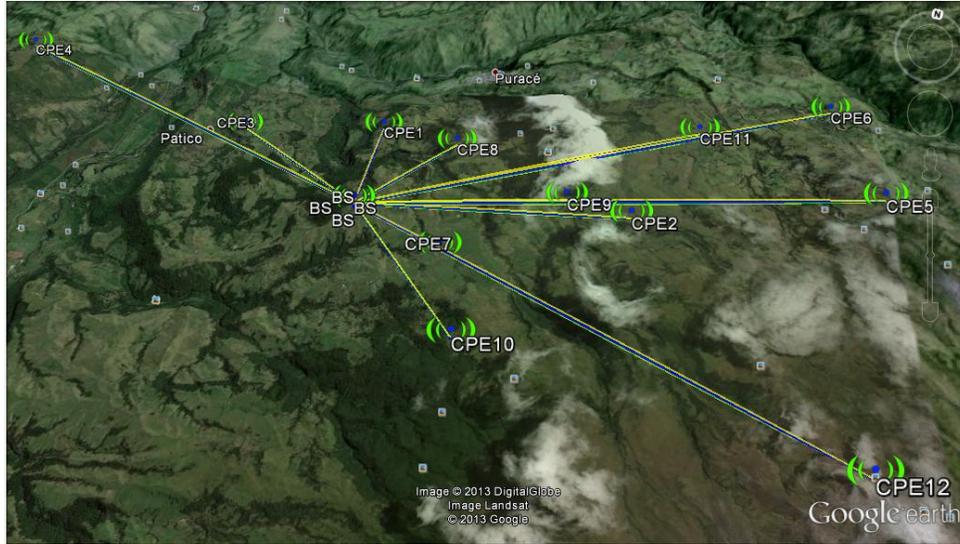


Figura 3.18 Emplazamientos de la Red.

Teniendo en cuenta el umbral de receptor de -93 dBm como el valor en el cual los CPEs reciben señal sin llegar a considerarla interferente (ver la sección 2.5.1.9) se configura un código de colores para visualizar distintos niveles de potencia en recepción en la zona en la cual se transmite utilizando la herramienta polar simple de Radio Mobile.

- Azul: nivel de recepción por encima de -53 dBm
- Verde: nivel de recepción por encima de -63 dBm
- Amarillo: nivel de recepción por encima de -73 dBm
- Naranja: nivel de recepción por encima de -83 dBm
- Rojo: nivel de recepción por encima de -93 dBm

La figura 3.19 muestra la zona de cobertura de Radio Mobile de acuerdo con los parámetros configurados como se expone a lo largo de este capítulo.

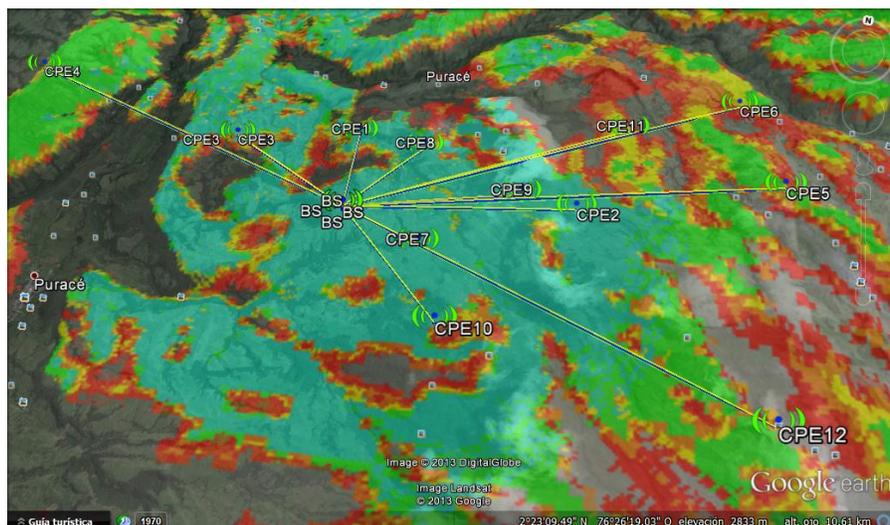


Figura 3.19 Zona de Cobertura y Niveles de Recepción de Potencia.



3.7 Niveles de Recepción de los CPEs.

Teniendo en cuenta los niveles de recepción en los CPEs y partiendo de la naturaleza de diseño con la que se realiza la planeación de la red, se analizan los estados de enlace de la BS con cada uno de los CPE. Las figuras 3.20 a 3.31 muestran el enlace tridimensional que resulta de integrar Radio Mobile con Google Earth donde se puede apreciar las condiciones de LOS o NLOS y seguido de este bloque de imágenes, se muestran las figuras 3.32 a 3.43 donde se puede ver el estado del enlace con sus respectivos niveles de recepción y otros resultados de simulación ofrecidos por Radio Mobile.



Figura 3.20 Vista Tridimensional de Enlace BS-CPE1.

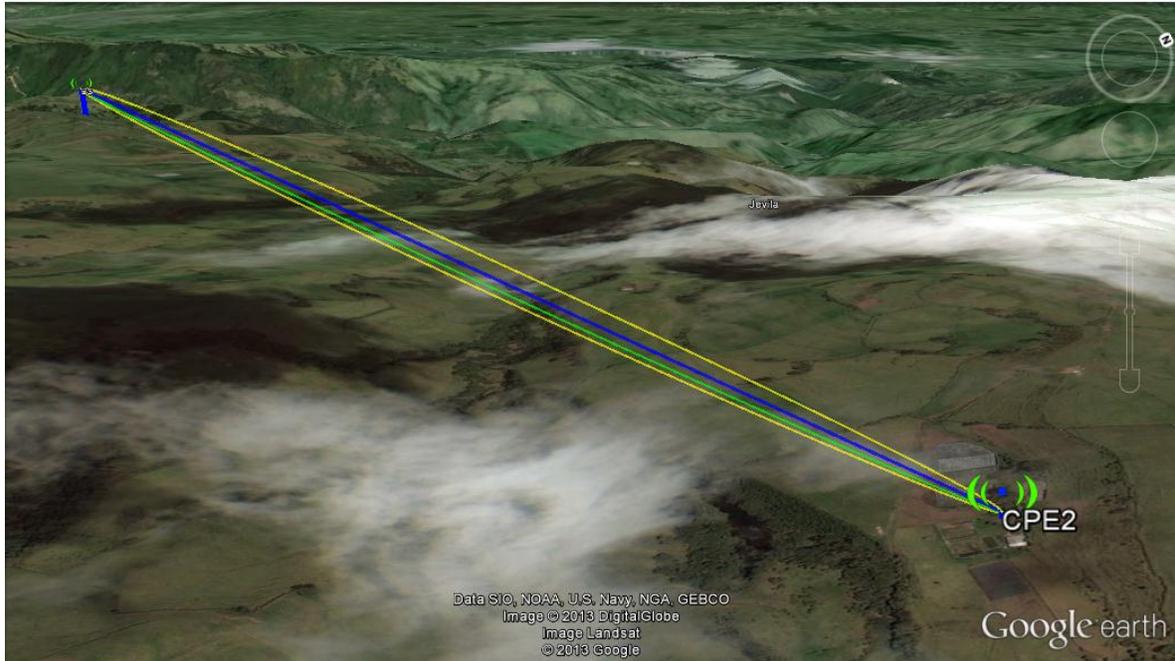


Figura 3.21 Vista Tridimensional del Enlace BS-CPE2.

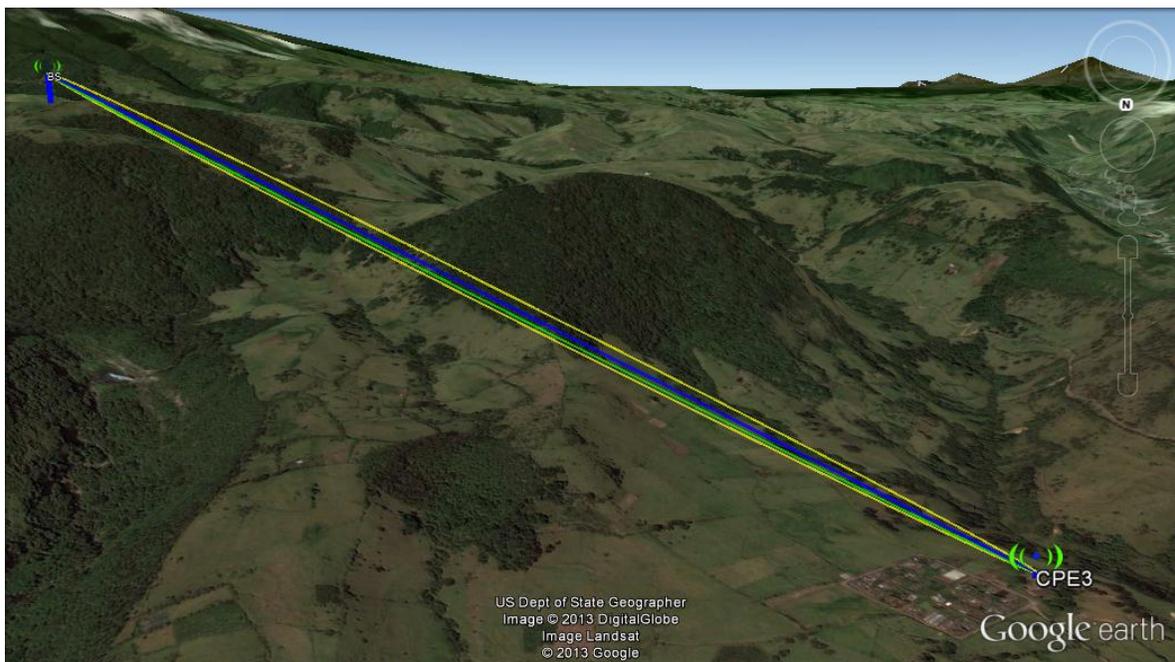


Figura 3.22 Vista Tridimensional de Enlace BS-CPE3.

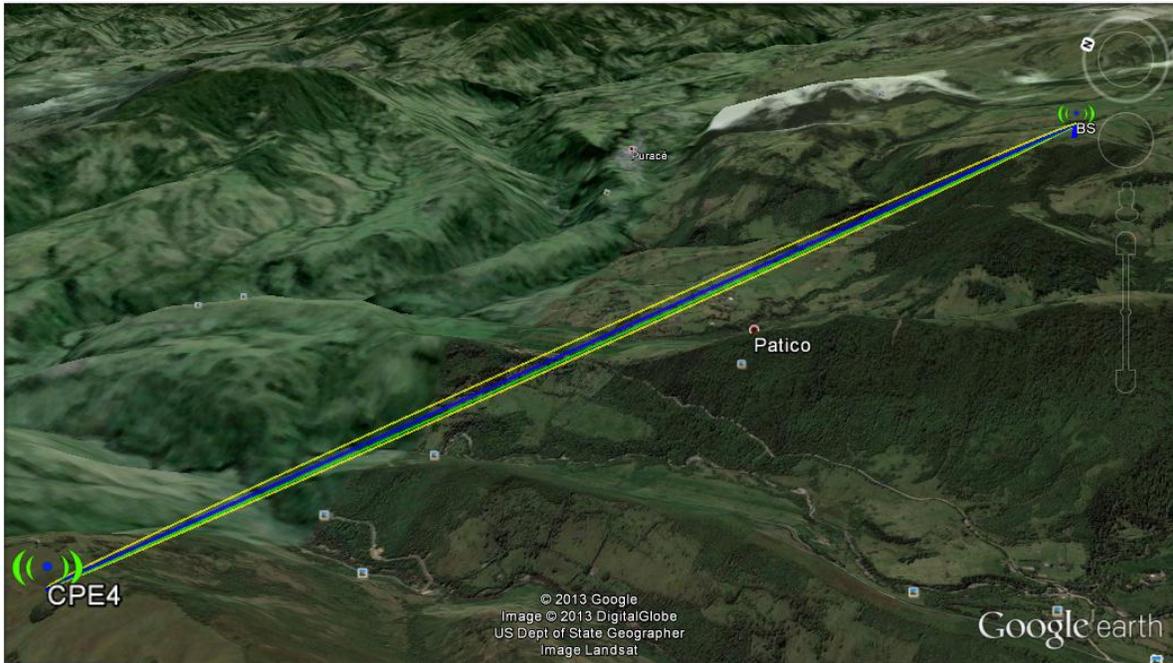


Figura 3.23 Vista Tridimensional de Enlace BS-CPE4.

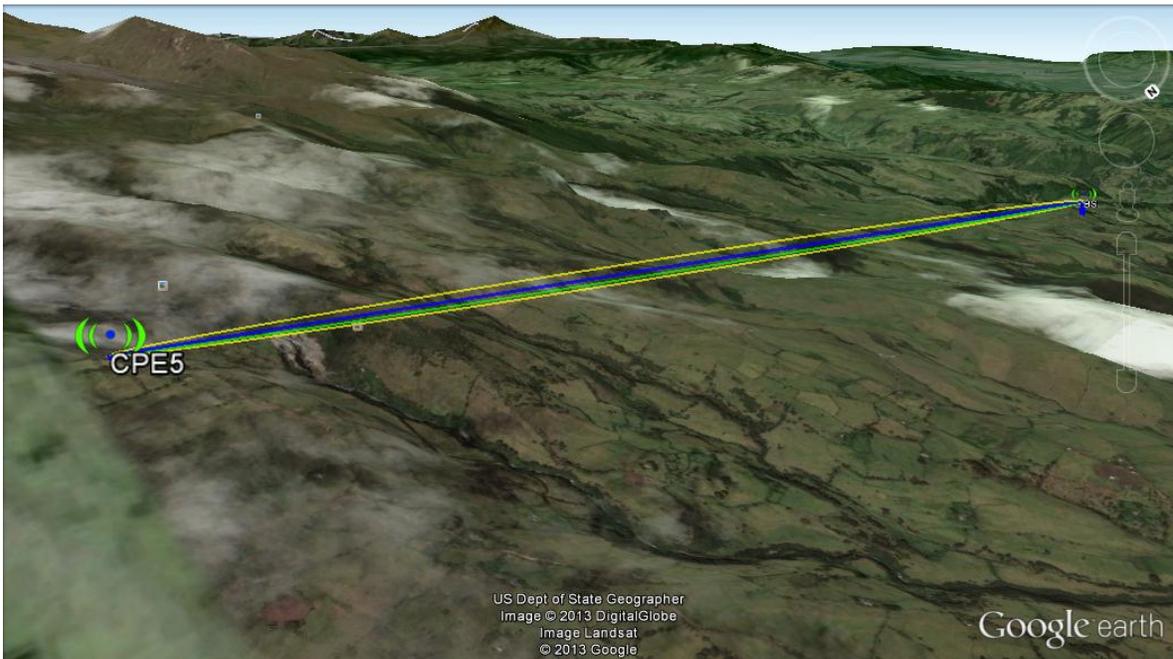


Figura 3.24 Vista Tridimensional de Enlace BS-CPE5.



Figura 3.25 Vista Tridimensional de Enlace BS-CPE6.



Figura 3.26 Vista Tridimensional de Enlace BS-CPE7.



Figura 3.27 Vista Tridimensional de Enlace BS-CPE8.

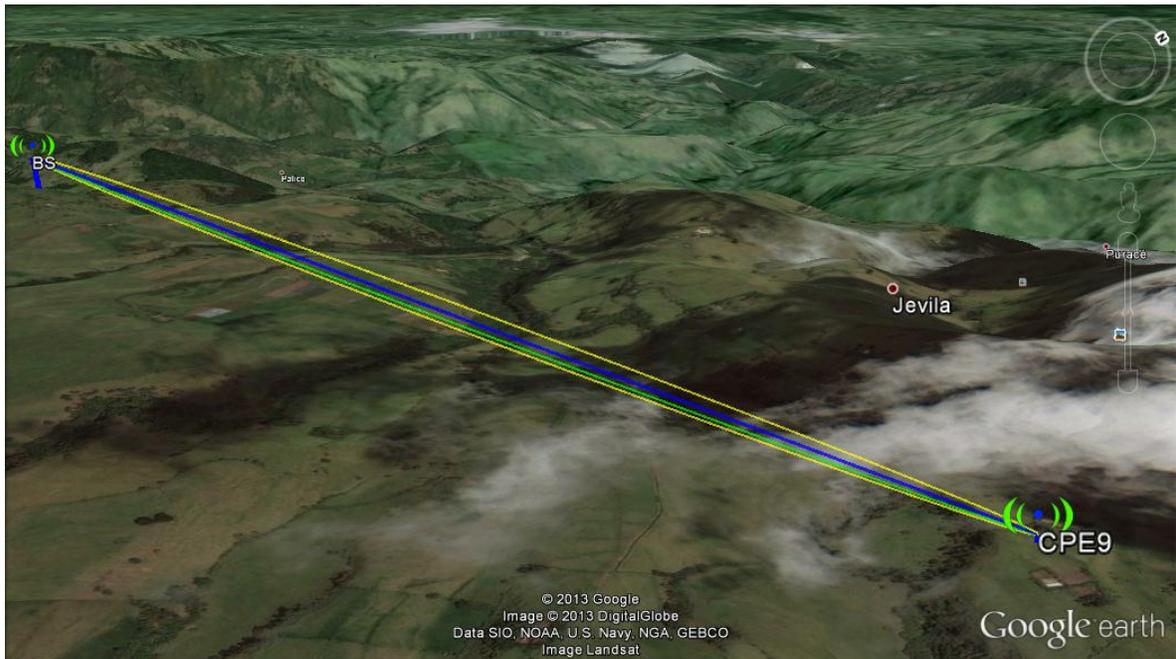


Figura 3.28 Vista Tridimensional de Enlace BS-CPE9.

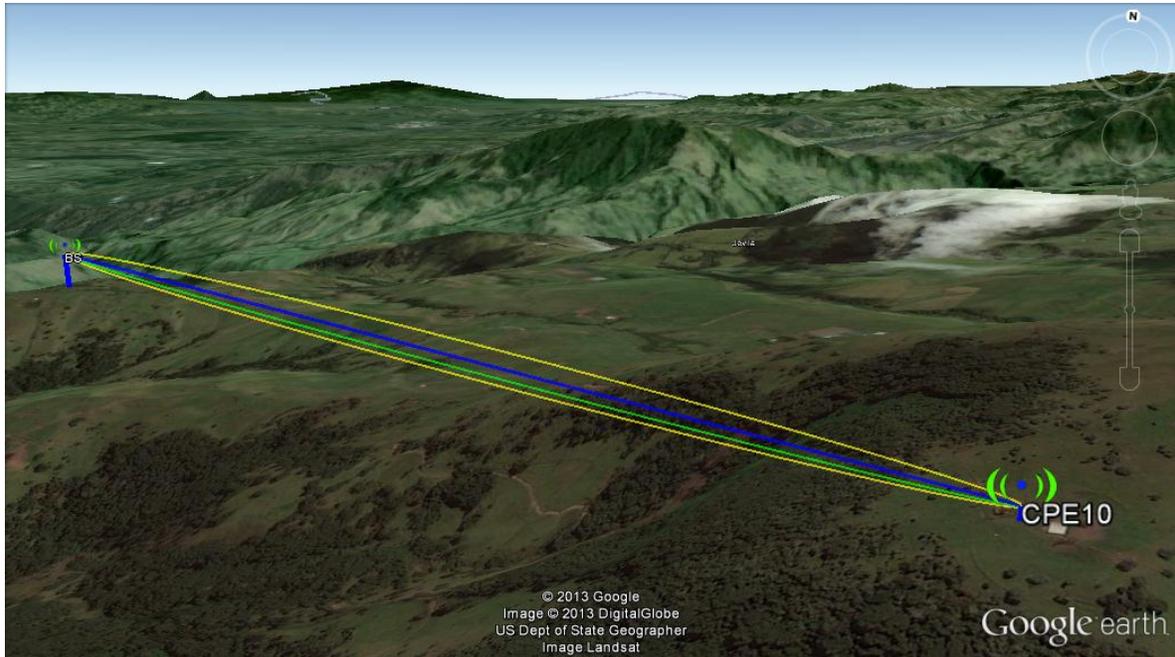


Figura 3.29 Vista Tridimensional de Enlace BS-CPE10.

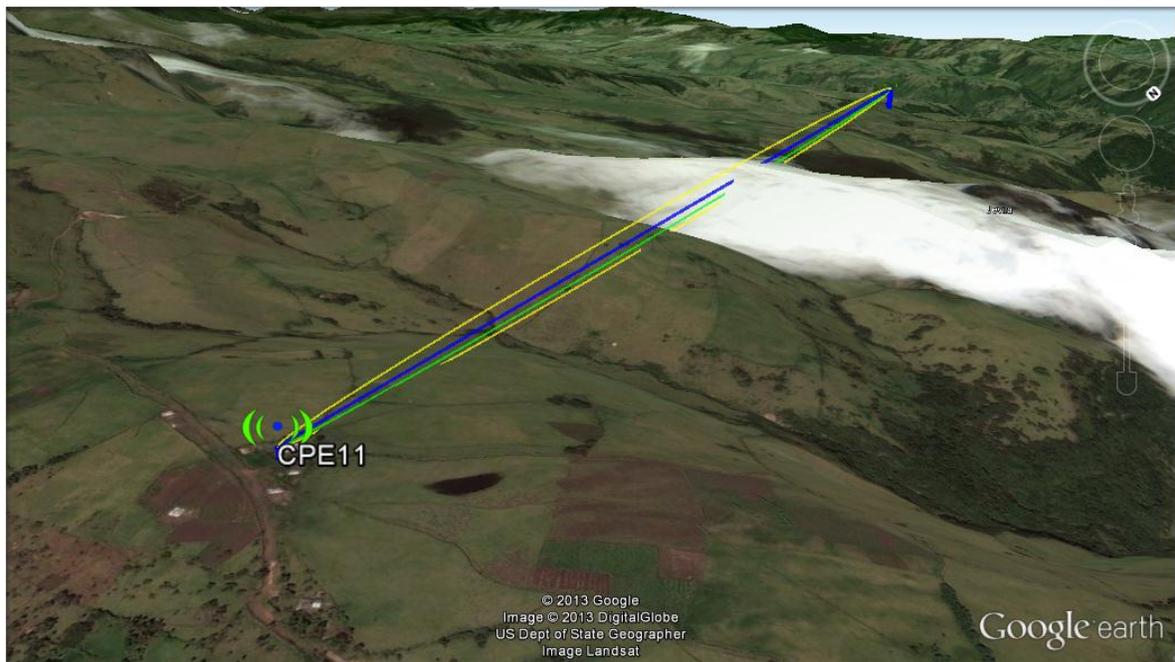


Figura 3.30 Vista Tridimensional de Enlace BS-CPE11.

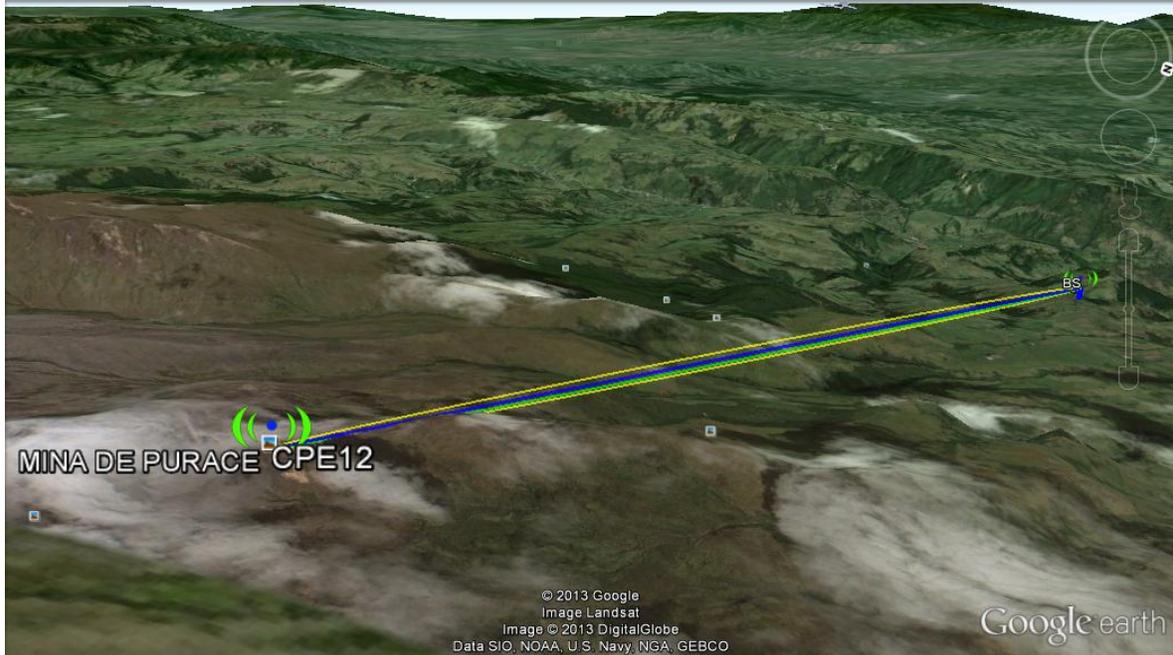


Figura 3.31 Vista Tridimensional de Enlace BS-CPE12.

En la figura 3.31, se puede apreciar el estado del enlace entre la BS y el CPE12 proporcionado por Radio Mobile. El nivel de recepción en este CPE es de $-69,5$ dBm que está muy por encima del umbral definido para la red. Las pérdidas de propagación que calcula el software están en $113,7$ dB (calculadas de acuerdo con el modelo de propagación de Longley-Rice) que sumado a las pérdidas de línea y ganancia de las antenas, permite calcular un total de pérdidas de transmisión del enlace (ℓ) de acuerdo con la ecuación:

$$\ell = 113,7dB + 4dB + 2,8dB - 8dBi - 11dBi \quad (3.3)$$

$$\ell = 101,5 dB$$

El nivel de recepción se calcula:

$$Nivel_{Rx} = P_{Tx} - \ell \quad (3.4)$$

$$Nivel_{Rx} = 32dBm - 101,5dB = -69,5dBm.$$

El mismo análisis se hace para el resto de CPEs desplegados en las figuras 3.32 a 3.43 donde se muestran los estados del enlace de todos los CPEs.

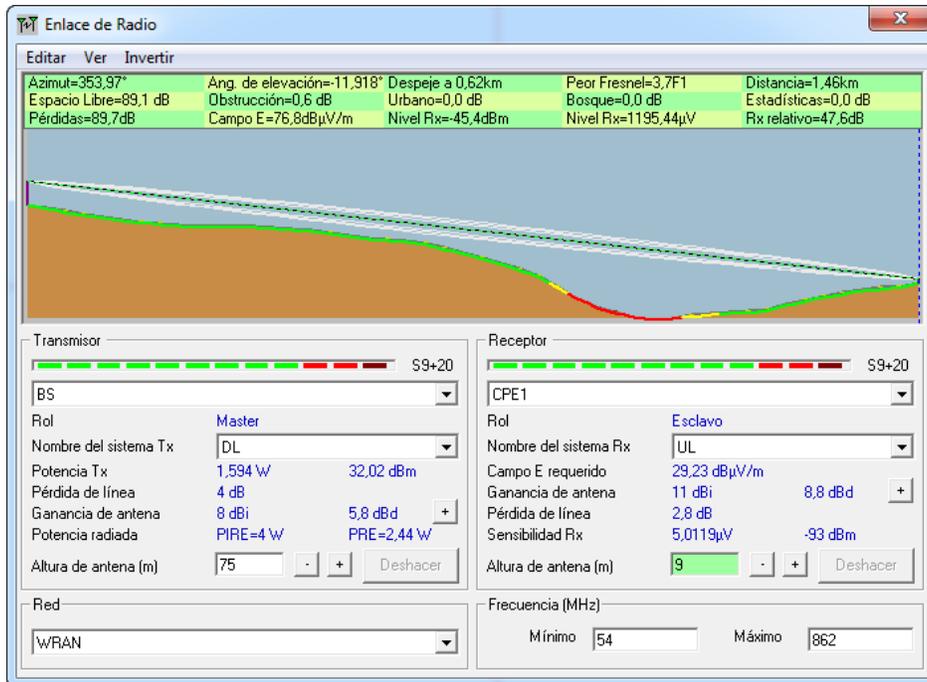


Figura 3.32 Estado del Enlace Entre la BS y el CPE1.

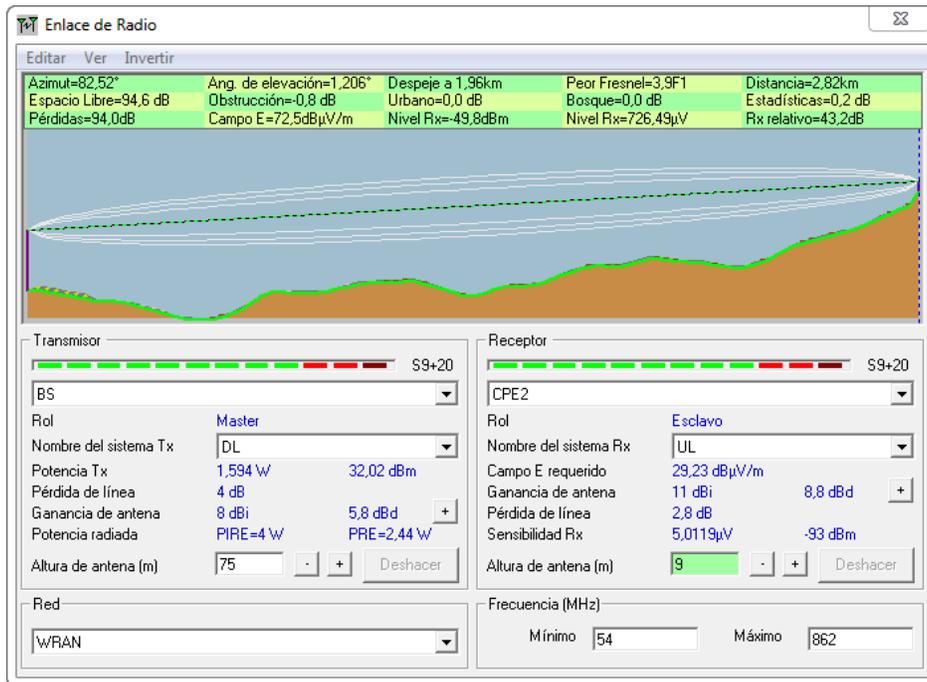


Figura 3.33 Estado del Enlace Entre la BS y el CPE2.

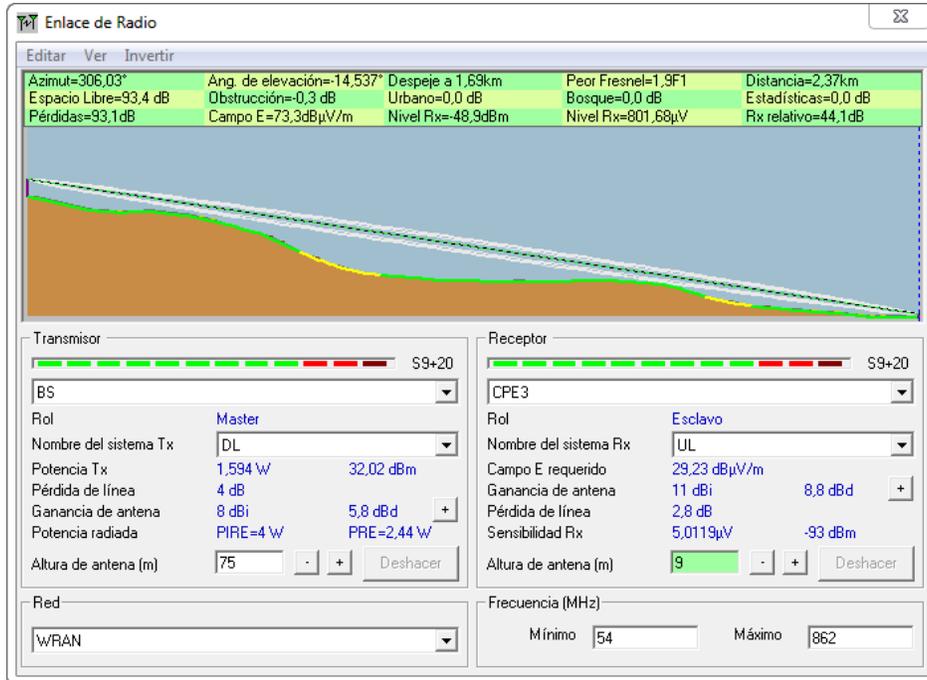


Figura 3.34 Estado del Enlace Entre la BS y el CPE3.

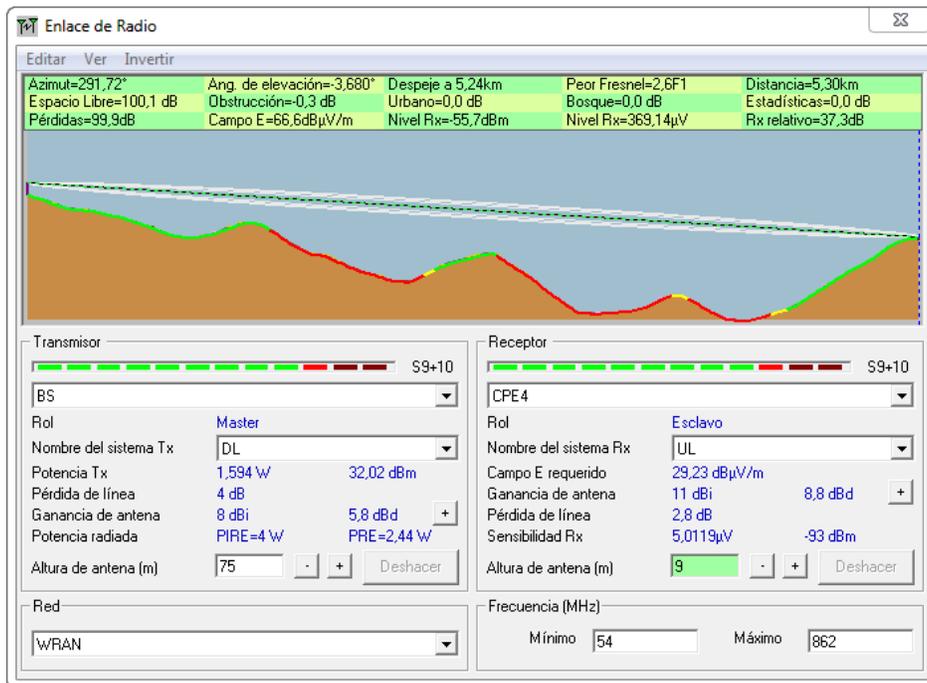


Figura 3.35 Estado del Enlace Entre la BS y el CPE4.

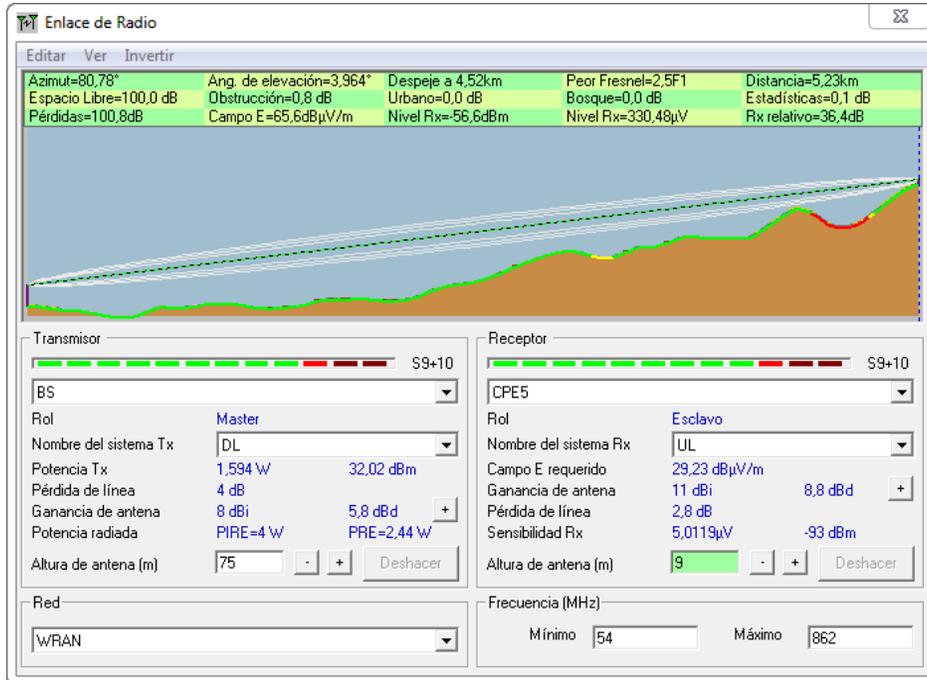


Figura 3.36 Estado del Enlace Entre la BS y el CPE5.

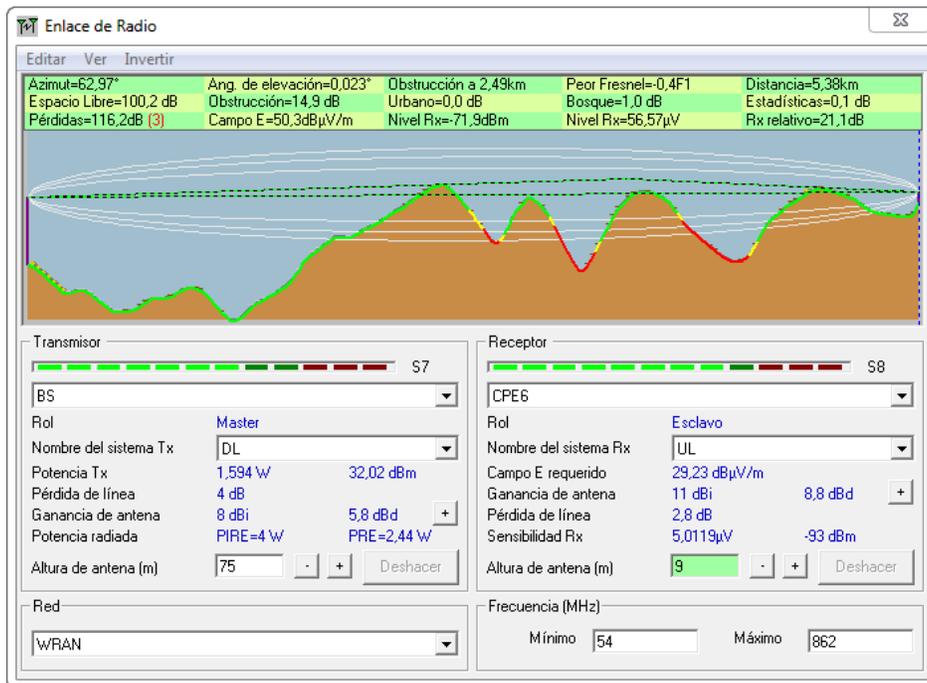


Figura 3.37 Estado del Enlace Entre la BS y el CPE6.

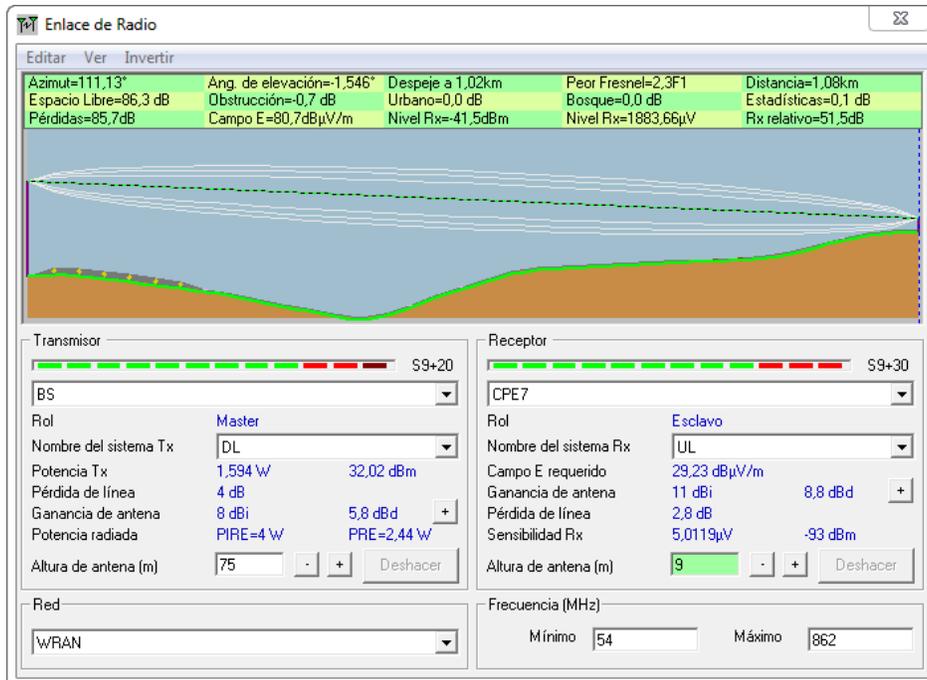


Figura 3.38 Estado del Enlace Entre la BS y el CPE7.

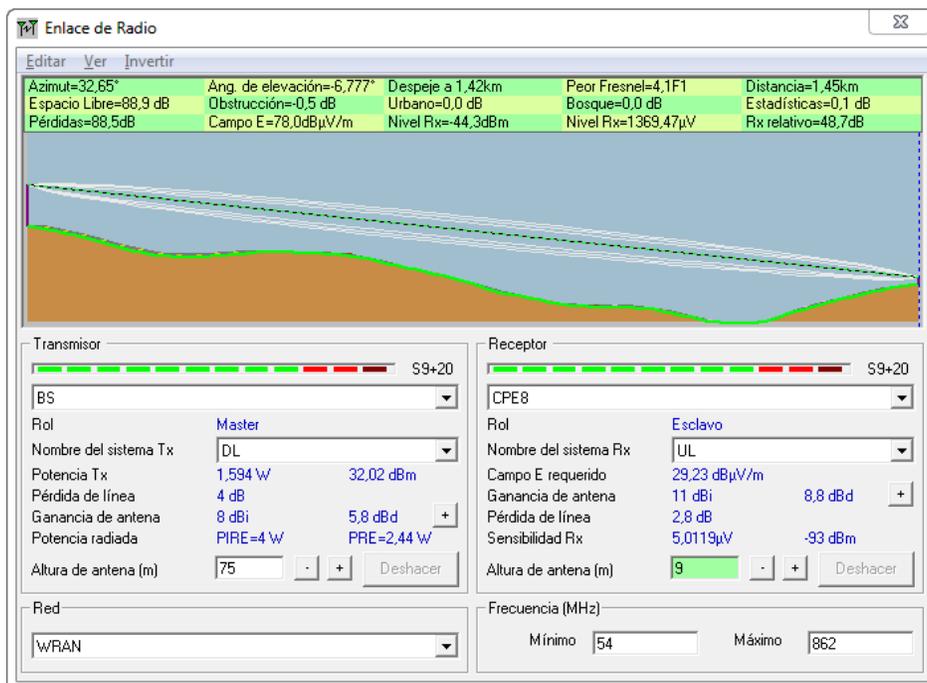


Figura 3.39 Estado del Enlace Entre la BS y el CPE8.

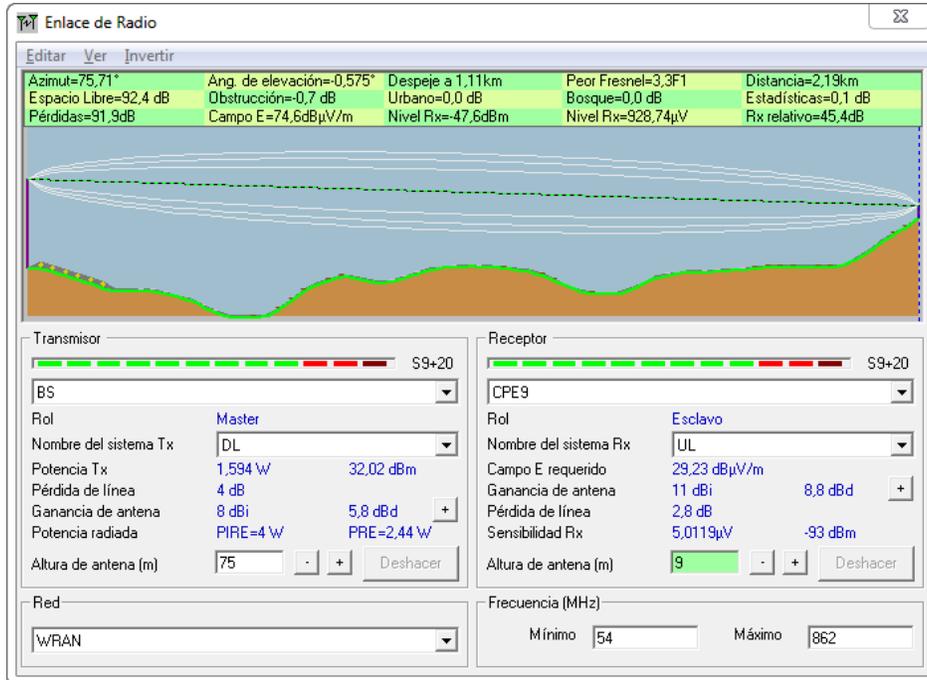


Figura 3.40 Estado del Enlace Entre la BS y el CPE9.

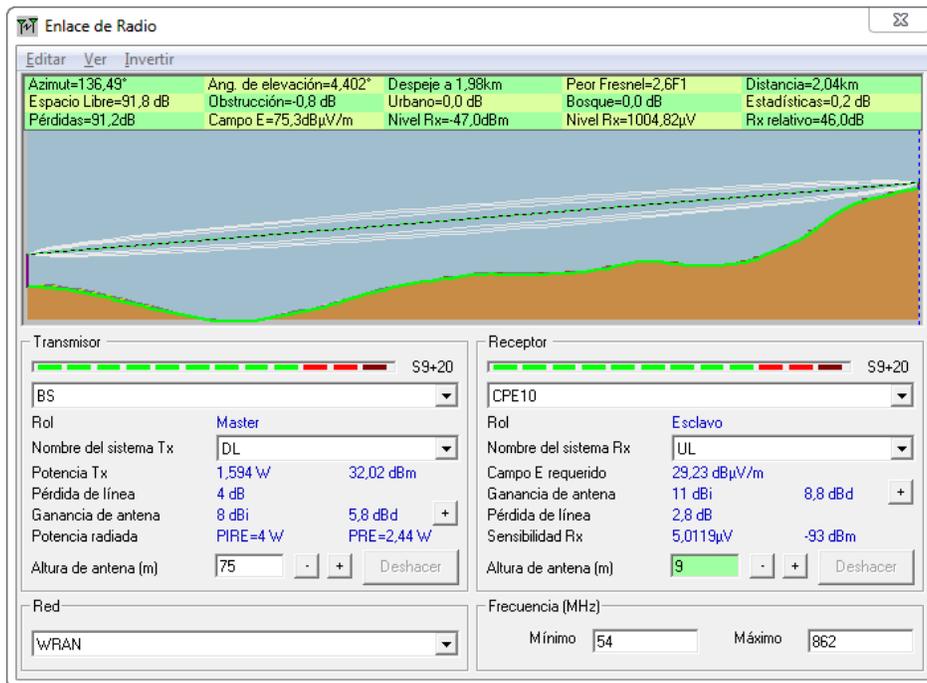


Figura 3.41 Estado del Enlace Entre la BS y el CPE10.

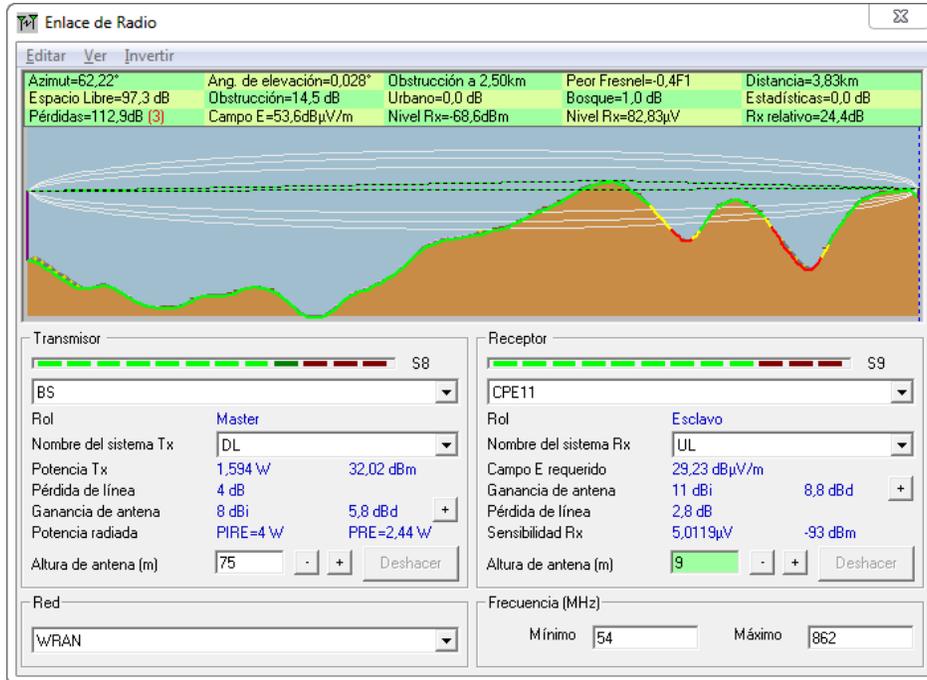


Figura 3.42 Estado del Enlace Entre la BS y el CPE11.

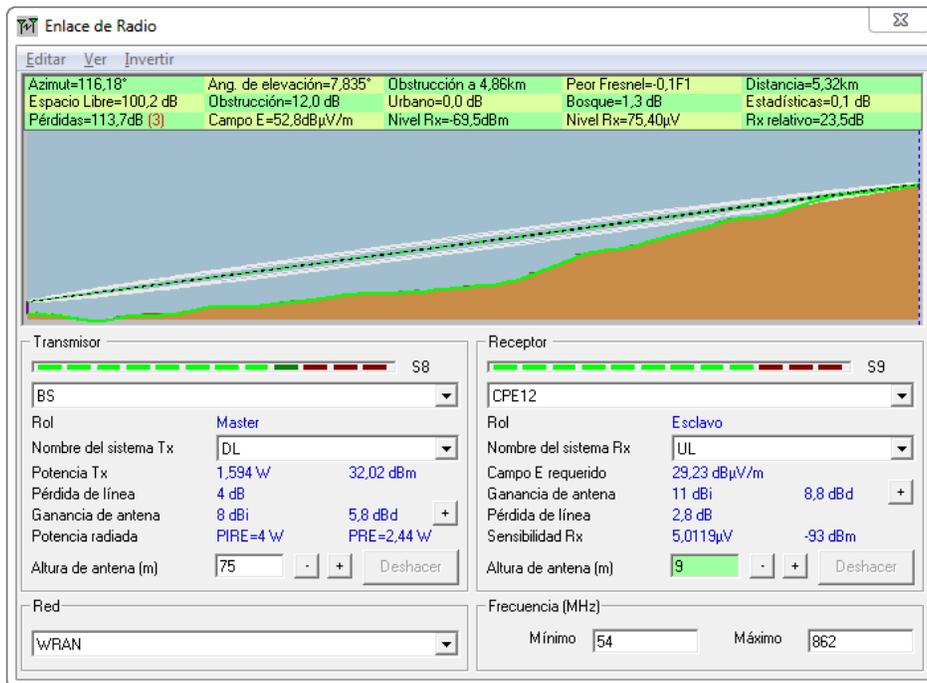


Figura 3.43 Estado del Enlace Entre la BS y el CPE12.



En la tabla 3.7 se presenta un resumen de los principales parámetros de simulación.

Dispositivo	Azimut (°)	Angulo de elevación (°)	Pérdidas (dB)	Nivel de recepción (dBm)	Nivel de recepción relativo (dB)
CPE1	353,97	-11,918	89,7	-45,4	47,6
CPE2	82,52	1,206	94,0	-49,8	43,2
CPE3	306,03	-14,537	93,1	-48,9	44,1
CPE4	291,72	-3,680	99,9	-55,7	37,3
CPE5	80,78	3,964	100,8	-56,6	36,4
CPE6	62,97	0,023	116,2	-71,9	21,0
CPE7	111,13	-1,546	85,7	-41,5	51,5
CPE8	32,65	-6,777	88,5	-44,3	48,7
CPE9	75,71	-0,575	91,9	-47,6	45,4
CPE10	136,49	4,402	91,2	-47,0	46,0
CPE11	62,22	0,028	112,9	-68,6	24,4
CPE12	116,18	7,835	113,7	-69,5	23,5

Tabla 3.7 Resumen de los Parámetros del Estado del Enlace BS-CPE.

- Azimut: corresponde al ángulo formado por el meridiano tomado desde la antena de transmisión y el trayecto de propagación de la señal medido en el sentido de las manecillas del reloj.
- El ángulo de elevación: es el ángulo formado entre la línea de dirección de viaje de una onda radiada desde la antena de BS hasta un CPE y la línea horizontal.
- Pérdidas: son las pérdidas de propagación calculadas por Radio Mobile haciendo uso del modelo de propagación de Longley-Rice.
- Nivel de recepción: es la potencia en dBm que se mide en el CPE (ver la ecuación 3.4).
- Nivel de recepción relativo: corresponde a un parámetro que indica la diferencia existente entre el nivel de señal de recepción y el umbral fijado para el sistema. Entre más pequeño sea este valor, mayor será el riesgo de interferencia. En caso de que fuese negativo, indicaría que la señal recibida es inferior al umbral.

El objetivo cumplido con este capítulo es el de determinar mediante simulación el área de cobertura para la zona rural objeto, establecida en el RIP, cabe resaltar que no se tomaron en cuenta márgenes de operación.



4. THROUGHPUT DEL SISTEMA

El estudio de la velocidad de transferencia del sistema, permite vislumbrar el potencial de aplicación que podría dársele a WRAN en un entorno real. Se busca encontrar una eficiencia espectral que garantice banda ancha para un punto dentro de la zona de cobertura haciendo para esto, el análisis de los distintos MCSs para el ancho de banda de canal de 6 MHz con el cual funcionaría WRAN de acuerdo con la regulación colombiana.

Según lo estudiado en el capítulo 2, la velocidad de transferencia del sistema puede variar desde unos pocos Mbps hasta alcanzar un pico de alrededor de 24 Mbps. El objetivo de este capítulo, es establecer una velocidad efectiva²¹ de transferencia de datos para un CPE con la cual se garantice banda ancha.

4.1 Concepto de Banda Ancha en Colombia

Según la resolución 3067 de 2011²² “por la cual se definen los indicadores de calidad de los servicios de telecomunicaciones y se dictan otras disposiciones”, emitida por la Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC) de Colombia, indica que “una conexión será considerada de banda ancha sólo si las velocidades efectivas cumplen con los siguientes valores mínimos” [27]:

- Enlace de Proveedor de Servicios de Internet (ISP, *Internet Service Provider*) al Cliente (DL): 1024 Kbps.
- Enlace del cliente al ISP (UL): 512 Kbps.

4.2 Velocidad de Transferencia Objetivo

De acuerdo con lo indicado por el estándar, las velocidades de transferencia de datos que se manejan, son de 1,5 Mbps (1536 Kbps) desde el ISP al cliente y de 384 Kbps (del cliente al ISP). Así:

$$\text{Razón} \left(\frac{\text{envío}}{\text{retorno}} \right) = \frac{1536 \text{ Kbps}}{384 \text{ Kbps}} = 4 \quad (4.1)$$

Existe una razón de 1 a 4 que relaciona la velocidad de envío (DL) con la de retorno (UL), ecuación 4.1.

Teniendo en cuenta los indicadores para la prestación del servicio de banda ancha (ver la sección 4.1), se puede inferir que en el enlace de bajada (DL), se está cumpliendo con la velocidad mínima de transferencia. Sin embargo, en el enlace de subida (UL), ésta no es suficiente, razón por la cual, se debe establecer una nueva con la que se garantice banda ancha [27].

$$\text{Velocidad Objetivo} = \text{Razón} * 512 \text{ Kbps} \quad (4.2)$$

$$\text{Velocidad Objetivo} = 4 * 512 \text{ Kbps} = 2048 \text{ Kbps} = 2 \text{ Mbps}$$

²¹ La velocidad efectiva de acceso debe entenderse como el *throughput* de cada usuario.

²² Es la resolución vigente.



Según la ecuación 4.2, la velocidad efectiva de acceso por usuario que debe lograr el sistema WRAN, es de 2 Mbps para un CPE.

4.3 Eficiencia Espectral Requerida

Establecida la velocidad de transferencia requerida de 2 Mbps para el CPE al que se le va a garantizar banda ancha, se toman los distintos modos físicos que combinan MCS para obtener una eficiencia espectral que permita calcular la velocidad de transferencia del sistema. En la tabla 2.3 se mostraron los valores ofrecidos por el estándar IEEE 802.22 tanto para eficiencia espectral, como para la velocidad de transferencia del sistema. Sin embargo, en este apartado, se hace un cálculo de dicha eficiencia con la siguiente ecuación [44].

$$\eta = \frac{R_b}{W} \times FEC \quad (4.3)$$

Donde,

η : eficiencia espectral [bps/Hz]

FEC: razón de codificación.

W: ancho de banda [Hz].

R_b : velocidad de transferencia [bps].

Para un filtro ideal pasa banda se cumple que:

$$W = \frac{1}{T} = R \quad (4.4)$$

Dónde:

$$R_b = \frac{1}{T_b} \quad (4.5)$$

Se reemplaza la ecuación 4.4 y 4.5 en la ecuación 4.3:

$$\eta = \frac{T}{T_b} \times FEC \quad (4.6)$$

Donde,

T: periodo de símbolo [s].

T_b : periodo de bits [s/bits]

De acuerdo con lo descrito en las secciones 2.4.2.3, 2.4.2.4, y 2.4.2.5, se presenta la tabla 4.1 con los periodos de símbolo correspondientes a cada modulación.

Esquema	Periodo de Símbolo
BPSK	1 T_b
QPSK	2 T_b



16-QAM	4 Tb
64-QAM	6 Tb

Tabla 4.1 Periodo de Símbolo de los Esquemas de Modulación Utilizados en WRAN.

Como se aclaró en el capítulo 2, la modulación BPSK sólo se utiliza para el establecimiento del enlace y transmisión de tramas de control, por lo cual no es útil para la transmisión de datos. A continuación, se realizan los cálculos de la eficiencia espectral que ofrece cada MSC.

4.3.1 Eficiencia Espectral para QPSK

Para QPSK se necesitan 2 bits para formar un símbolo, siendo éste el periodo de símbolo se calcula la eficiencia espectral siguiendo la ecuación 4.6, para cada una de las tasas de codificación descritas en el capítulo 2.

4.3.1.1 QPSK 1/2

$$\eta = \frac{2Tb}{Tb} * \frac{1}{2} = 1 \text{ bps/Hz}$$

La eficiencia espectral para el MCS QPSK 1/2 es de 1 bps/Hz.

4.3.1.2 QPSK 2/3

$$\eta = \frac{2Tb}{Tb} * \frac{2}{3} = 1,33 \text{ bps/Hz}$$

La eficiencia espectral para el MCS QPSK 2/3 es de 1,33 bps/Hz.

4.3.1.3 QPSK 3/4

$$\eta = \frac{2Tb}{Tb} * \frac{3}{4} = 1,5 \text{ bps/Hz}$$

La eficiencia espectral para el MCS QPSK 3/4 es de 1,5 bps/Hz

4.3.3.1 QPSK 5/6

$$\eta = \frac{2Tb}{Tb} * \frac{5}{6} = 1,66 \text{ bps/Hz}$$

La eficiencia espectral para el MCS QPSK 5/6 es de 1,66 bps/Hz.

4.3.2 Eficiencia Espectral para 16-QAM

Para 16-QAM se necesitan 4 bits para formar un símbolo de ésta modulación. Siendo éste el periodo de símbolo, se procede a calcular la eficiencia espectral para cada una de las tasas de codificación siguiendo la ecuación 4.6.



4.3.2.1 16-QAM 1/2

$$\eta = \frac{4Tb}{Tb} * \frac{1}{2} = 2 \text{ bps/Hz}$$

La eficiencia espectral para el MCS 16-QAM 1/2 es de 2 bps/Hz.

4.3.2.2 16-QAM 2/3

$$\eta = \frac{4Tb}{Tb} * \frac{2}{3} = 2,66 \text{ bps/Hz}$$

La eficiencia espectral para el MCS 16-QAM 2/3 es de 2,66 bps/Hz.

4.3.2.3 16-QAM 3/4

$$\eta = \frac{4Tb}{Tb} * \frac{3}{4} = 3 \text{ bps/Hz}$$

La eficiencia espectral para el MCS 16-QAM 3/4 es de 3 bps/Hz que corresponde con la eficiencia espectral promedio que se espera en el sistema de acuerdo con lo descrito en el estándar y en las recomendaciones del WG 802.22.

4.3.2.4 16-QAM 5/6

$$\eta = \frac{4Tb}{Tb} * \frac{5}{6} = 3,33 \text{ bps/Hz}$$

La eficiencia espectral para el MCS 16-QAM 5/6 es de 3,33 bps/Hz.

4.3.3 Eficiencia Espectral para 64-QAM

Para 64-QAM se necesitan 6 bits para formar un símbolo de ésta modulación. Siendo éste el periodo de símbolo, se procede a calcular la eficiencia espectral que resulta de combinar esta modulación con las tasas de codificación, siguiendo la ecuación 4.6.

4.3.3.1 64-QAM 1/2

$$\eta = \frac{6Tb}{Tb} * \frac{1}{2} = 3 \text{ bps/Hz}$$

La eficiencia espectral para el MCS 64-QAM 1/2 es de 3 bps/Hz, misma eficiencia espectral del MCS 16-QAM 3/4.

4.3.3.2 64-QAM 2/3

$$\eta = \frac{6Tb}{Tb} * \frac{2}{3} = 4 \text{ bps/Hz}$$

La eficiencia espectral para el MCS 64-QAM 2/3 es de 4 bps/Hz.



4.3.3.3 64-QAM 3/4

$$\eta = \frac{6Tb}{Tb} * \frac{3}{4} = 4,5 \text{ bps/Hz}$$

La eficiencia espectral para el MCS 64-QAM 3/4 es de 4,5 bps/Hz.

4.3.3.1 64-QAM 5/6

$$\eta = \frac{6Tb}{Tb} * \frac{5}{6} = 5 \text{ bps/Hz}$$

La eficiencia espectral para el MCS 64-QAM 5/6 es de 5 bps/Hz y se convierte en el mayor valor ofrecido por los MCS con los que funciona WRAN.

La tabla 4.2 presenta un resumen de los diferentes MCS y sus respectivas eficiencias espectrales.

MCS	Tasa de símbolo	Tasa de Codificación	Eficiencia Espectral (bps/Hz)
QPSK 1/2	2	1/2	1
QPSK 2/3	2	2/3	1,33
QPSK 3/4	2	3/4	1,5
QPSK 5/6	2	5/6	1,66
16-QAM 1/2	4	1/2	2
16-QAM 2/3	4	2/3	2,66
16-QAM 3/4	4	3/4	3
16-QAM 5/6	4	5/6	3,33
64-QAM 1/2	6	1/2	3
64-QAM 2/3	6	2/3	4
64-QAM 3/4	6	3/4	4,5
64-QAM 5/6	6	5/6	5

Tabla 4.2 Eficiencia Espectral de los Diferentes MCS.

4.4 Velocidad de Transferencia del Sistema

Teniendo en cuenta el ancho de banda del canal de 6 MHz y un total de sub-portadoras de 2048, se calcula el ancho de sub-portadora.

Utilizando una frecuencia de 8/7 del ancho de banda del canal, se obtiene una frecuencia de muestreo que se utilizará junto con la FFT para encontrar los parámetros del símbolo (ver la sección 2.4.2.1).

La frecuencia de muestreo, es 6,857 MHz²³ [11].

²³ 6 MHz de ancho de canal multiplicado por 8/7.



Esa frecuencia de muestreo, se divide entre el número de sub-portadoras dado por el tamaño de la FFT obteniendo así, el ancho de las sub-portadoras [44] en el dominio de la frecuencia.

$$\text{Ancho de SubPortadoras} = \frac{6,857\text{Mhz}}{2048} = 3,348 \text{ KHz} \quad (4.7)$$

Según lo descrito [11] [18], de las 2048 sub-portadoras, sólo se transmite en 1680 debido a que las otras 368 se utilizan para efectos de separación.

De estas 1680 sub-portadoras, se tiene una razón de 1:7 para sub-portadoras piloto y sub-portadoras de datos, queriendo decir que se transmiten datos únicamente por 1440 sub-portadoras [18].

Ahora bien, en la tabla 2.7 que relaciona el número de símbolos que se transmiten por trama dependiendo del ancho de banda de canal y del prefijo cíclico, se tiene la ecuación 4.8 tomada de [28], para calcular la C_{max} (velocidad de transferencia) del sistema.

$$C_{max} (\text{Mbps}) = \frac{\text{SubPortadoras de datos} * \text{Símbolos}}{\text{Duración de la trama (ms)} * 1000} * \eta \quad (4.8)$$

4.4.1 Velocidad de Transferencia del Sistema con un Prefijo Cíclico de 1/4

De acuerdo con la tabla 2.8 el número de símbolos que se utilizan es de 24 para un prefijo cíclico de 1/4 en un canal de 6 MHz.

$$C_{max} [\text{Mbps}] = \frac{1440 * 24}{10\text{ms} * 1000} * \eta$$

La tabla 4.3 muestra la C_{max} del sistema asociadas a cada MCS utilizando para ello, la eficiencia espectral calculada en la sección 4.3 utilizando la ecuación 4.8.

MCS	Eficiencia Espectral (bps/Hz)	C_{max} Asociada al MCS (Mbps)
QPSK 1/2	1	3,46
QPSK 2/3	1,33	4,60
QPSK 3/4	1,5	5,18
QPSK 5/6	1,66	5,74
16-QAM 1/2	2	6,91
16-QAM 2/3	2,66	9,19
16-QAM 3/4	3	10,37
16-QAM 5/6	3,33	11,51
64-QAM 1/2	3	10,37
64-QAM 2/3	4	13,82
64-QAM 3/4	4,5	15,55
64-QAM 5/6	5	17,28

Tabla 4.3 Velocidad de Transferencia para los Distintos MCS con un CP de 1/4.



4.4.2 Velocidad de Transferencia del Sistema con un Prefijo Cíclico de 1/8

De acuerdo con la tabla 2.8 el número de símbolos que se utilizan es de 26 para un prefijo cíclico de 1/8 en un canal de 6 MHz.

$$C_{max} [Mbps] = \frac{1440 * 26}{10ms * 1000} * \eta$$

La tabla 4.4 muestra la C_{max} del sistema asociadas a cada MCS utilizando para ello, la eficiencia espectral calculada en la sección 4.3 utilizando la ecuación 4.8.

MCS	Eficiencia Espectral (bps/Hz)	C_{max} Asociada al MCS (Mbps)
QPSK 1/2	1	3,74
QPSK 2/3	1,33	4,98
QPSK 3/4	1,5	5,62
QPSK 5/6	1,66	6,22
16-QAM 1/2	2	7,49
16-QAM 2/3	2,66	9,96
16-QAM 3/4	3	11,23
16-QAM 5/6	3,33	12,47
64-QAM 1/2	3	11,23
64-QAM 2/3	4	14,98
64-QAM 3/4	4,5	16,85
64-QAM 5/6	5	18,72

Tabla 4.4 Velocidad de Transferencia para los Distintos MCS con un CP de 1/8.

4.4.3 Velocidad de Transferencia del Sistema con un Prefijo Cíclico de 1/16

De acuerdo con la tabla 2.8 el número de símbolos que se utilizan es de 28 para un prefijo cíclico de 1/16 en un canal de 6 MHz.

$$C_{max} [Mbps] = \frac{1440 * 28}{10ms * 1000} * \eta$$

La tabla 4.5 muestra la C_{max} del sistema asociadas a cada MCS utilizando para ello, la eficiencia espectral calculada en la sección 4.3 utilizando la ecuación 4.8.

MCS	Eficiencia Espectral (bps/Hz)	C_{max} Asociada al MCS (Mbps)
QPSK 1/2	1	4,03
QPSK 2/3	1,33	5,36
QPSK 3/4	1,5	6,05
QPSK 5/6	1,66	6,69
16-QAM 1/2	2	8,06
16-QAM 2/3	2,66	10,73
16-QAM 3/4	3	12,10
16-QAM 5/6	3,33	13,43
64-QAM 1/2	3	12,10



64-QAM 2/3	4	16,13
64-QAM 3/4	4,5	18,14
64-QAM 5/6	5	20,16

Tabla 4.5 Velocidad de Transferencia para los Distintos MCS con un CP de 1/16.

La tabla 4.5 corrobora lo indicado por el estándar IEEE 802.22 y descrito en este documento en la tabla 2.8.

4.4.4 Velocidad de Transferencia del Sistema con un Prefijo Cíclico de 1/32

De acuerdo con la tabla 2.8 el número de símbolos que se utilizan es de 29 para un prefijo cíclico de 1/32 en un canal de 6 MHz.

$$C_{max}[\text{Mbps}] = \frac{1440 * 29}{10\text{ms} * 1000} * \eta$$

La tabla 4.6 muestra la C_{max} del sistema asociadas a cada MCS utilizando para ello, la eficiencia espectral calculada en la sección 4.3 utilizando la ecuación 4.8.

MCS	Eficiencia Espectral (bps/Hz)	C_{max} Asociada al MCS (Mbps)
QPSK 1/2	1	4,18
QPSK 2/3	1,33	5,55
QPSK 3/4	1,5	6,26
QPSK 5/6	1,66	6,93
16-QAM 1/2	2	8,35
16-QAM 2/3	2,66	11,11
16-QAM 3/4	3	12,53
16-QAM 5/6	3,33	13,91
64-QAM 1/2	3	12,53
64-QAM 2/3	4	16,70
64-QAM 3/4	4,5	18,79
64-QAM 5/6	5	20,88

Tabla 4.6 Velocidad de Transferencia para los Distintos MCS con un CP de 1/32

El estándar establece una velocidad de transferencia de 1,5 Mbps por CPE en el DL, sin embargo, se busca un MCS que garantice banda ancha para uno de los CPEs, es decir 2 Mbps de velocidad efectiva en el DL y 512 Kbps en el UL de acuerdo con la sección 4.1.

4.5 BER Objetivo

La Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*) se define como el número de bits errados de un grupo de bits recibidos.

En esta medida, los grupos de estandarización, definen valores de BER objetivos que permitan garantizar un buen desempeño del canal y en torno al cual, se dan los requerimientos de potencia de acuerdo con las condiciones de ambiente de



radiofrecuencia. Para el caso de esta red, se estudia el desempeño de la red distintos valores de BER objetivo [41]:

- $BER=10^{-2}$ para transmisión de voz.
- $BER=10^{-4}$ para transmisión de video.
- $BER=10^{-6}$ para transmisión de datos en tiempo real.

4.5.1 Cálculo de BLER

Teniendo en cuenta BER como parámetro de desempeño del canal, se calcula la Tasa de Error de Bloque (BLER, *Block Error Rate*). Este parámetro se mide dentro de un bloque de bits transmitidos y permite conocer cuantos bloques llegan errados al destino. La cantidad de bits por bloque, depende de la modulación y la codificación. La tabla 4.7 presenta los distintos tamaños de bloque en bytes y en bits para los diferentes MCS.

MCS	Tamaño del Bloque (Bytes)	Número de Bits
QPSK 1/2	36	288
QPSK 2/3	48	384
QPSK 3/4	54	432
QPSK 5/6	60	480
16-QAM 1/2	72	576
16-QAM 2/3	96	768
16-QAM 3/4	108	864
16-QAM 5/6	120	960
64-QAM 1/2	108	864
64-QAM 2/3	144	1152
64-QAM 3/4	162	1296
64-QAM 5/6	180	1440

Tabla 4.7 Tamaño de Bloque para los Distintos MCS.

Estos tamaños de bloque, permiten encontrar el BLER, partiendo de las metas propuestas con los distintos BER objetivo propuestos en la sección 4.5.

Para cada BER se ha calculado un BLER que permite vislumbrar la posibilidad de que existan bits errados dentro del flujo de bits que se transmite en cierto periodo de tiempo. La tabla 4.8 relaciona los distintos valores de BLER:

$$BLER = 1 - (1 - BER)^n \quad (4.9)$$

Donde,

BER: tasa de error de bit.
n: número de bits por bloque.
BLER: tasa de error de bloque.



MCS	Número de Bits	BLER para un BER=0,01	BLER para un BER=0,0001	BLER para un BER=0,000001
QPSK 1/2	288	0,944673137	0,028390632	0,000287959
QPSK 2/3	384	0,978917858	0,037673915	0,000383926
QPSK 3/4	432	0,986986202	0,042282242	0,000431907
QPSK 5/6	480	0,991966711	0,046868501	0,000479885
16-QAM 1/2	576	0,996938938	0,055975236	0,000575834
16-QAM 2/3	768	0,999555543	0,073928506	0,000767706
16-QAM 3/4	864	0,999830641	0,082776696	0,000863627
16-QAM 5/6	960	0,999935466	0,091540345	0,00095954
64-QAM 1/2	864	0,999830641	0,082776696	0,000863627
64-QAM 2/3	1152	0,99999063	0,108817245	0,001151337
64-QAM 3/4	1296	0,999997796	0,121558953	0,001295161
64-QAM 5/6	1440	0,999999482	0,134118487	0,001438964

Tabla 4.8 Valores de BLER para las Distintas BER Objetivo.

Entre mayor sea el requerimiento de calidad en el servicio (mayor complejidad), el número de errores permitidos es menor; por lo cual, deberá garantizarse una transmisión en las condiciones más óptimas posibles.

4.6 Cálculo del *Throughput* del sistema

La tabla 4.9 presenta el *Throughput* calculado con base en la BLER a partir de la ecuación para un prefijo cíclico de 1/8:

$$\text{Throughput} = C_{max} (1 - BLER) \quad (4.10)$$

MCS	Cmax	Throughput para un BER de 0,01	Throughput para un BER de 0,0001	Throughput para un BER de 0,000001
QPSK 1/2	3,74	0,2069225	3,633819	3,738923
QPSK 2/3	4,98	0,1049891	4,7923839	4,978088
QPSK 3/4	5,62	0,0731375	5,3823738	5,6175727
QPSK 5/6	6,22	0,0499671	5,9284779	6,2170151
16-QAM 1/2	7,49	0,0229274	7,0707455	7,485687
16-QAM 2/3	9,96	0,0044268	9,2236721	9,9523536
16-QAM 3/4	11,23	0,0019019	10,300418	11,220301
16-QAM 5/6	12,47	0,0008047	11,328492	12,458035
64-QAM 1/2	11,23	0,0019019	10,300418	11,220301
64-QAM 2/3	14,98	0,0001404	13,349918	14,962753
64-QAM 3/4	16,85	3,714E-05	14,801732	16,828177
64-QAM 5/6	18,72	9,697E-06	16,209302	18,693063

Tabla 4.9 *Throughput* para los Distintos Requerimientos de BER y CP=1/8.



4.7 Requerimientos de Potencia

A continuación, se presentan las curvas de desempeño que presenta el estándar IEEE 802.22 donde se relacionan los distintos MCS con valores de BER y SNR [42].

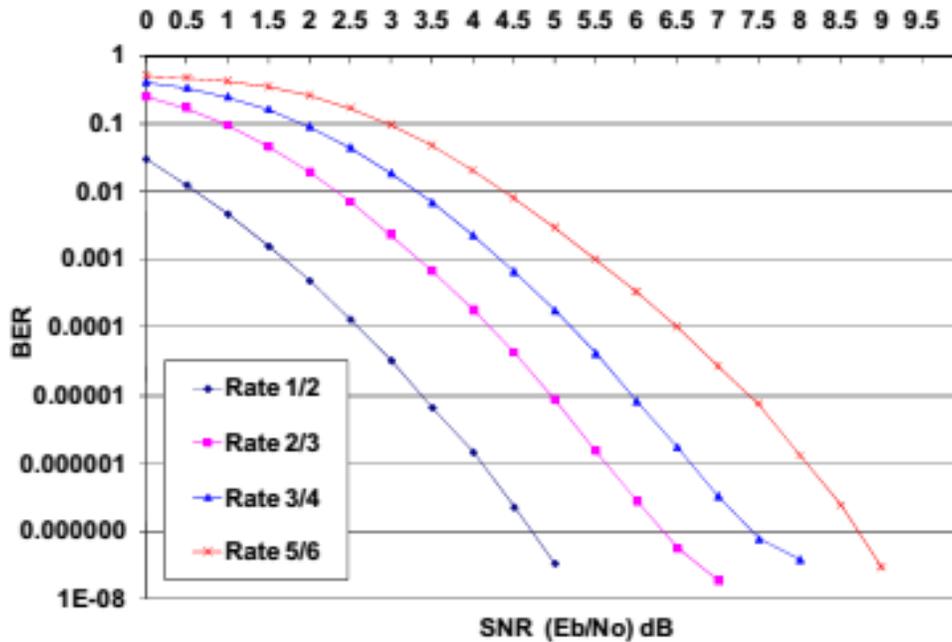


Figura 4.1 Curvas de Desempeño para QPSK.

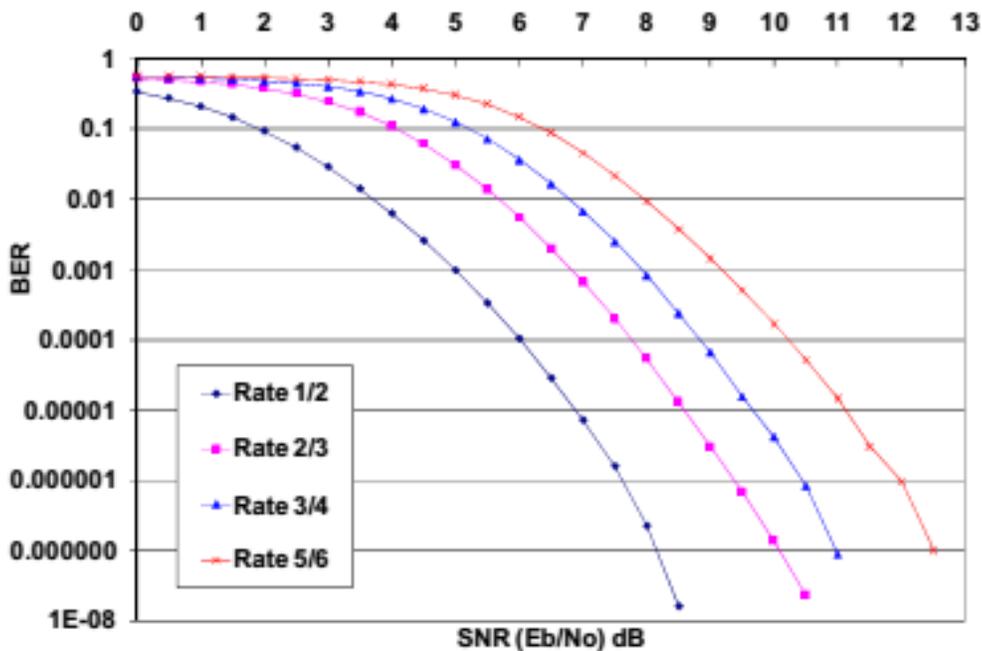


Figura 4.2 Curvas de Desempeño para 16-QAM.

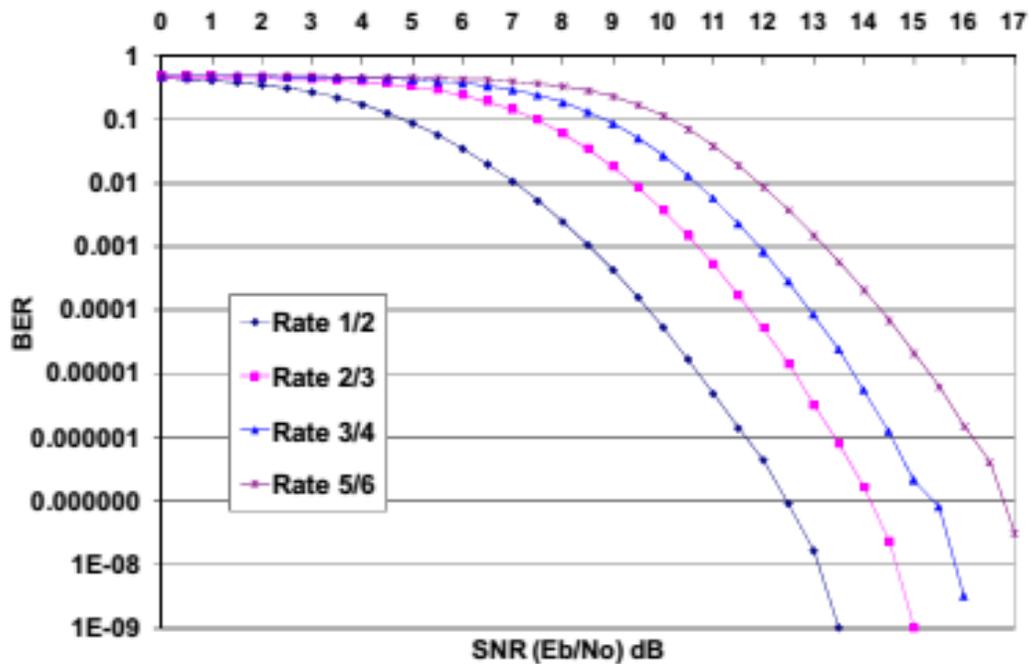


Figura 4.3 Curvas de Desempeño para 64-QAM.

Estas curvas de desempeño permiten vislumbrar cómo a medida que la transmisión aumenta en su complejidad (MCS de mayor orden), son requeridos mayores niveles de SNR, lo que se traduce en un mayor gasto de potencia por parte del sistema.

Con base en los valores mostrados en las curvas de desempeño, la tabla 4.10 presenta los distintos valores de SNR para cada MCS y valor de BER requerido.

MCS	SNR (dB)		
	BER 0,01	BER 0,0001	BER 0,000001
QPSK 1/2	0,5	2,5	4
QPSK 2/3	2,4	3,8	5,4
QPSK 3/4	3	5	6,5
QPSK 5/6	4,5	6,5	8
16-QAM 1/2	3,5	6	7,2
16-QAM 2/3	5,5	7,5	9,2
16-QAM 3/4	6,8	8,8	10,8
16-QAM 5/6	8	10,2	12
64-QAM 1/2	7	9	11,5
64-QAM 2/3	9	11,5	13,2
64-QAM 3/4	10,5	13	14
64-QAM 5/6	12	14,5	16

Tabla 4.10 SNR Requerido para el MCS y BER Relacionados.



4.7 Red definitiva

Tomando como caso de estudio el CPE con el peor desempeño en cuanto a nivel de recepción se refiere, se toma el CPE 6 como el CPE sobre el cual se hace el análisis de los requerimientos de potencia del equipo para mantener el nivel de SNR adecuado que permita garantizar banda ancha.

Teniendo en cuenta la sensibilidad del equipo en -93dBm , todo valor por debajo de esta sensibilidad es considerada como señal no útil, por lo que el umbral de detección de señal útil se fija en este valor. El requerimiento de SNR máximo para utilizar 64-QAM 5/6 es de 16 dB, por lo cual:

$$\text{Potencia de Rx requerida} = -93\text{dBm} + 16\text{dB}$$

$$\text{Potencia de Rx requerida} = -77\text{ dBm}$$

4.7.1 Cálculo de la Potencia de Transmisión para DL

Las pérdidas totales del sistema, son de 104 dB, calculadas en la sección 3.7 y son todas las perdidas presentes en el trayecto de la BS hasta el equipo del CPE6 (peor caso). Quiere decir esto que la potencia de recepción del equipo en CPE6, se determina por:

$$P_{rx} = -77\text{dBm} + 104\text{ dB}$$

$$P_{tx} = 27\text{ dBm}$$

La tabla 4.11 muestra los requerimientos de potencia de transmisión del equipo de la BS para garantizar el cumplimiento de cada uno de los MCS para el CPE6.

MCS	BER 0,01	PTx (dBm)	BER 0,0001	PTx (dBm)	BER 0,000001	PTx (dBm)
QPSK 1/2	0,5	11,5	2,5	13,5	4	15
QPSK 2/3	2,4	13,4	3,8	14,8	5,4	16,4
QPSK 3/4	3	14	5	16	6,5	17,5
QPSK 5/6	4,5	15,5	6,5	17,5	8	19
16-QAM 1/2	3,5	14,5	6	17	7,2	18,2
16-QAM 2/3	5,5	16,5	7,5	18,5	9,2	20,2
16-QAM 3/4	6,8	17,8	8,8	19,8	10,8	21,8
16-QAM 5/6	8	19	10,2	21,2	12	23
64-QAM 1/2	7	18	9	20	11,5	22,5
64-QAM 2/3	9	20	11,5	22,5	13,2	24,2
64-QAM 3/4	10,5	21,5	13	24	14	25
64-QAM 5/6	12	23	14,5	25,5	16	27

Tabla 4.11 Requerimiento de Potencia de Transmisión de BS para los distintos MCS

Siendo la potencia de transmisión de la BS en el peor escenario de 27 dBm o 502.1 mW.



4.7.2. Cálculo de la Potencia de Transmisión para UL

Con base en la tabla 4.9 donde se relaciona el *Throughput* obtenido para cada valor de BER objetivo, el requerimiento de este valor para los 12 CPEs de la red, se determina por:

$$512 \text{ Kbps} * 12 = 6,144 \text{ Mbps}$$

Infiriendo así, que el MCS que garantiza este valor para todo el sistema, es QPSK 5/6. Se obtiene la tabla 4.12 con los valores de potencia del equipo del CPE6 que garantizan el *Throughput* en el enlace de subida.

MCS	BER 0,01	PTx (dBm)	BER 0,0001	PTx (dBm)	BER 0,000001	PTx (dBm)
QPSK 1/2	0,5	11,5	2,5	13,5	4	15
QPSK 2/3	2,4	13,4	3,8	14,8	5,4	16,4
QPSK 3/4	3	14	5	16	6,5	17,5
QPSK 5/6	4,5	15,5	6,5	17,5	8	19

Tabla 4.12 Potencias de Transmisión del CPE para los distintos MCS y BER en UL.

Siendo la potencia de transmisión máxima en del CPE en UL de 19 dBm o 79.43 mW.

Teniendo en cuenta TDD y la asignación de recursos para los CPEs, se garantiza banda ancha para al menos, uno de éstos cumpliendo así con el segundo objetivo del presente trabajo de grado. Esto, debido a que TDD utiliza el mismo canal tanto para DS como para US en períodos de tiempo que se alternan de acuerdo con los requerimientos propios de los usuarios. Así las cosas, si en un período de tiempo se tiene un *throughput* A en el enlace de bajada y en otro período de tiempo se tiene un *throughput* B, el *throughput* en ese tiempo total, resultaría de la división de la suma de los *throughputs* A y B entre este tiempo total, dando así, que para el peor caso con QPSK 1/2 y BER de 10^{-6} garantiza banda ancha en al menos un CPE.



5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

A continuación se presentan las conclusiones que se obtuvieron con la realización de este trabajo de grado, y se plantean algunas ideas que pueden ser tenidas en cuenta a futuro para darle continuidad al estudio del estándar IEEE 802.22 y su posible aplicación como solución de banda ancha en el Departamento del Cauca. Asimismo, se dan unas recomendaciones basadas en la realización de este trabajo de grado.

5.1 Conclusiones

i. Respecto a la Literatura Consultada

- A pesar de que en la literatura está ampliamente difundido el valor de 18 Mbps como la velocidad de transferencia del sistema resultante de una eficiencia espectral de 3 bps/Hz, la velocidad de transferencia del sistema se debe calcular utilizando los parámetros de OFDMA descritos en el capítulo 2 para lograr obtener una velocidad de transferencia efectiva.
- La modulación y codificación definidas en el estándar IEEE 802.22 sumado a las características cognitivas que posee WRAN, permiten una flexibilidad y dinamismo que otras tecnologías no ofrecen. Con las características cognitivas de WRAN, se pueden asignar distintos MCS para los usuarios dependiendo de las necesidades de cada uno.
- Debido a que en Colombia existen muchos espacios en blanco dentro del espectro asignado a la TV analógica, es posible la utilización de WRAN sin riesgo a interferencia en distintos canales.

ii. Respecto al Diseño y la Cobertura de la Red

- No es viable realizar un balance de enlace con los modelos de propagación existentes de manera teórica. Esta es una de las razones por las que el estándar IEEE 802.22 no ha tenido la suficiente acogida, pues, para lograr diseñar una red WRAN, se debe recurrir a Software que contenga algoritmos para la utilización de los parámetros indicados en el WG 802.22.
- La implementación real de un sistema WRAN requiere el análisis de múltiples variables más allá de la zona de cobertura y la velocidad *de transferencia* del sistema, pues, debe analizarse el entorno radio y la funcionalidad de las características cognitivas que ofrece la CR dentro del estándar.
- Debido a la flexibilidad que caracteriza a la CR, no es posible fijar de manera estática los parámetros de frecuencia y potencia de transmisión ya que estos cambian para adaptarse al ambiente de radio frecuencia que exista en la zona.

iii. Respecto al *Throughput* del Sistema

- Con base en los indicadores emitidos por la CRC, WRAN se constituye en una buena alternativa comercial para la prestación del servicio de banda ancha en zonas rurales.



- Entre más alto sea el requerimiento de esquemas de modulación y codificación, más vulnerable es el sistema a la afectación del ruido. Esto implica que para cumplir con objetivos de calidad propuestos, se necesita aumentar la SNR por lo que se debe aumentar la potencia de transmisión.

5.2 Recomendaciones

- Se debe propender por el uso de bajas frecuencias ya que esto reduce las pérdidas de propagación y permite niveles de recepción más altos en la zona de cobertura. Además, entre menor sea la frecuencia, se necesita menos potencia de transmisión.
- Considerar siempre la flexibilidad de CR para el diseño de las redes WRAN, ya que el sistema no va a funcionar siempre a la misma frecuencia y la misma potencia sino que éstas cambian de acuerdo al ambiente de radio frecuencia que se detecte en la zona.

5.3 Trabajos Futuros

- Realizar un diseño de red WRAN para cubrir las zonas rurales del Departamento del Cauca haciendo uso de varias estaciones base para utilizar el modo de auto-coexistencia definido en la capa MAC del sistema.
- Diseñar un simulador que permita integrar todos los parámetros para la predicción de cobertura y que a la vez permita un análisis de la velocidad de transferencia del sistema.
- Desarrollar un modelo de propagación que permita predecir de manera teórica el comportamiento que tendría una red WRAN teniendo en cuenta que los modelos existentes en la literatura se quedan cortos para este fin.
- Diseñar una red WRAN que utilice más de un canal para transmitir haciendo uso de la técnica de unión de canales que permita mejorar la velocidad de transferencia del sistema para ofrecer mayores anchos de banda.
- Realizar el cálculo del *throughput* para los canales de 7 y 8 MHz.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Saravia, «Ideas para repensar la conectividad en áreas rurales,» de *Foro Virtual Internacional*, 2003.
- [2] Ministerio de la Información y las Telecomunicaciones, «Compartel,» 2003. [En línea]. Available: www.comparte.gov.co.
- [3] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, «MinTic,» 2010. [En línea]. Available: vivedigital.gov.co/marco_del_plan_1_plan_vive_digital.php. [Último acceso: 2012].
- [4] J. Pelayo, L. Aguirre, K. Hernández, «Transmisión en Banda Ancha para Zonas Rurales,» de *8th LACCEI, Latinoamerican and Caribbean Conference for Engeneering and Technology 2010*, Arequipa.
- [5] C. Pozo, «*WiMax: Banda ancha móvil y comparación con HSDPA*,» Santiago de Chile: Universidad Mayor, 2007.
- [6] C. Cordeiro, K. Challapali, D. Birru and S. Shanka, «IEEE 802.22: The first worldwide wireless standard based on cognitive radios,» in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, Baltimore, Maryland, USA, 2005.
- [7] A. Rendón, M. Dulcey, A. Holguín, R. Schoemaker, F. Bohórquez, D. López, «EHAS: Una Plataforma Integral para la Prestación de Tele-Servicios a Comunidades Rurales,» *Revista Colombiana de Telecomunicaciones*, nº 10, 2010.
- [8] A. Galvis, A. Ospina, A. Gutierrez, Oscar Herrera, «WRAN and LTE Comparison in Rural Enviroments,» de *Colombian Conference on Communications and Computing COLCOM*, Medellín, 2012.
- [9] C. Stevenson, G. Shouinard, Z. Lei, W. Hu, S. J. Shellhammer, W. Caldwell, «IEEE 802.22: An Introduction to the First Wireless Standard based on Cognitive Radios,» *Journal of Communications*, vol. 1, nº 1, 2006.
- [10] D. Zagar y V. KriZanovic, «Analyses and Comparisons of Technologies for Rural Broadband Implementation,» de *Software, Telecommunications & Computer Networks, 2009. SoftCOM 2009. 17th International Conference on*, Osijek, Croatia, 2009.
- [11] IEEE 802.22 Working Group on Wireless Regional Area Networks , «*IEEE P802.22 Standard for Wireless Regional Area Networks Part 22: Cognitive ireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*,» 2011.
- [12] Y.-C. Liang, A. T. Hoang y H.-H. Chen, «Cognitive Radio on TV Bands: a New Approach to Provide Wireless Connectivity for Rural Areas,» *IEEE Wireless Communications Magazine*, vol. XV, nº 3, pp. 16-22, Junio 2008.



- [13] S. Haykin, «Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communication,» *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, vol. 23, nº 2, 2005.
- [14] S. B. Luz y P. C. de Oliveira, «Padrão IEEE 802.22 Para Redes Sem Fio Baseadas em Rádio Cognitivo: Uma Revisão,» *Visión Electrónica*, vol. V, nº 2, pp. 129-136, Diciembre 2011.
- [15] G. Chouinard, A. Mody, *doc.*: «IEEE 802.22-10/0073r03 Enabling Rural Broadband Wireless Access Using Cognitive Radio Technology,» Ottawa: IEEE, 2010.
- [16] S. M. Kumar, M. Balajee, M. Ravi Kumar, «A Survey on Rural Broadband Wireless Access Using Cognitive Radio Technology: IEEE 802.22 Wireless Regional Area Network» *Universal Journal of Communication and Network*, vol. 1, nº 1, pp. 21-37, 2013..
- [17] F. Guerrero, «Introducción a la Televisión Digital en Colombia: Aspectos Técnicos y Económicos,» Cali: Universidad del Valle.
- [18] *Wireless Regional Area Networks (WRAN)— «Specific Requirements Part 22.2: Installation and Deployment of IEEE 802.22 Systems,»* Nueva York: IEEE, 2012.
- [19] J. V. Padilla, «W-Spaces TV Tecnología de canal de retorno para el estándar DVB-T mediante el uso de WRAN,» Santiago de Cali: Universidad Icesi, 2012.
- [20] G. Chouinard, *doc.*: «IEEE 802.22-04/0002r18 WRAN reference model,» Ottawa, 2011.
- [21] M. Coupechoux, P. Godlewski, J-M. Kelif, «On the Dimensioning of Cellular OFDMA Networks,» *Elsevier Physical Communications*, vol. 1, nº 5, 2012.
- [22] N. Suzuki, «BB Watch,» 2001. [En línea]. Available: <http://bb.watch.impress.co.jp/column/infra/2001/09/26/>.
- [23] «digi-tv.dk,» [En línea]. Available: http://www.digi-tv.dk/sendennettets_opbygning/sikkerhed_og_modulation.asp.
- [24] I. c. society, « Part 22.2: Installation and Deployment of IEEE 802.22 Systems,» Nueva York: IEEE, 2012.
- [25] FCC, «Third Memorandum Opinion and Order, » Washington, 2012.
- [26] Emicauca: Mina de Azufre Natural, «Emicauca,» [En línea]. Available: <http://www.emicauca.com/>.
- [27] Comisión de Regulación de Comunicaciones, «Resolución 3067 de 2011, » 2011.
- [28] E. P. Simancas, «Análisis del estándar IEEE 802.22 y su posible implementación en Ecuador, » Quito: Universidad Politécnica Nacional, 2006.



- [29] G. Chouinard, *doc.*: «*IEEE 802.22-06/0246r6 OFDMA parameters*, » Ottawa, 2008.
- [30] J. Cabero, *Las TICS: una consciencia global en la educación*, Sevilla: Universidad de Sevilla, 2002.
- [31] J. M. Huidobro, «Radio Cognitiva. La radio se vuelve inteligente,» *Antena de Telecomunicaciones*, 2011.
- [32] D. M. Goussal, «Planeamiento de sistemas de banda ancha rural inalámbrica basados en redes de coexistencia y radios cognitivas en ambiente IEEE 802.22,» Universidad del Nordeste, Argentina, 2010.
- [33] J. Sung Um, M. Sun Song, C. Joo Kim, H. Rae Park, Y. Hee Kim, S. Hyun Hwang, «Design and verification of IEEE 802.22 WRAN physical layer,» de *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*, Singapur, 2008.
- [34] A. Franklin. Y. Sung-Jin P. Jin-Suk, S. Myung-Sun, K. Chang-Joo, K. GwaanZeen., «Channel manangement in IEEE 802.22 WRAN Systems,» *Communication Magazine*, vol. 48, nº 9, pp. 88-94, 2010.
- [35] A. Navarro. J. H. Aguilar, «Radio Cognitiva - Estado del Arte,» *Revista de Sistemas y Telemática*, vol. 9, nº 16, pp. 31-53, 2011.
- [36] B. Salguero, *Propuesta de Metodología de Diseño de Redes Inalámbricas Extensas de Banda Ancha para Zonas Aisladas en Países en Vías de Desarrollo*, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2009.
- [37] S. Shellhammer, «Spectrum Sensing in IEEE 802.22,» 2006.
- [38] A. Miñiarro, «LTE/SAE, Una Apuesta Segura en la Evolucion de las Redes Móviles,» Junio 2009. [En línea]. Available: http://coitt.es/res/revistas/08c_Rep_LTE_MN3.pdf.
- [39] D. Wright, «Network, Dynamic Spectrum Access in the IEEE 802.22 Wireless Regional Area,» de *Access Networks & Workshops, 2007*, Ottawa, 2007.
- [40] B. Bing, «Broadband Wireless Multimedia Networks, » Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, Hoboken, New Jersey, 2013.
- [41] M. J. Nawrocki, M. Dohler, A. H. Aghvami «Undertanding UTMS Radio Network, Modeling, Planning and Automated Optimization, » England, 2006.
- [42] M. Ahmadi, E. Rohani, P. M. Naenni, S. M. Fakhraie «Modelling and Performance Evaluation of IEEE 802.22 Physical Layer, » 2009.
- [43] G. Chouinard«WRAN Receiver Perfomance, » Communications Research Centre, Canada, 2009.
- [44] O. Gonzalo, C. Mora, H. Ramiro «*Estudio de la Eficiencia Espectral para Sistemas de Comunicaciones Moviles de Tercera Generacion UMTS*, » Sangolquí, 2009.
- [45] J. G. Proakis, «*Digital Communications*,» Fourth Edition, Published by McGraw, 2001.



ANEXOS

ANEXO A. VARIACIÓN DE FRECUENCIA

Como se describió en la sección 2.4.1 del documento, Radio Mobile utiliza una frecuencia media entre la frecuencia máxima y mínima con que se configura el sistema (862 y 54 MHz respectivamente) de 485 MHz. En este apartado se prueba el comportamiento del sistema transmitiendo con las frecuencias mínima y máxima para analizar la variación de la potencia de recepción en el CPE6.

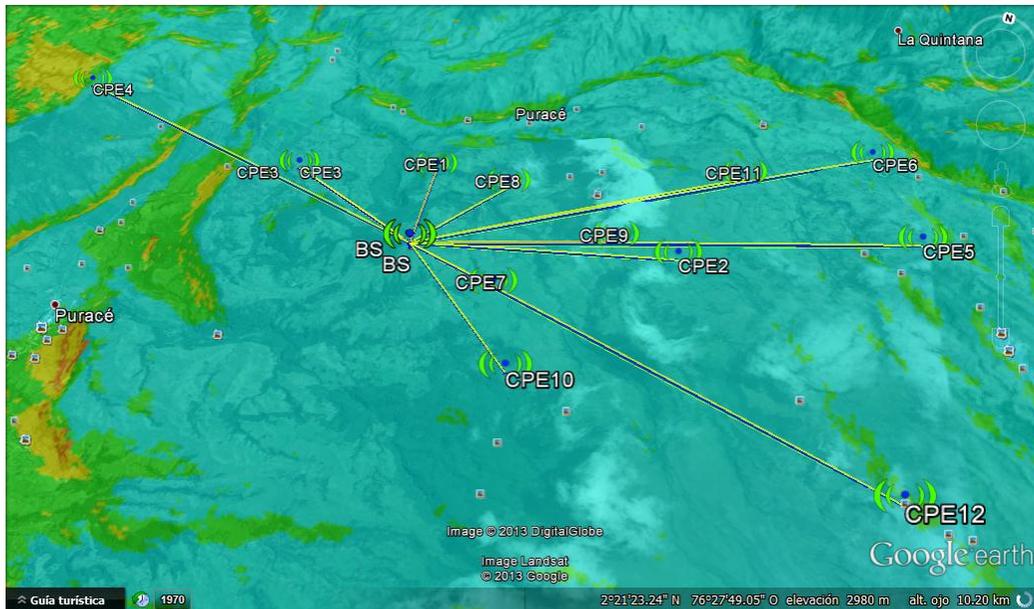


Figura A.1 Niveles de Recepción con una Frecuencia de 54 MHz.

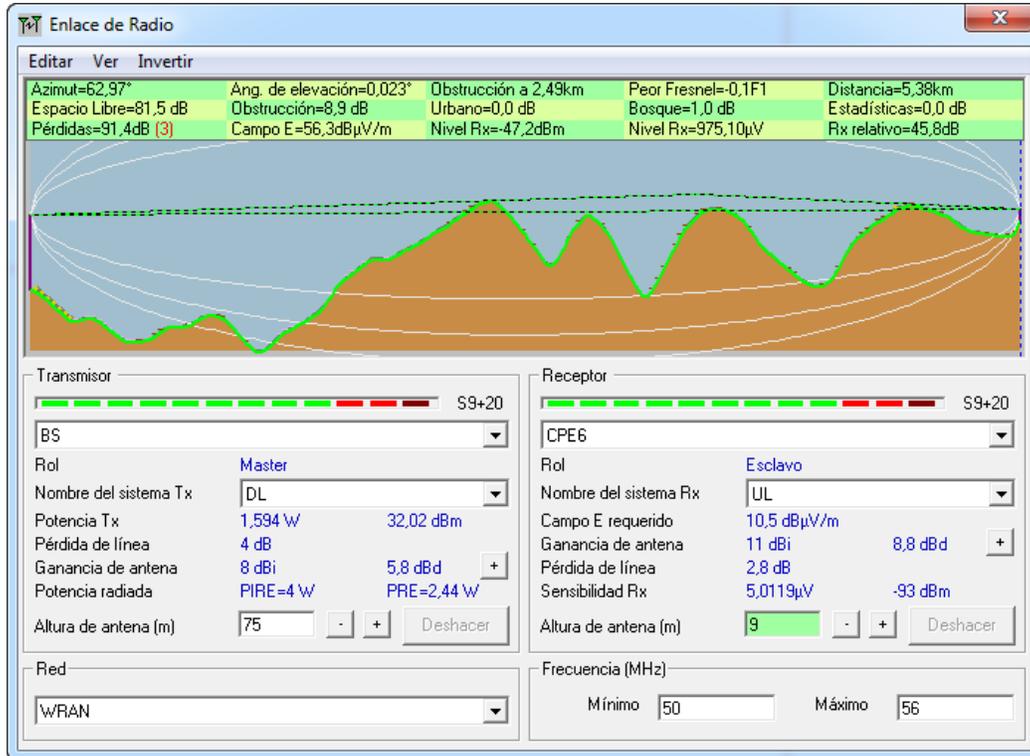


Figura A.2 Parámetros del Estado del Enlace con una Frecuencia de 54 MHz.

La figura A.2 demuestra que las pérdidas de propagación disminuyen considerablemente al utilizar una frecuencia baja por lo que los niveles de recepción altos (encima de -57 dBm) están presentes en una gran área incluso en puntos de NLOS.

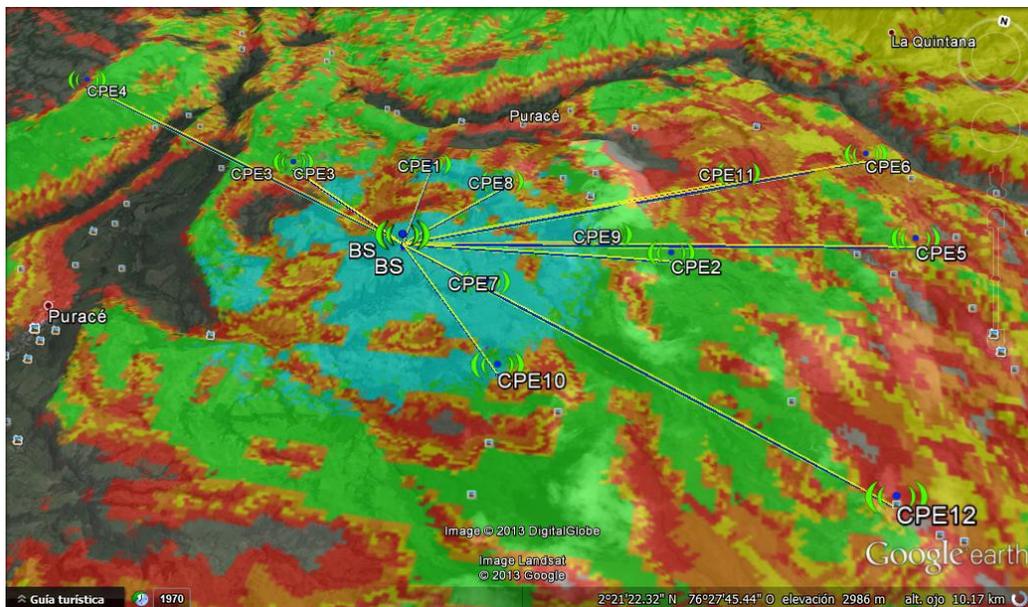


Figura A.3 Niveles de Recepción para una Frecuencia de 862 MHz.

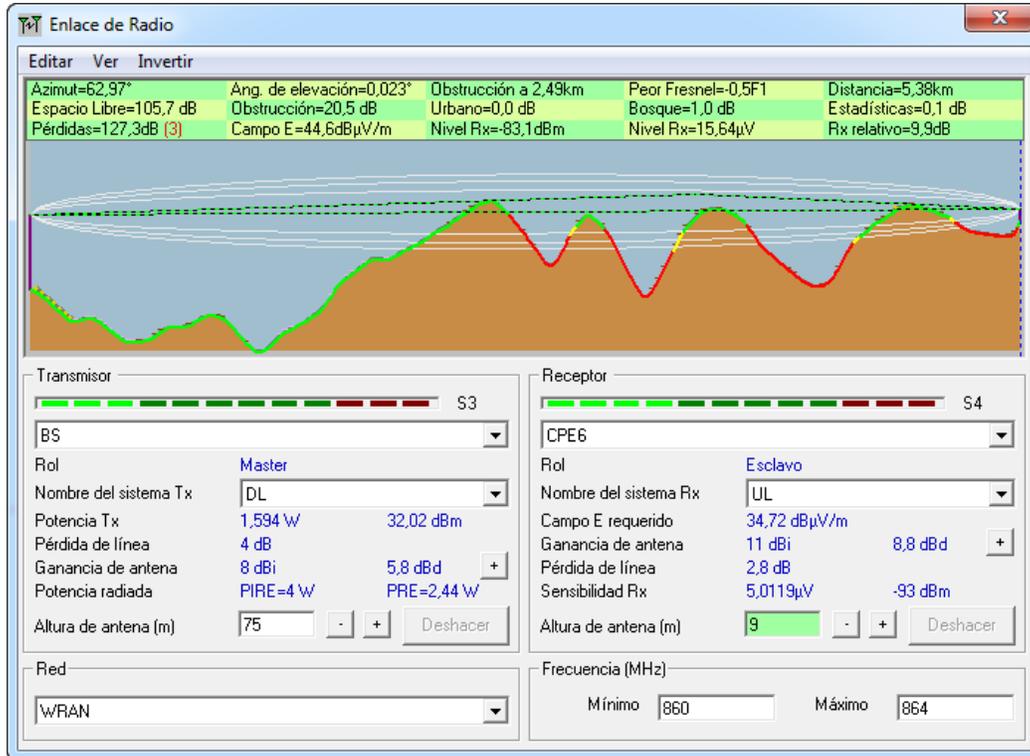


Figura A.4 Parámetros de Estado del Enlace para una Frecuencia de 862 MHz.

En la figura A.3 se puede observar que los niveles de recepción se deterioran de manera considerable cuando la frecuencia se eleva. Esto demuestra la relación directa que existe entre la frecuencia y las pérdidas de propagación. No es aconsejable, por tanto, utilizar frecuencias muy altas ya que éstas exigen niveles de potencia mayores para lograr cubrir grandes zonas (que es la finalidad de WRAN).

La figura A.4 demuestra que la potencia de recepción disminuye al aumentar la frecuencia de transmisión.