

**CRITERIOS TÉCNICOS PARA EL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE WiFi Y WiMAX
COMO SOLUCIONES DE ACCESO METROPOLITANO DE BANDA ANCHA PARA EL
ENTORNO COLOMBIANO**



DIEGO ALEJANDRO ESCOBAR LEDESMA

DARWIN ARLEY RENDÓN CHACON

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT
Línea de investigación: Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de
Telecomunicaciones
Popayán
2007**

**CRITERIOS TÉCNICOS PARA EL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE WiFi Y WiMAX
COMO SOLUCIONES DE ACCESO METROPOLITANO DE BANDA ANCHA PARA EL
ENTORNO COLOMBIANO**



DIEGO ALEJANDRO ESCOBAR LEDESMA

DARWIN ARLEY RENDÓN CHACON

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

Director

ING. GUEFRY AGREDO MÉNDEZ

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT
Línea de investigación: Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de
Telecomunicaciones
Popayán
2007**

*A mis padres por su apoyo incondicional en los momentos
Más difíciles de esta hermosa pero complicada carrera.
A los excelente amigos y compañeros que conocí durante ella,
Sin todos ellos el transcurso y trasegar hubieran sido aún más difíciles.
A Dios por haberme dado esta grandiosa oportunidad y por haberme dado
Fuerza en aquellas interminables horas de estudio.*

Diego Alejandro

*A Dios y a mis padres por brindarme las fuerzas y
El apoyo necesario para salir adelante con todos mis proyectos.
A mis familiares, amigos y compañeros por ofrecerme
Su ayuda y amistad incondicional.*

Darwin Arley

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, y en especial a todos los profesores de la carrera por la excelente formación que recibimos y que ha hecho que muchas generaciones de Ingenieros se distingan en el mundo laboral tanto a nivel nacional como a nivel internacional.

Agradecemos especialmente a aquellos profesores que durante el transcurrir de los semestres nos introdujeron en el mundo de las redes inalámbricas y que gracias a su dedicación y pasión por el trabajo, hayamos hecho de esta rama de la ingeniería nuestra línea de trabajo:

Ing. Guefry Ágrede

Ing. Pedro Vera

Ing. Aldemar Holguin

Ing. Harold Romo

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	15
1. CONCEPTOS BÁSICOS DE RADIO Y RF PARA EL DISEÑO DE REDES WIFI Y WIMAX	18
1.1. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	18
1.2. TRANSMISIÓN Y GENERACIÓN RF	19
1.3. RECEPCIÓN RF.....	24
1.4. MODULACIÓN DE SEÑALES RF.....	26
1.4.1. Modulación Compleja.....	26
1.5. DUPLEXACIÓN	29
1.6. OFDM	31
1.7. PROPAGACIÓN	33
1.8. TOPOLOGIAS DE RED	34
1.9. PLANIFICACIÓN Y RE-USO DE FRECUENCIA.....	36
2. CARACTERIZACIÓN DE LOS ESCENARIOS URBANOS COLOMBIANOS UTILIZADOS COMO REFERENCIA	41
2.1. DEFINICIONES	41
2.2. CALI.....	42
2.2.1. Ubicación Geográfica y Superficie	43
2.2.2. Características Demográficas	43
2.2.3. Características Topográficas.....	46
2.2.4. Usos de Suelo.....	47
2.3. PALMIRA.....	48
2.3.1. Ubicación Geográfica y Superficie	49
2.3.2. Características Demográficas	49
2.3.3. Características Topográficas.....	52
2.4. POPAYÁN	53
2.4.1. Ubicación Geográfica y Superficie	54

2.4.2.	Características Demográficas	54
2.4.3.	Características Topográficas.....	58
2.4.4.	Usos de Suelo.....	58
2.5.	TULUÁ.....	60
2.5.1.	Ubicación Geográfica y Superficie	60
2.5.2.	Características Demográficas	61
2.5.3.	Características Topográficas.....	64
2.5.4.	Usos de Suelo.....	64
3.	ANÁLISIS DEL MARCO REGULATORIO EN LA PRESTACIÓN DE SERVICIOS WIFI Y WIMAX EN COLOMBIA	66
3.1.	BANDAS DE FRECUENCIA Vs. TECNOLOGÍA	66
3.2.	REGULACIONES Y LEYES QUE AFECTAN EL DESPLIEGUE DE REDES 802.11 Y 802.16 EN COLOMBIA	70
3.2.1.	Bandas sin licencia.	70
3.2.2.	Bandas licenciadas	76
3.3.	RESUMEN Y CONSIDERACIONES GENERALES	81
4.	CRITERIOS TÉCNICOS PARA EL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE REDES WIFI Y WIMAX COMO SOLUCIONES DE ACCESO METROPOLITANO EN COLOMBIA.....	85
4.1.	MODELO DE TRABAJO	85
4.1.1.	Desarrollo del modelo.	86
4.2.	FASE 1: DEFINICIÓN DEL MODELO DE NEGOCIO	89
4.2.1.	Identificación del área de cobertura.	89
4.2.2.	Recolección de información demográfica.....	91
4.2.3.	Servicios.	91
4.2.4.	Selección de la frecuencia de operación.....	94
4.3.	FASE 2: MODELADO DEL SISTEMA	96
4.3.1.	Selección del Sistema.....	96
4.3.2.	Modelado del Presupuesto del Enlace.	103
4.3.3.	Cálculos de Propagación.	103
4.3.4.	Realización de un <i>Site Survey</i>	104
4.4.	FASE 3: MODELADO DE LA CAPACIDAD	105
4.4.1.	Identificación de la cantidad de usuarios potenciales.....	105
4.4.2.	Identificación del porcentaje esperado de penetración.....	105
4.4.3.	Planeación de Capacidad.	107

4.4.4.	Planeación de Cobertura.	114
4.5.	FASE 4: IDENTIFICACIÓN DE LOS EMPLAZAMIENTOS Y PROPIEDADES INMOBILIARIAS	115
4.6.	FASE 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	117
4.7.	FASE 6: PUESTA EN MARCHA DE LA RED.....	118
4.7.1.	Modelado del Costo.	118
4.7.2.	Adquisición de equipos.	118
4.7.3.	Capacitación de Personal.	119
4.7.4.	Instalación.....	120
4.7.5.	Operación de la red.....	123
4.7.6.	Optimización.	125
5.	ESTRATEGIAS PARA EL ÉXITO DE IMPLEMENTACIÓN DE REDES INALÁMBRICAS DE BANDA ANCHA EN COLOMBIA.....	126
5.1.	SERVICIOS INALÁMBRICOS EN COLOMBIA	126
5.2.	PROYECCIONES.	129
5.3.	ESTRATEGIAS DE ÉXITO	131
5.3.1.	Proveedores de Servicio.	132
5.3.2.	Servicios de Valor Agregado – La clave para la supervivencia.	135
5.3.3.	Estrategia de Éxito: Gobierno y Entidades Reguladoras.	137
	CONCLUSIONES.....	142
	BIBLIOGRAFÍA.....	147

ANEXOS

ANEXO A. MODELOS DE PROPAGACIÓN UTILIZADOS

ANEXO B. CÁLCULOS DE PROPAGACIÓN Y COBERTURA

ANEXO C. DEFINICIÓN DEL MARCO DE TRABAJO

ANEXO D. RESUMEN CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS WiFi Y WiMAX

ANEXO E. MANUAL HERRAMIENTA WiCALCULATOR V 1.0

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1-1. Asignación de bandas de frecuencia.....	19
Tabla 1-2. Técnicas de modulación digitales.....	27
Tabla 2-1. Aspectos Demográficos de Cali.	46
Tabla 2-2. Aspectos Demográficos de Palmira.	52
Tabla 2-3. Aspectos Demográficos de Popayán.	57
Tabla 2-4. Tipos de Usos del Suelo - Popayán.	59
Tabla 2-5. Aspectos Demográficos de Tuluá.....	63
Tabla 3-1. Resumen de la asignación mundial de frecuencias para WiMAX.	67
Tabla 3-2. Primeros perfiles de sistemas para la certificación WiMAX.	68
Tabla 3-3. Asignación de canales para 802.11 b/g.....	69
Tabla 3-4. Asignación del espectro para la banda ISM y U-NII.	70
Tabla 3-5. Bandas de frecuencia de uso libre en Colombia.	71
Tabla 3-6. Cuadro de Ganadores licencias WiMAX departamentales.	81
Tabla 4-1. Caracterización de las diferentes áreas geográficas.	90
Tabla 4-2. Caracterización de las bandas de frecuencia disponibles para WISP's.....	95
Tabla 4-3. Matriz DOFA de WiFi.	97
Tabla 4-4. Matriz DOFA de WiMAX.	98
Tabla 4-5. Asignación de canales utilizada para la banda A WiMAX en FDD.....	113
Tabla 4-6. Algunos rubros para el presupuesto operativo y de capital.	118
Tabla 5-1. Recomendaciones Gobierno y Entes Reguladores.	140
Tabla 5-2. Recomendaciones Gobierno y Entes Reguladores.	141

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura I-1 Estructura del Trabajo de Grado.....	16
Figura 1-1. Diagrama en bloques de un transmisor.....	20
Figura 1-2. Analogía de objetos convencionales con patrones de radiación.	23
Figura 1-3. Patrón de radiación de una antena directiva de 8° y 24 dBi, y una antena sectorial de 120° y 14 dBi.	24
Figura 1-4. Diagrama en bloques del receptor.	25
Figura 1-5. Comparación de las modulaciones.	28
Figura 1-6. Modulación adaptativa de WiMAX.	28
Figura 1-7. Duplexación FDD.....	30
Figura 1-8. Duplexación TDD.....	30
Figura 1-9. OFDM.....	31
Figura 1-10. Comparación de las técnicas OFDM y OFDMA.	33
Figura 1-11. Ejemplo de una red inalámbrica en configuración PTM.....	35
Figura 1-12. Técnica de re-uso de canales en un mismo emplazamiento.	37
Figura 1-13. Formas geométricas para la planeación de cobertura.....	38
Figura 1-14. Patrones de re-uso más utilizados.....	39
Figura 1-15. Patrón de celdas rectangulares.....	39
Figura 2-1. Mapa Zona Urbana de Cali.	43
Figura 2-2. Mapa Tamaño de los Hogares – Cali.....	44
Figura 2-3. Mapa Tipología de Vivienda – Cali.....	44
Figura 2-4. Mapa Unidades Económicas – Cali.	45
Figura 2-5. Mapa Modelo Digital del Terreno - Cali.	47
Figura 2-6. Mapa Usos del Suelo – Cali.....	48
Figura 2-7. Mapa Zona Urbana de Palmira.	49
Figura 2-8. Mapa Tamaño de los Hogares – Palmira.....	50
Figura 2-9. Mapa Tipología de Vivienda – Palmira.....	51
Figura 2-10. Mapa Unidades Económicas – Palmira.....	51
Figura 2-11. Mapa Modelo Digital del Terreno - Palmira.	53

Figura 2-12. Mapa Zona Urbana de Popayán.	54
Figura 2-13. Mapa Tamaño de los Hogares – Popayán.	55
Figura 2-14. Mapa Tipología de Vivienda – Popayán.	56
Figura 2-15. Mapa Unidades Económicas – Popayán.	57
Figura 2-16. Mapa Modelo Digital del Terreno - Popayán.	58
Figura 2-17. Mapa Usos del Suelo – Popayán.	59
Figura 2-18. Zona Urbana de Tuluá.	60
Figura 2-19. Mapa Tamaño de los Hogares – Tuluá.	61
Figura 2-20. Mapa Tipología de Vivienda – Tuluá.	62
Figura 2-21. Mapa Unidades Económicas – Tuluá.	63
Figura 2-22. Mapa Modelo Digital del Terreno – Tuluá.	64
Figura 2-23. Mapa Usos del Suelo – Tuluá.	65
Figura 3-1. Canalización de la banda de 3.5 GHz en Colombia.	77
Figura 3-2. Canalización de la banda 3.5 GHz según resolución 2064 de 2005.	78
Figura 4-1. Parámetros técnicos más relevantes para el diseño de una red inalámbrica metropolitana.	86
Figura 4-2. Diagrama del proceso propuesto para la planeación, diseño e implementación de la red.	88
Figura 4-3. Arquitectura de red VoIP + Red de Acceso Inalámbrica.	94
Figura 4-4. Diagrama general arquitectura red inalámbrica metropolitana WiMAX- WiFi.	101
Figura 4-5. Tasa de adopción del mercado para una nueva tecnología.	106
Figura 4-6. Estación base de 6 sectores con capacidad flexible.	112
Figura 4-7. Diagrama re-uso de frecuencia recomendado para la banda A de 3.5 GHz.	114
Figura 4-8. Diagrama de flujo para la selección de los emplazamientos.	116
Figura 4-9. Diagrama típico de instalación de un CPE WiMAX <i>outdoor</i>	122
Figura 5-1. Modelo de brechas a ser cubiertas en Latinoamérica.	128
Figura 5-2. Proyecciones de penetración de Banda ancha y Accesos Inalámbricos.	130
Figura 5-3. Ejemplos de VAS.	136

ACRÓNIMOS

AM	Modulación por Amplitud
AP	Access Point – Punto de Acceso.
ARQ	Automatic request for retransmission – Petición automática de retransmisión.
BE	Best Effort – Tipo de servicio con bajos requerimientos de calidad de servicio.
BRI	Basic Rate Interface – 2x64 Kbit + 1x16 Kbit.
BPSK	Binary Phase Shift Keying – Modulación de cambio de fase binaria.
BS	Base Station – Estación base.
CAPEX	Capital Expensive – Gastos de Capital.
CBR	Constant Bit Rate – Tipo de servicio con tasa de bits constante.
CDMA	Code Division Multiple Access – Acceso múltiple por división de código.
CIR	Committed Information Rate – Tasa de información garantizada.
CPE	Customer Premises Equipment – Dispositivo cliente.
CRT	Comisión de Regulación de Telecomunicaciones colombiana.
DANE	Departamento Nacional de Estadística.
DFS	Dynamic Frequency Selection - Selección dinámica de frecuencia.
DOFA	Matriz de Debilidades – Oportunidades – Fortalezas – Amenazas.
DSL	Digital Subscriber Line – Línea digital del suscriptor.
DSP	Digital Signal Processing – Procesamiento digital de señales.
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum – Espectro ensanchado por secuencia directa.
EM	Espectro Electromagnético.

E&M	Ear and mouth – Puerto de las centrales telefónicas con capacidades trunking.
ERE	Espectro Radioeléctrico.
FDD	Frequency Division Duplex – Duplexación por división de frecuencia.
FEC	Forward Error Correction – Corrección de errores hacia adelante.
FFT	Fast Fourier Transform – Transformada rápida de fourier.
FHSS	Frequency Hop Spread Spectrum – Espectro ensanchado por salto frecuencia.
FM	Modulación por frecuencia.
FPGA	Field Programmable Gate Array – Arreglo de compuertas programable.
FXS	Foreign Exchange Subscriber – Puerto telefónico convencional de la central que va hacia el usuario.
FXO	Foreign Exchange Office – Puerto telefónico convencional del teléfono que va hacia la central.
GSM	Global System for Mobile Communications – Sistema global para Comunicaciones móviles.
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers - Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
IP	Internet Protocol – Protocolo de Internet.
IFFT	Inverse Fourier Transform – Transformada Inversa de Fourier.
ISP	Internet Service Provider – Proveedor de servicio de Internet.
LOS	Line of Sight – Línea de vista.
MSS	Mobile Satellite System – Sistema de satélites móviles.
MST	Maximun Sustained Traffic – Tasa máxima de trafico sostenido.
MAC	Medium Access Control – Control de acceso al medio.
NLOS	Non Line of Sight – Sin línea de vista.

OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing – Multiplexación ortogonal por división de frecuencia.
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access – Acceso múltiple por división de frecuencia.
OPEX	Operative Expensive – Gastos Operativos.
O&M	Operation and Maintenance – Operación y mantenimiento.
OEM	Original Equipment Manufacturers – Fabricantes directos de equipos.
OSR	Over Subscription Rate – Factor de sobre suscripción.
PAN	Personal Area Network – Red de Área Personal.
PBX	Private Branch Exchange – Central telefónica privada.
PHY	OSI Physical Layer – Capa física del modelo OSI.
PM	Modulación por Fase.
PRI	Primary Rate Interface – 30x64 Kbit + 1x64 K bit
PTP	Point to Point – Punto a punto.
PTM	Point to Multipoint – Punto a multipunto.
PIRE	Potencia Isotropica Radiada Efectivamente.
POE	Power Over Ethernet – Potencia sobre Ethernet.
POT	Plan de Ordenamiento Territorial.
P2P	Peer to Peer – Extremo a extremo.
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying – Modulación de cambio de fase en cuadratura.
QAM	Quadrature Amplitud Modulation – Modulación de cambio de amplitud cuadratura.
QoS	Quality of Service – Calidad de Servicio.
RDSI	Red Digital de Servicios Integrados.
RF	Radio Frequency – Radio frecuencia.

SLA	Service Level Agreement – Acuerdo de prestación de servicios.
SoC	System On Chip – Sistema software y hardware empotrado en un chip de silicio.
TPC	Transmision Power Control – Control de transmisión de potencia.
U-NII	Unlicensed National Information Infrastructure – Infraestructura de información nacional sin licencia.
WiFi	Wireless Fidelity – Fidelidad Inalámbrica
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access - Interoperabilidad Mundial Para Acceso por Microondas.
WLAN	Wireless Local Área Network – Red de área local inalámbrica.
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network – Red inalámbrica de área metropolitana.

INTRODUCCIÓN

La masificación de la banda ancha y la provisión de servicios adicionales al acceso a Internet se han vuelto metas de desarrollo y negocio importantes para el gobierno y las empresas de telecomunicaciones del país. En este sentido, las agencias y los inversionistas ven en tecnologías inalámbricas como WiFi (Fidelidad Inalámbrica, *Wireless Fidelity*) y WiMAX (Interoperabilidad Mundial Para Acceso por Microondas, *Worldwide Interoperability for Microwave Access*) una oportunidad de alcanzar esas metas de forma viable o con un adecuado retorno de la inversión, por sus características técnicas y los costos de su implementación y los servicios que se pueden ofrecer al usuario final.

Sin embargo, la relativa novedad de estas tecnologías, la presión de la competencia y las intenciones de cubrir la actual demanda, han permitido vislumbrar la necesidad de contar con un conjunto de criterios técnicos que favorezcan la óptima implementación del acceso inalámbrico de banda ancha con WiFi y WiMAX para soportar servicios de Internet y Telefonía para el entorno metropolitano colombiano. Por estas razones se ha planteado el desarrollo de este proyecto, con el objetivo de generar un conjunto de criterios técnicos para el diseño de este tipo de redes en entornos metropolitanos colombianos, que sirvan como referencia para su correcta implementación por parte de cualquier operador o Proveedor Inalámbrico del Servicio de Internet (WISP, *Wireless Internet Service Provider*).

El trabajo de Grado está estructurado en cinco capítulos, como se muestra en la Figura I-1, dentro de los cuales se desarrollan todos los objetivos del proyecto. El capítulo 1, es la introducción como tal a la temática tratada; en él se busca describir los conceptos más relevantes de radiofrecuencia y propagación a ser tenidos en cuenta en el diseño de redes inalámbricas de banda ancha. Es necesario un completo entendimiento de estos conceptos para la posterior generación de criterios de diseño específicos al entorno Colombiano. Dentro de estos conceptos se encuentran, la generación y transmisión de RF, antenas y líneas de Tx, modulación de señales RF, duplexación, concepto de NLOS (Sin línea de vista, *Non Line of Sight*) y LOS (Línea de vista, *Line of Sight*), re-uso de

frecuencia, *Link Budget*, modelos de propagación, desvanecimiento, pérdidas de propagación, balance del enlace, entre otros.

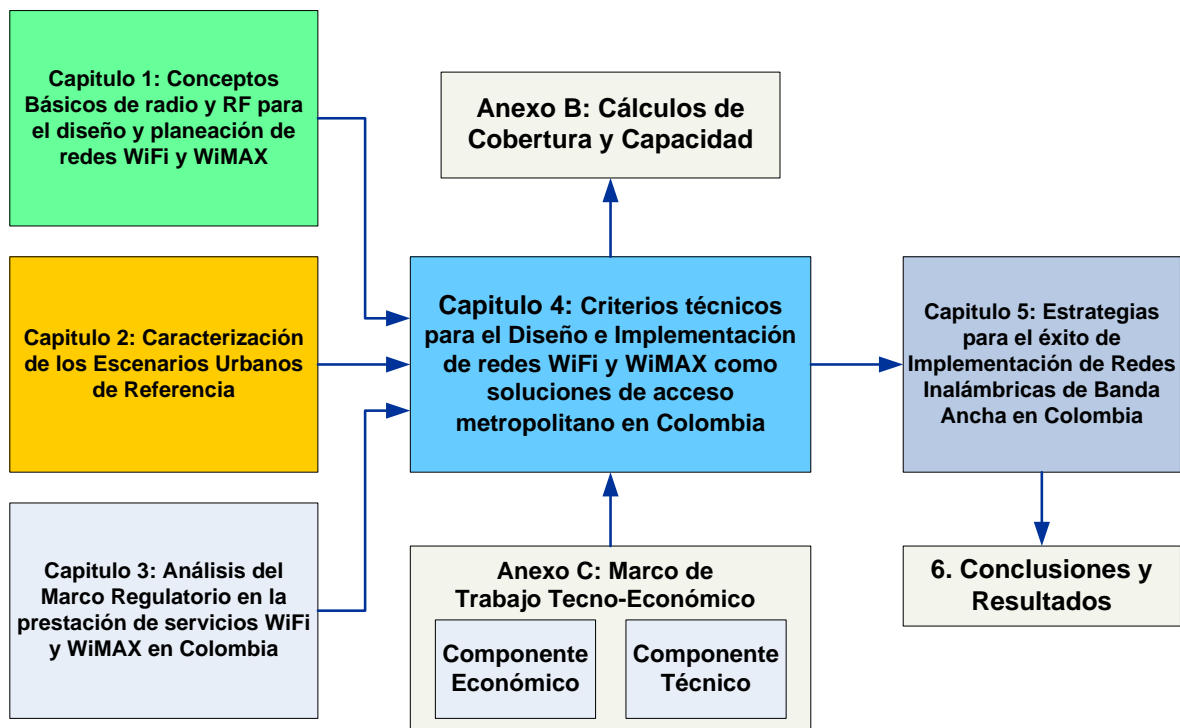


Figura I-1 Estructura del Trabajo de Grado.

En el capítulo 2 se lleva a cabo un análisis de las características fundamentales de los entornos urbanos colombianos seleccionados como referencia para la posterior generalización y aplicación de los criterios generados. Dentro de estas características se encuentran la planeación urbanística, ubicación geográfica, población, entre otros.

En el capítulo 3 se tratan los aspectos legales del marco regulatorio colombiano vigente para la prestación de servicios a través de este tipo de redes. Conocer el estado actual de la regulación es de vital importancia para cualquier WISP, ya que ésta define límites técnicos y de prestación de servicios que deben ser tenidos en cuenta para un diseño eficiente de la red. Se tratarán temas como el marco regulatorio en la prestación de servicios WiFi y WiMAX, servicios licenciados y no licenciados y asignación del espectro, entre otros. En este apartado se da solución al segundo objetivo específico propuesto, que hace referencia a la *generación de un marco de referencia que permita describir los*

segmentos de mercado y aspectos regulatorios relevantes para el despliegue de redes WiFi y WiMAX en áreas metropolitanas colombianas.

En el capítulo 4 se generan los criterios técnicos para el diseño e implementación de redes WiMAX/WiFi en entornos metropolitanos haciendo especial énfasis en WiMAX, pues, es la tecnología más reciente y la que representa mejores expectativas para Redes Inalámbricas de Área Metropolitana (WMAN, *Wireless Metropolitan Area Network*). Como resultado de este capítulo se deriva el Anexo B, en donde se realizan los cálculos de propagación y capacidad para las ciudades colombianas escogidas como referencia, con el objetivo de dar mayor claridad en estos aspectos. Este es el capítulo central, pues en el se desarrolla el objetivo general del proyecto, que es *proponer un conjunto de criterios técnicos, para el diseño y planeación de la arquitectura óptima de Red de Acceso Inalámbrica de Banda Ancha implementada con WiFi y WiMAX, que soporte los Servicios de Internet y Telefonía para el entorno metropolitano colombiano*, además de dar cumplimiento al primer objetivo específico que está orientado a la *definición de escenarios de implementación para las tecnologías WiFi/WiMAX*.

En el capítulo 5, se describen las diferentes estrategias o métodos que pueden utilizarse para lograr que las tecnologías inalámbricas se conviertan en instrumentos eficientes en la masificación de la banda ancha en Colombia. Estas recomendaciones surgieron como fruto de la investigación y del análisis de la cadena de valor que agrupa a todos los actores de esta industria y que pueden influir de manera positiva o negativa el despliegue de este tipo de redes. Dando así, cumplimiento al tercer y último objetivo específico del proyecto encaminado a *proyectar la escala de penetración de estas tecnologías en el entorno colombiano para la implementación de WISP's*.

1. CONCEPTOS BÁSICOS DE RADIO Y RF PARA EL DISEÑO DE REDES WIFI Y WIMAX

Este capítulo da una visión general de los subsistemas que constituyen un sistema de radio. Debido a que el objetivo final del proyecto está enfocado hacia la generación de una guía de referencia para el diseño de redes inalámbricas de banda ancha, que sea útil tanto para operadores como para cualquiera que quiera implementar un WISP, estos conceptos serán tratados de la manera más sencilla posible, pues, lo que se busca es familiarizar con la operación básica de los bloques operativos de este tipo de sistemas y tener una base teórica para la posterior generación de criterios técnicos. En realidad, cada uno de los sub-sistemas son dispositivos complejos acerca de los cuales se han escrito libros enteros.

1.1. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

El espectro electromagnético (EM), se extiende desde frecuencias extremadamente bajas, aproximadamente 60Hz de las líneas eléctricas, hasta los 10^{20} Hz de la radiación cósmica y gama. Una parte del espectro es denominada de Radiofrecuencia (RF) y está conformado por ondas EM que tienen frecuencias en el intervalo de 3KHz a 300 GHz.

El espectro se encuentra dividido en regiones limitadas, sea por la tecnología o por los fenómenos físicos que estén bajo consideración. De manera similar a la luz visible, que puede ser dividida en colores de acuerdo a la longitud de onda, el espectro de radio frecuencia se divide en número de bandas o rangos de frecuencia, los cuales pueden apreciarse en la Tabla 1-1 [1].

Tabla 1-1. Asignación de bandas de frecuencia.

Nombre	Abreviación	Frecuencias	Longitud de onda	Tipo de Servicios
Very Low Frequency	VLF	9 KHz – 30 KHz	33 Km – 10 Km	Radio de onda larga
Low Frequency	LF	30 KHz – 300 KHz	10 Km -1 Km	Radio de onda larga
Médium Frequency	MF	300 KHz – 3 MHz	1 Km – 100 m	Radio AM, radio navegación.
High Frequency	HF	3 MHz – 30 MHz	100 m – 10 m	Radio Banda Ciudadana, aficionados, comunicaciones de radio HF.
Very High Frequency	VHF	30 MHz – 300 MHz	10 m - 1 m	Radio FM, TV VHF, servicios de emergencia, aficionados.
Ultra High Frequency	UHF	300 MHz – 3 GHz	1 m – 100 mm	TV UHF, teléfonos celulares, WiFi , WiMAX
Super High Frequency	SHF	3 GHz – 30 GHz	100 mm – 10 mm	Micro-ondas, comunicaciones satelitales, radar, micro-ondas punto a punto, WiFi , WiMAX
Extremely High Frequency	EHF	30 GHz – 300 GHz	10 mm – 1 mm	Radar, radio astronomía, enlaces micro-ondas cortos

A su vez, las bandas de frecuencia se dividen en canales individuales, los cuales son simplemente pequeñas fracciones del espectro que se asignan a un transmisor y receptor, para definir exactamente su frecuencia de operación.

1.2. TRANSMISIÓN Y GENERACIÓN RF

La generación de una señal RF es la labor del trasmisor, el cual está constituido por un conjunto de elementos cada uno de los cuales cumple una función específica, sus componentes principales se muestran en la Figura 1-1[2].

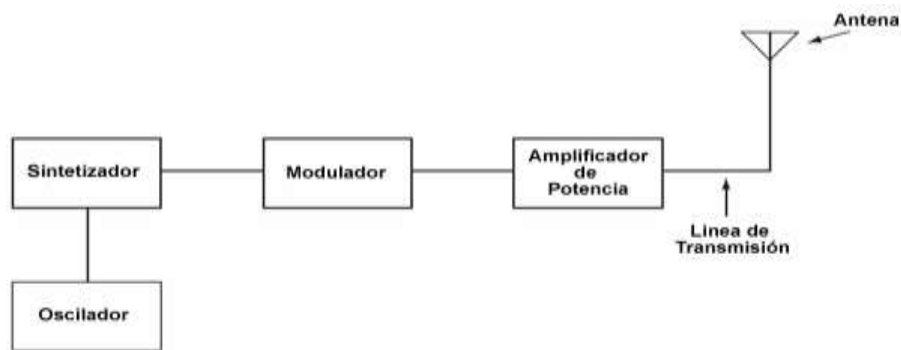


Figura 1-1. Diagrama en bloques de un transmisor.

- **Oscilador.** Lo primero que se debe realizar para generar una señal RF es producir la señal base a la frecuencia de operación deseada, esta es la labor del oscilador, o en los radios modernos, el sintetizador de frecuencia. El oscilador funciona bajo los conceptos de amplificación, realimentación y resonancia, básicamente es un amplificador en el cual parte de la señal de salida realimenta la entrada del sistema, esto es conocido como realimentación positiva. Si el acoplamiento de la entrada con la salida es continuo, el amplificador se estabilizará a la frecuencia de resonancia de los componentes que conforman el amplificador y el lazo de realimentación.
- **Amplificador de potencia.** El objetivo de este módulo es producir una imagen de alta potencia de la señal presente en su entrada. El amplificador toma la señal de baja potencia producida por el oscilador y aumenta su potencia a un nivel que permita la transmisión de la energía RF a lo largo del trayecto entre el transmisor y el receptor. Las características principales de un amplificador son potencia de salida, linealidad y eficiencia. La potencia de salida se mide en *watts*; la linealidad, se define como los parámetros operativos del dispositivo que dan como resultado una relación lineal de ganancia entre la señal de entrada y la de salida; la eficiencia, es la relación entre la potencia de salida y la potencia total de entrada, este valor es por lo general expresado como un porcentaje.
- **Antenas y líneas de transmisión (Tx).** La antena normalmente se conecta al transmisor o receptor mediante un cable coaxial, conocido como línea de transmisión, el cual dentro del argot utilizado en las instalaciones de sistemas como WiFi, se denomina *pigtail*. Este medio es mucho más que un simple pedazo de cable, esta constituido por cuatro elementos, cada uno de los cuales tiene un efecto en las

características de impedancia y pérdidas de la línea. Estos cuatro elementos son el conductor central, el dieléctrico, el conductor externo y la cubierta. Cuando se trabaja con dispositivos de radio, los cables coaxiales más utilizados son los de 50 o 75 ohm de impedancia. Tener en cuenta este valor es muy importante, pues, la selección del cable con la impedancia adecuada es vital para lograr una correcta adaptación entre la antena y el radio transmisor. Esto se debe a que la energía presenta menores pérdidas por reflexión cuando la impedancia de los elementos que atraviesa son iguales; una incongruencia en este factor provocaría que la energía se reflejara desde la carga hacia su fuente, siendo disipada en forma de calor, pero dado que el calor no es energía RF, cada porción de energía reflejada sería desperdiciada.

Además de seleccionar la impedancia adecuada, es necesario utilizar el cable coaxial con las menores pérdidas posibles. Los cables con esta característica son aquellos que tienen mayor diámetro, lo cual muchas veces es un impedimento en el momento de la instalación, pero como recompensa se tiene que la señal presentará muy poca atenuación en su trayecto antena/radio. Por ejemplo, el RG174 tiene 5 milímetros de diámetro, por lo cual es extremadamente flexible, pero a 2.4 GHz presenta pérdidas de 1.47 dB por metro. En cambio, el LMR400 que tiene media pulgada de diámetro, presenta pérdidas de 0.22 dB/metro, pero su manipulación y adecuación a la instalación es un poco difícil. Los cables con mayor diámetro presentan aún menos pérdidas, pero se llega a un punto en que su inflexibilidad y complejo montaje hace que se seleccione un tipo de cable que presente un buen balance entre pérdidas y facilidad de manipulación, sobre todo en pequeñas instalaciones.

Por su parte, las antenas vienen en una gran variedad de formas y tamaños, y diseñadas para trabajar a determinadas frecuencias. Cada una de ellas tiene características particulares, por lo tanto podría decirse que existe una antena especial para cada situación. En general, la selección de la antena es una de las consideraciones más importantes cuando se diseña un sistema de comunicaciones inalámbrico.

La antena isotrópica conocida como radiador isotrópico, se caracteriza por generar una esfera perfecta de energía a su alrededor con la misma intensidad en todas

direcciones [2]. Su concepto existe en la teoría pero no en la realidad, la analogía más cercana a este tipo de radiador sería el sol.

En la práctica, la antena real más simple es el dipolo elemental, que consiste de dos piezas iguales de cable cuya longitud depende de la frecuencia de resonancia. El patrón de radiación generado por un dipolo se asemeja mucho a una rosquilla y debido a esto, al emitir la misma cantidad de energía que una antena isotrópica, la potencia promedio será 2.1 dB mayor, por el simple hecho de que tiene menos superficie que una esfera. Esto da como resultado que la antena se comporte como un amplificador, que presenta cierta ganancia. De este fenómeno se derivan dos términos muy utilizados en radiofrecuencia para especificar la ganancia de una antena que son dBi y dBd. Dichos términos, se definen como la ganancia en dB con respecto al radiador isotrópico (dBi) y la ganancia en dB con respecto al dipolo (dBd) [2]. Debido a que un dipolo elemental tiene 2.1 dBi y 0 dBd de ganancia, es crucial conocer cual de las dos referencias es utilizada por el fabricante de las antenas, pues esto tendrá efecto cuando se realicen los cálculos de potencia y pérdidas del enlace.

Por su patrón de radiación, los dipolos y las antenas isotrópicas son comúnmente llamadas *omnidireccionales*, esto significa que generan un patrón de 360° a su alrededor. Sin embargo, existe un tipo de antena que está diseñada de tal forma que es capaz de concentrar la radiación en un sentido determinado, formando un patrón de radiación similar a un cono, esta antena se conoce como direccional [2].

La figura 1-2 [2] representa los diferentes tipos de antenas mostrando sus patrones de radiación en el plano vertical y horizontal y las analogías en su comportamiento con objetos convencionales.

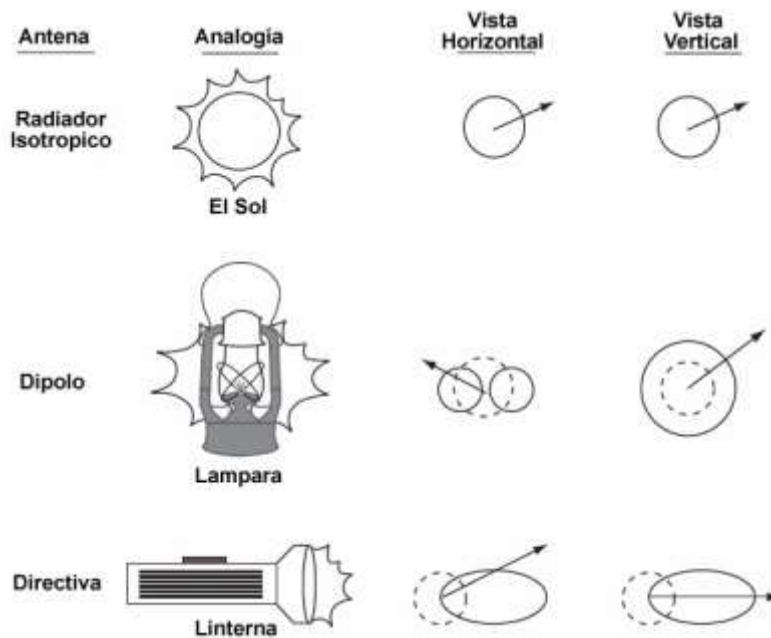


Figura 1-2. Analogía de objetos convencionales con patrones de radiación.

Debe tenerse en cuenta que las antenas tienen patrones de radiación definidos en dos planos: horizontal y vertical. Debido a que el patrón horizontal se considera *omnidireccional*, la manera en que los diseñadores logran obtener mayores ganancias es reduciendo el tamaño vertical del lóbulo principal de la antena, el cual es utilizado como referencia para definir su ganancia. El lóbulo principal está caracterizado por los puntos de potencia mitad, que son los puntos por encima y por debajo del centro del haz principal, en donde la densidad de potencia cae en 3 dB. En antenas muy directivas dicho lóbulo puede ser reducido a menos de 10 grados, lo cual puede convertirse en un problema si la antena está ubicada a una altitud considerable sobre el área de cobertura, ya que existe una gran posibilidad de que gran parte de la ganancia sea desperdiciada, debido a que el lóbulo principal estará apuntando hacia el horizonte, y no a los receptores que se encuentran a nivel de la tierra. Por lo tanto, un parámetro muy importante a tener en cuenta en el montaje es lo que se conoce como *electrical downtilt*, el cual hace referencia al grado de inclinación al que deben ser sometidas las antenas, con el objeto de que la energía se concentre en el área de cobertura deseada [2].

Las antenas directivas están disponibles con diferentes patrones, cada uno apropiado para una situación específica; las configuraciones más comunes son de 120°, 90°, 45°

y 30° de ancho de haz. Este tipo de antena es muy útil para proporcionar una cobertura controlada a un área específica; algunas están hechas con reflectores parabólicos que permiten concentrar la energía en un haz que puede ser tan estrecho como 2°, siendo ideales para enlaces punto a punto de grandes distancias. Las antenas de 120° y 90° también conocidas como sectoriales, son especiales para la realización de celdas que brinden servicio a zonas determinadas, minimizando la pérdida de energía y aumentando la eficiencia del sistema. Un ejemplo de estos patrones de radiación puede verse en la Figura 1-3 [3].

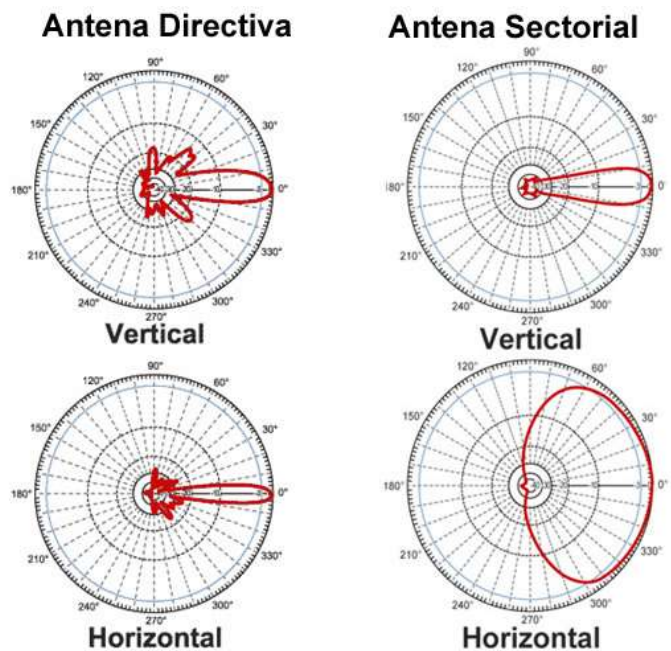


Figura 1-3. Patrón de radiación de una antena direcciva de 8° y 24 dBi, y una antena sectorial de 120° y 14 dBi.

1.3. RECEPCIÓN RF

De igual forma que el transmisor, el sistema encargado de la recepción de la señal cumple funciones específicas para lo cual debe estar equipado con los componentes adecuados para realizar dicha función. En la Figura 1-4 [2] se muestra su diagrama general.

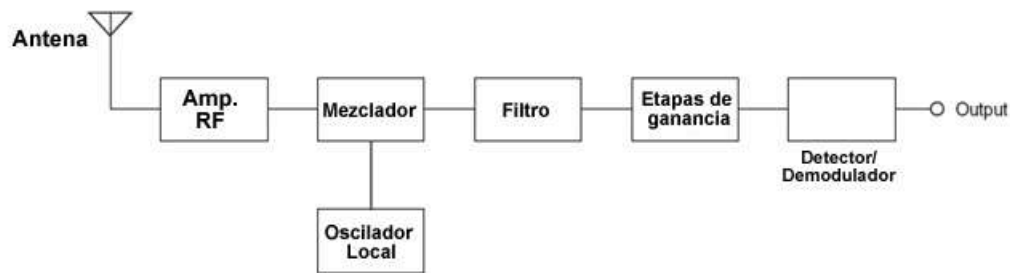


Figura 1-4. Diagrama en bloques del receptor.

Cuando la señal llega a la antena receptora, su nivel de potencia no es el mismo con el cual fue emitida desde el transmisor, pues ha sufrido múltiples atenuaciones debido a su desplazamiento a través del espacio, al contacto con objetos ubicados en su trayectoria y a posibles interferencias de otras señales RF presentes en el espacio. Por lo tanto, el primer paso que se realiza en recepción es limpiar la señal mediante un filtro pasa banda. Este filtro permite remover cualquier señal fuera de la banda de trabajo, de tal forma que al amplificador solo lleguen las señales que son de utilidad. El amplificador RF está diseñado para tratar con señales de muy baja potencia, en algunos casos del orden de *picowatts*, por lo cual su tarea principal es incrementar el voltaje de la señal por un amplio factor, hasta un punto donde pueda ser procesada por el mezclador o *mixer*.

El mezclador obtiene una entrada del amplificador RF y otra del oscilador local (LO), su misión es combinar las dos señales para producir cuatro frecuencias en su salida: la frecuencia de recepción, la frecuencia del oscilador local, su suma y su resta. La señal que más valor tiene es la producida por la resta de las frecuencias de recepción y del oscilador, pues es la más fácil de amplificar y procesar. A continuación, la mezcla de señales pasa a través de un filtro que resuena solo a la frecuencia equivalente a la resta de las frecuencias, permitiendo que solo esta pase a través de él. Luego, la señal pasa por una serie de amplificadores de frecuencia intermedia (IF) y después de que ha sido lo suficientemente amplificada como para ser procesada, se envía a un detector/demodulador. El demodulador a su vez se utiliza para extraer la información útil de la señal y devolverla a su forma original.

1.4. MODULACIÓN DE SEÑALES RF

El trabajo del modulador es imprimir la información que se quiere transmitir en la onda portadora, esto es posible mediante la modulación de cualquier propiedad de la portadora: frecuencia, amplitud o fase. Un fenómeno interesante que ocurre cuando se modula una portadora, es la generación de frecuencias adicionales que ocupan parte del espectro en las bandas de la onda, esto se conoce como bandas laterales. La energía en estas bandas define la forma de la onda transmitida, y es la razón por la cual los canales de comunicación se asignan con una determinada cantidad de ancho de banda. Las normas y regulaciones que determinan la asignación y uso del espectro tienen en cuenta los tipos de modulación que pueden utilizarse y la máxima cantidad de información que ésta puede transmitir; de acuerdo con esto, las bandas RF se dividen en canales cuyo tamaño depende del uso del espectro. Es muy importante tener en cuenta la modulación utilizada en cada tecnología, pues ésta influye enormemente en el rango de cobertura y puede determinar la ubicación y el número de estaciones necesarias en un área determinada.

1.4.1. Modulación Compleja

Las primeras técnicas de modulación fueron las ya conocidas, AM, FM y PM, las cuales proporcionaron maneras simples de transportar la única información disponible en el momento en el que fueron inventadas: el audio. Sin embargo, a medida que la información digital se hizo disponible, estas técnicas debieron modificarse o adaptarse para poder prestar el servicio de transmisión de la información en este nuevo formato. Una portadora RF es una onda senoidal y por lo tanto es de naturaleza analógica. Debido a esto, para realizar una transmisión de información digital es necesario convertir los datos del mundo digital al mundo analógico. Gracias a esta necesidad, surgieron las técnicas de modulación digital, las cuales aún utilizan la fase y la amplitud como las características a ser moduladas, pero se han implementado de manera más compleja con el fin de incrementar el rendimiento del canal (bits/Hz), estas técnicas son las que utilizan tanto WiFi como WiMAX para poner la información en el aire [3].

En la Tabla 1-2 [3] se puede ver un resumen de las técnicas de modulación digital más utilizadas; es de particular interés, desde el punto de vista de diseño, el número de bits

por transición que cada una de ellas puede representar. Este factor determina la eficiencia de transmisión de bits por segundo, pero al mismo tiempo establece el grado de susceptibilidad a pérdida de información si la técnica se utilizará en un medio de transmisión ruidoso y congestionado.

Tabla 1-2. Técnicas de modulación digitales.

Modulación	Bits por Transición	Cambios
BPSK (<i>BiPhase Shift Keying</i>)	1	2 cambios de fase opuestos 180°
QPSK (<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>)	2	4 cambios de fase separados 90°
8PSK (<i>8 Phase Shift Keying</i>)	3	8 cambios de fase separados 45°
QAM (<i>Quadrature Amplitud Modulation</i>)	2	2 estados de fase separados 180°, cada fase con 2 cambios de amplitud
16 QAM (<i>Quadrature Amplitud Modulation</i>)	4	4 estados de fase/ amplitud
64 QAM (<i>Quadrature Amplitud Modulation</i>)	6	6 estados de fase/amplitud
256 QAM (<i>Quadrature Amplitud Modulation</i>)	8	16 estados de fase/amplitud

Por ejemplo, en 256 QAM, la incertidumbre asociada con la correcta recepción e interpretación de un estado específico de entre 256, es extremadamente alta. De hecho, la portadora debe ser de al menos 30 dB, o 1000 veces más fuerte que el ruido presente en el canal, para que la señal sea escuchada y correctamente demodulada por el receptor [2]. Estas técnicas complejas pueden ser utilizadas solamente en los medios más limpios y con niveles de potencia mucho mayores que modulaciones de menor rango.

Por estas razones, el diseño de un sistema de radiocomunicaciones muchas veces se basa en la técnica de modulación más simple que pueda realizar bien el trabajo, siempre teniendo en cuenta el balance entre potencia versus el ancho de banda espectral para un determinado rendimiento. Las técnicas de modulación más simples requieren menos potencia para cubrir efectivamente un área determinada, sin embargo, proporcionan una tasa de rendimiento menor (bits/Hz). Por otra parte, las modulaciones complejas necesitan mayor potencia para cubrir esa misma área, pero ofrecen velocidades de transmisión mucho mayores. Si la modulación utilizada es de este tipo, puede darse el caso de que el sistema exija tanta potencia al dispositivo cliente, que puede ser un

dispositivo portátil, que ocasione una disminución en la vida de su batería. En general, un sistema que haga uso de una modulación elevada puede tener serias restricciones de cobertura, o en el peor de los casos, puede ser tan frágil y sufrir tantos errores que una comunicación efectiva puede ser imposible sobre el área de cobertura deseada. La Figura 1-5 [2][4], ilustra las características y desventajas asociadas con el incremento en la complejidad de la modulación.

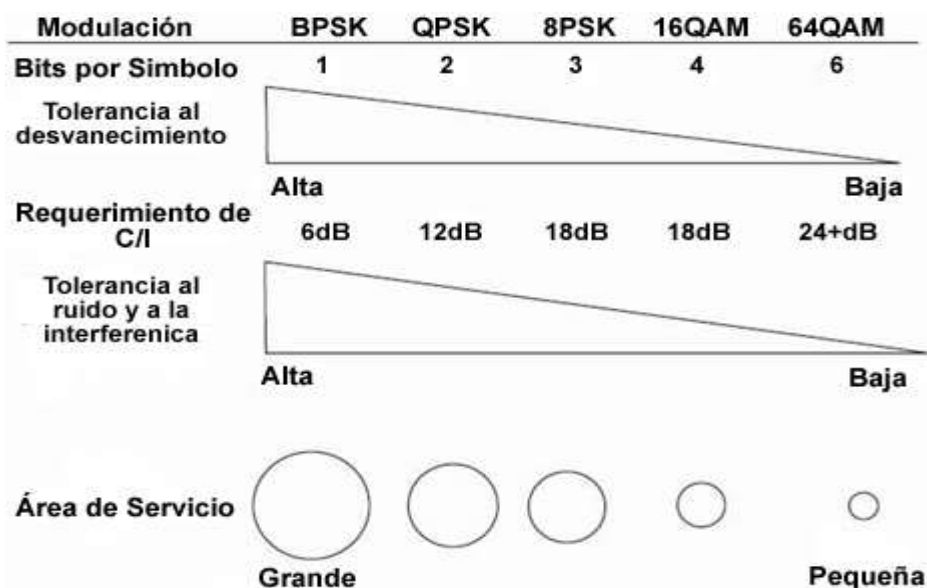


Figura 1-5. Comparación de las modulaciones.

En este aspecto es pertinente mencionar que WiMAX utiliza técnicas de modulación adaptativa que provocan un cambio automático de la codificación dependiendo de las condiciones del canal [5]. De este modo, cuanto más cerca se encuentren las estaciones cliente de la estación base, más probabilidades tendrán de poder transmitir a una mayor velocidad (Figura 1-6 [4] [5]).

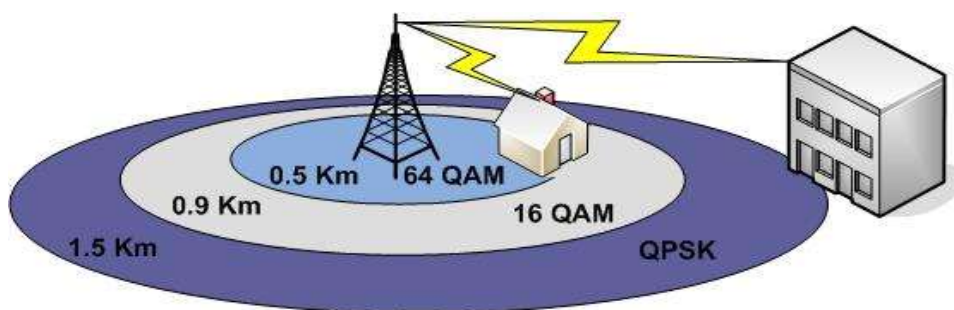


Figura 1-6. Modulación adaptativa de WiMAX.

Sin embargo y como se mencionó anteriormente, cuando se emplea una modulación de señal de orden superior, la probabilidad de errores se incrementa, por lo que se hace necesario algún sistema que permita al receptor detectar y corregir un cierto porcentaje de los errores encontrados. La técnica que permite realizar esto se denomina corrección de error hacia adelante (FEC, *Forward Error Correction*) y consiste en la adición de bits redundantes en la transmisión. Esta inclusión de bits requiere una tasa de transmisión mayor, siendo el impacto general un mejor desempeño de la red. El enlace radio 802.11b original de WiFi no incluyó FEC, pero se incorporó una codificación convolucional FEC en 802.11a y 802.11g. WiMAX emplea dos sistemas FEC: Codificación Convolucional y Reed-Solomon [4][5].

1.5. DUPLEXACIÓN

Debido a que los sistemas de comunicación inalámbricos deben ser bidireccionales, o sistemas *duplex*, es decir, permitir una transmisión y recepción en los dos extremos, debe existir algún mecanismo que controle el acceso al medio y que permita a ambas comunicaciones compartirlo. Existen dos técnicas de Duplexación disponibles: Duplexación por División en Frecuencia (FDD, *Frequency Division Duplexing*) y Duplexación por División de Tiempo (TDD, *Time Division Duplexing*), ambas utilizadas por las diferentes capas radio de WiMAX dependiendo de la frecuencia y de la normatividad [5]. Para el caso particular de Colombia, el Ministerio de Comunicaciones ha asignado la banda de 3.5 GHz para la otorgación de licencias de operación nacional y departamental WiMAX, con equipos que utilizan Duplexación FDD [6].

- **FDD.** La Duplexación por división de frecuencia se lleva a cabo asignando dos frecuencias distintas al canal de comunicación. Una de ellas es transmitida por la estación base y recibida por la estación cliente, y la otra es transmitida por la estación cliente y recibida por la estación base, Figura 1-7. Debido a que los sistemas *duplex* comparten una antena común, las dos frecuencias asignadas deben tener una gran separación entre ellas, 45 MHz o más, con el fin de asegurar que la energía transmitida sea filtrada fácilmente de la energía recibida. Esta técnica es utilizada en aquellos sistemas que esperan tener un tráfico simétrico, debido a que los dos canales asignados tienen el mismo ancho de banda [2].

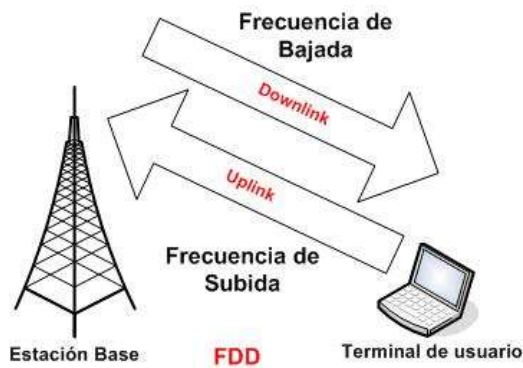


Figura 1-7. Duplexación FDD.

- TDD.** Esta técnica permite la utilización de una sola frecuencia para transmitir y recibir señales en ambos extremos del enlace. Esto se lleva a cabo dividiendo el canal en ranuras de tiempo para que los transmisores y receptores vean un flujo continuo de información. Por lo tanto, el canal es dividido temporalmente en ranuras para la transmisión y recepción con pequeños tiempos de guarda entre ellas, Figura 1-8. El estándar IEEE 802.11 utiliza TDD basado en contención, donde el AP y todas las estaciones móviles compiten por el uso del canal, lo cual hace que sea un sistema *half-duplex*. Esta técnica es útil en sistemas que tienen patrones de tráfico asimétricos, debido a que los *slots* de tiempo pueden ser asignados de forma irregular [2].

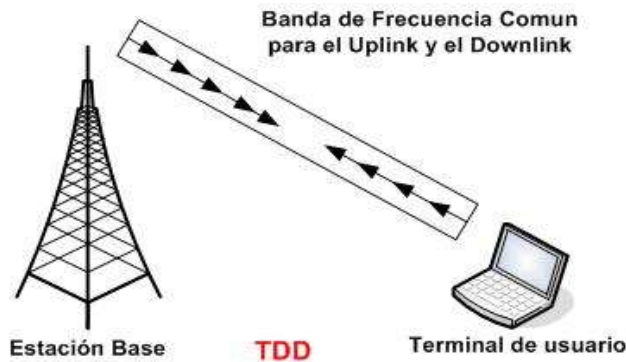


Figura 1-8. Duplexación TDD.

Sin importar el método de Duplexación utilizado, tanto la estación base como la estación cliente necesitan de un transmisor y un receptor, es decir un *transceiver*. Todos los bloques y capacidades discutidas anteriormente son implementados por los fabricantes en los equipos de radio que venden en el mercado, algunos productos presentan más

limitaciones que otros, por lo tanto no existe una solución que satisfaga todos los escenarios. Es en este aspecto donde el conocimiento del diseñador de la red entra en juego para realizar una selección apropiada de la solución hardware que mejor cumpla con los requerimientos y necesidades de los usuarios. El costo, capacidad, cobertura y confiabilidad son algunas de las variables que deberán ser consideradas para realizar un correcto diseño de una red inalámbrica.

1.6. OFDM

Los estándares 802.11a, 802.11g, 802.16 y 802.20 basan su funcionamiento en una técnica de modulación relativamente nueva conocida como Modulación Ortogonal por División de Frecuencia (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [2].

OFDM utiliza un gran número de canales traslapados para transmitir la información, cada uno de estos sub-canales (también llamados tonos) tiene su propio módem y se comporta como una portadora independiente, en la Figura 1-9 [3] se ilustra este concepto.

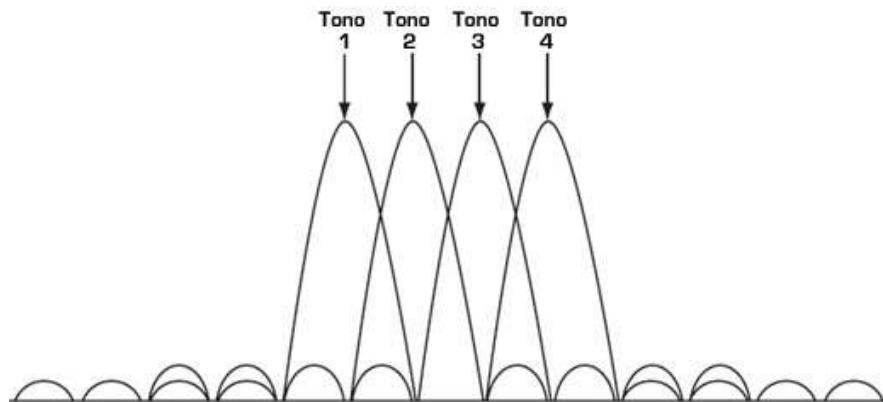


Figura 1-9. OFDM.

Estas portadoras se traslapan, pero están espaciadas a frecuencias precisas de tal forma que sean ortogonales, así, el centro de una portadora está ubicado en el borde de la portadora adyacente, evitando que los diferentes demoduladores capten frecuencias distintas a la propia. Los beneficios de OFDM son una alta eficiencia espectral, gran flexibilidad para adaptarse al ancho de banda disponible del canal y una baja susceptibilidad al desvanecimiento por multi-trayecto [2][3]. Esto es de gran utilidad en un

ambiente de propagación terrestre, donde existen reflexiones de la señal que pueden distorsionar la señal recibida.

En esta técnica, cada portadora ortogonal puede ser modulada independientemente con una señal BPSK o QAM; debido a que son tratadas como canales independientes, la modulación seleccionada en cada uno puede ajustarse a los desvanecimientos del medio de propagación. Implementar esta flexibilidad añade complejidad al sistema, pero a cambio permite alcanzar el máximo rendimiento debido a que puede adaptarse dinámicamente a las condiciones del canal, por ejemplo, si una sub-portadora ocupa una frecuencia que esta afectada por el desvanecimiento, puede cambiar a una modulación de orden más bajo. Los equipos actuales de 802.11a y 802.11g utilizan OFDM de 64 canales y solo hacen uso de una técnica de modulación en todas las sub-portadoras.

- **OFDM/OFDMA en WiMAX.** Debido a que WiMAX presenta diferentes perfiles de acuerdo al tipo de escenario donde se espera sea desplegado, el *WiMAX Forum*¹ ha optado por estandarizar el sistema a las capas físicas OFDM de 256 portadoras, y OFDMA de 2048 portadoras, para los estándares IEEE 802.16-2004 y IEEE 802.16-2005, respectivamente. Las siglas OFDM-256 hacen referencia a la *tecnología de multiplexación por división en frecuencia y modulación ortogonal de 256 puntos de transformada* [5]. Por su parte, OFDMA-2048 hace referencia a la *tecnología de acceso múltiple por direccionamiento de un subconjunto de portadoras por división en frecuencia y modulación ortogonal con transformada de 2048 puntos* [5].

En OFDM, el dispositivo cliente transmite utilizando todo el espacio de la portadora a la vez. A diferencia de esto, OFDMA soporta acceso múltiple, lo cual permite al dispositivo cliente transmitir a través de uno o varios sub-canales que le hayan sido asignados. En OFDMA con 2048 portadoras y 32 sub-canales, si un solo canal es asociado al usuario cliente, toda la potencia de transmisión se concentra en 1/32 parte del espectro disponible, esto permite ganar alrededor de 15 dB sobre el sistema OFDM [1]. El acceso múltiple es especialmente ventajoso cuando se utilizan canales de gran ancho de banda.

¹ El *WiMAX Forum* es una entidad sin ánimo de lucro, creada para agrupar a todas las empresas de telecomunicaciones y fabricantes interesados en el desarrollo y certificación de equipos que cumplen con el estándar IEEE 802.16.

Como se puede observar en la Figura 1-10 [7], en OFDM se asignan ranuras de tiempo a los dispositivos cliente para la transmisión, pero solo un único dispositivo puede transmitir durante cada ranura.

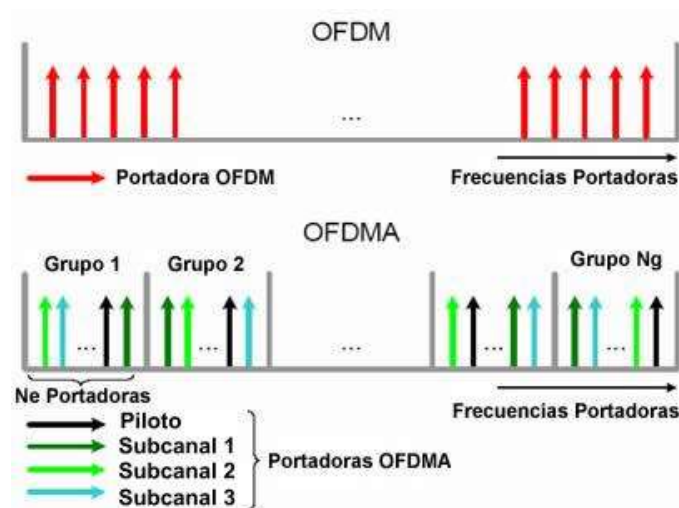


Figura 1-10. Comparación de las técnicas OFDM y OFDMA.

Por el contrario, en OFDMA la sub-canalización activa varios usuarios clientes a transmitir al mismo tiempo sobre los sub-canales asignados para cada uno de ellos.

1.7. PROPAGACIÓN

El entendimiento de cómo las ondas de radio se propagan a través del espacio es un aspecto crítico en el diseño de cualquier red inalámbrica. La propagación de las ondas electromagnéticas es afectada por muchas variables, entre ellas se encuentran la frecuencia, distancia, objetos presentes en la trayectoria de la señal, y reflexiones, todas estas producen variaciones en la potencia de la señal en cualquier punto del espacio, que hacen prácticamente imposible conocer con exactitud la potencia de la señal en un punto específico.

El rango de frecuencias que es de interés para este proyecto, debido a que la cantidad de espectro asignado en ellas es adecuado para soportar sistemas de gran ancho de banda, va desde los 700 MHz hasta los 6 GHz. Las frecuencias por encima de este rango tienden a comportarse como la luz y por lo tanto no se difractan alrededor de los objetos

que pudieran encontrar en su trayecto, haciendo imposible su utilización en ambientes NLOS, siendo utilizadas por lo general en comunicaciones punto a punto.

Básicamente existen dos tipos de canales radio, los denominados LOS y NLOS, haciendo referencia a la existencia o no de obstáculos entre la estación base y el dispositivo cliente. A partir de estos dos conceptos se derivan los diferentes modelos de propagación utilizados para la planeación de cobertura en redes inalámbricas de banda ancha [7] [8] [9] [10] [11]. En el Anexo A se encuentra una descripción de los modelos más recomendables para este tipo de redes, que se utilizaron como referencia para realizar los cálculos.

1.8. TOPOLOGIAS DE RED

Las topologías de red de las redes inalámbricas de banda ancha pueden agruparse en tres categorías fundamentales: punto-a-punto (PTP), punto-a-multipunto (PTM) y redes en malla. Las redes PTP consisten de uno o más enlaces fijos punto a punto y emplean antenas altamente directivas en ambos extremos. Por su parte, una topología PTM consiste de un número determinado de estaciones base, cada una de las cuales brinda conectividad a múltiples terminales de usuario. Este tipo de red es mucho más efectiva en entornos urbanos, desde el punto de vista costo/beneficio que la utilización de múltiples enlaces punto a punto debido a que los equipos de radio en una sola estación base pueden ser utilizados para servir a varios usuarios [3].

En una topología en malla, los terminales de usuario actúan como enrutadores para el tráfico de nodos adyacentes. Sin embargo, también son necesarias estaciones base para proporcionar conectividad de los nodos a la red principal. En general, las redes en malla ofrecen una nueva forma de mejorar la cobertura de una red de acceso inalámbrica debido a que cada nuevo usuario puede ser visto prácticamente como una estación base para enrutar y dar servicio a otros equipos de premisa de cliente (CPE, *Customer Premises Equipment*) en su rango de cobertura. También debe tenerse en cuenta que la capacidad de los enlaces puede verse limitada a medida que aumentan los nodos, y además debido a las múltiples funcionalidades adicionales que deben desempeñar los CPE, su diseño es más complejo y por lo tanto son un poco más costosos [12].

Las redes inalámbricas de banda ancha actuales a menudo utilizan combinaciones de las diferentes topologías para alcanzar un máximo desempeño y adaptarse mejor a las necesidades del mercado; por ejemplo: es común utilizar enlaces punto a punto como *backhaul*² para varias estaciones base que a su vez se encuentran en configuración punto a multipunto. A su vez, también es posible realizar combinaciones de diferentes tecnologías de radio, en este caso utilizar el sistema WiMAX en 3.5 GHz como *backhaul* para puntos de acceso WiFi sería una alternativa excelente para ofrecer una red confiable y de altas prestaciones tanto a WLAN's como a *hotspots*³.

En cuanto a entornos urbanos la topología predominante a nivel mundial es la PTM, ya que, es la que presenta mejores características en cuanto a costo y desempeño, pues, aunque la filosofía de las redes en malla también presenta muchas ventajas aún no ha sido probada a cabalidad en entornos urbanos reales y congestionados [3]. Como se puede apreciar en la Figura 1-11, una topología punto a multipunto es básicamente una red sectorizada que tiene dos componentes principales: una estación base y equipos clientes comúnmente denominados CPE's.

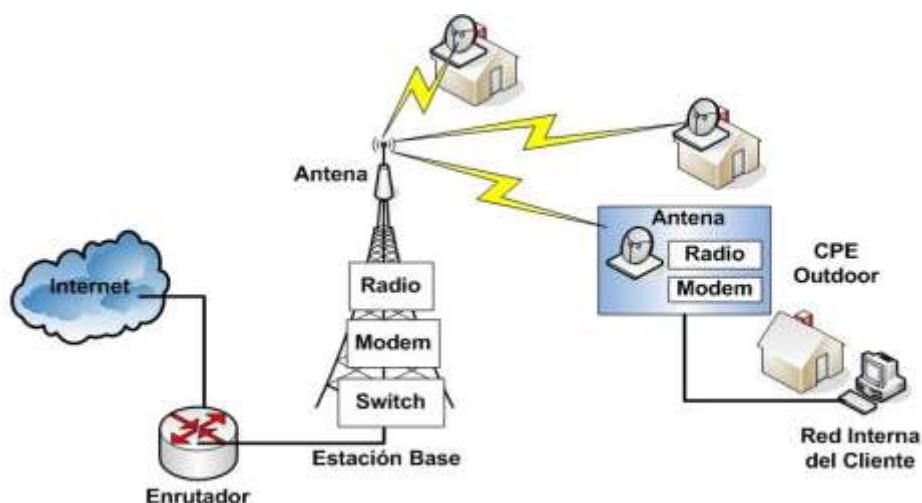


Figura 1-11. Ejemplo de una red inalámbrica en configuración PTM.

² *Backhaul*: Conexión de baja, media o alta velocidad que conecta a computadoras u otros equipos de telecomunicaciones encargados de hacer circular la información. Los *backhaul* conectan redes de datos, redes de telefonía celular y constituyen una estructura fundamental en las redes de comunicaciones, y muchas veces se utilizan para interconectar redes entre sí utilizando diferentes tipos de tecnologías cableadas o inalámbricas.

³ Un *Hotspot* es un punto de acceso inalámbrico público donde los usuarios pueden conectarse a Internet, en muchas ocasiones de manera gratuita.

La estación base puede consistir de uno o más *transceivers*, cada uno de los cuales brinda conexión a varios CPE's dentro de su área de cobertura. A su vez, los radio módems se conectan a un multiplexor, que puede ser un *switch*, cuya función será concentrar el tráfico de los diferentes sectores y enviarlo a un enrutador que proporcione la conexión a la red IP del proveedor de servicio.

El CPE consiste de tres partes principales: el módem, el radio y la antena. El módem proporciona la interfaz entre la red del cliente y la red inalámbrica, y el radio proporciona la interfaz entre el módem y la antena. Estas tres unidades pueden estar separadas o integradas en un solo equipo.

1.9. PLANIFICACIÓN Y RE-USO DE FRECUENCIA

El espectro de frecuencias es un recurso escaso y por lo general nunca hay suficiente disponible como para permitir a cada estación transmisora tener su canal propio y único, incluso las emisoras de radio y canales de TV reutilizan las frecuencias que les han asignado de ciudad en ciudad.

El concepto de re-uso de frecuencia es simplemente la utilización de la misma frecuencia en múltiples emplazamientos entre los cuales hay suficiente separación física, como para permitir una operación libre de interferencias entre todos los clientes que la usan. Este concepto es también utilizado en el diseño e implementación de redes inalámbricas fijas y móviles, aunque con distancias de separación mucho más cortas, y es de gran utilidad cuando se planifica un sistema que tiene más estaciones base que canales.

Si se diseñan enlaces punto a punto (PTP), la apertura de la antena puede ser utilizada para controlar el área de cobertura de un emplazamiento y hacer posible el re-uso de frecuencia a distancias cortas. La ventaja de un enlace PTP es que el extremo inicial y final son conocidos, por lo cual la energía RF puede concentrarse en un punto único en el espacio, por ejemplo, haciendo uso de antenas direccionales, que por su naturaleza, tienen ángulos de apertura muy estrechos. Esto proporciona dos beneficios: primero, los receptores no captan todo el ruido e interferencias presentes en el ambiente, solo lo que existe dentro de la angosta apertura de la antena, y segundo, la energía transmitida es

contenida en un área muy pequeña, por lo tanto no genera interferencia sobre otros sistemas presentes en el entorno. Con las antenas apropiadas, los ajustes de potencia adecuados y una separación angular correcta de las estaciones, se puede reutilizar el mismo canal para dar servicio a varios enlaces, inclusive desde un mismo emplazamiento (Figura 1-12 [13]).

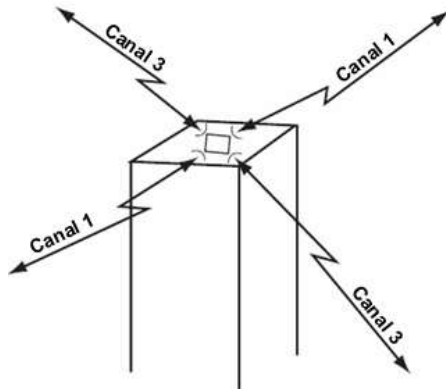


Figura 1-12. Técnica de re-uso de canales en un mismo emplazamiento.

Sin embargo, la situación se torna más compleja cuando el re-uso de frecuencias debe realizarse en un sistema PTM que presta servicio a múltiples dispositivos fijos, portátiles y usuarios móviles, entremezclados alrededor de un área de cobertura. En este caso la antena transmisora necesita un ángulo de apertura amplio, para poder llegar a todos los usuarios, lo cual provocara que la propagación de las ondas de radio sea menos uniforme, comprometiendo aspectos como la potencia de transmisión, la ubicación de la estación base y la misma cobertura. La clave en una ambiente como éste es obtener el mayor cubrimiento posible sobre el área deseada mientras se limita la cantidad de energía RF que se extiende sobre dicha área.

En un mundo ideal de dos dimensiones, cada estación base tendría un patrón de cobertura uniforme de forma circular, donde su radio estaría determinado por la altura de la antena y la máxima pérdida de espacio libre que el sistema pueda soportar. En este escenario, las estaciones adyacentes deberán ser ubicadas de forma que tengan un mínimo traslape, lo suficiente como para asegurar que haya cubrimiento en todas las áreas sin brechas o vacíos de cobertura. El traslape de áreas de cobertura circulares puede verse como hexágonos, donde cada uno de sus lados define la ubicación donde

las señales de estaciones base adyacentes, son iguales. Aunque tales condiciones no existen en el mundo real, esta aproximación es útil para la planeación de sistemas inalámbricos, pues permite visualizar la cobertura individual de estaciones base e identificar su mejor ubicación, de tal forma que se brinde la mejor cobertura en toda el área de acción. En la Figura 1-13 [14] se muestra la progresión de la forma circular a hexagonal, así como una imagen de cobertura real de una estación base (como se puede apreciar ésta no tiene forma circular ni mucho menos hexagonal, en realidad es amorfa y está determinada por el entorno a través del cual las ondas de propagan).

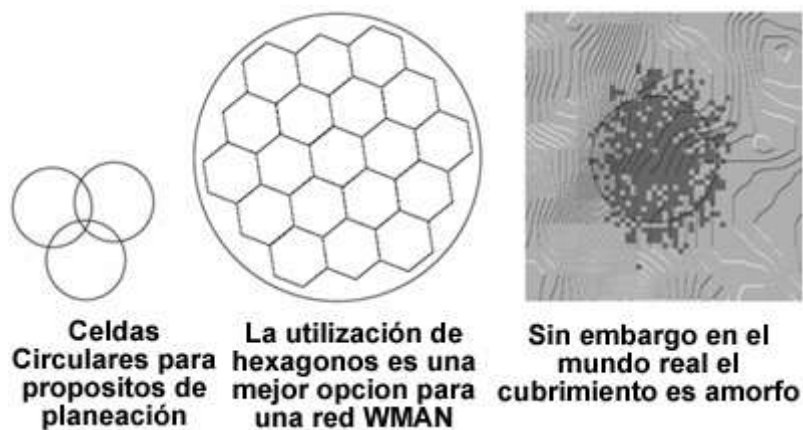


Figura 1-13. Formas geométricas para la planeación de cobertura.

El objetivo primario de un patrón de re-uso, es dividir y asignar las frecuencias disponibles en un patrón de repetición regular que separe a los usuarios de canales iguales y canales adyacentes, lo suficiente como para controlar la interferencia. Debe tenerse en cuenta que la interferencia no puede ser eliminada, pues para esto, la distancia entre estaciones base debería ser muy grande, lo cual afectaría la eficiencia espectral.

Patrones de re-uso de 1, 3, 4, 7, 9, 12 y 21 frecuencias son comúnmente utilizados en redes de telecomunicaciones comerciales, como los sistemas de telefonía celular [15]. El patrón de re-uso puede utilizarse con antenas omnidireccionales, o si se requiere mayor capacidad y protección, con antenas directivas (pero con una mayor cantidad de canales).

En la Figura 1-14 [15], se muestra que un patrón de re-uso no es más que una distribución regular repetible de canales para cada estación base. Mediante su utilización es posible diagramar el sistema de tal forma que la separación entre estaciones base que hagan uso

del mismo canal, sea lo suficiente para asegurar que los niveles de interferencia no impactaran de manera negativa a los usuarios del canal.

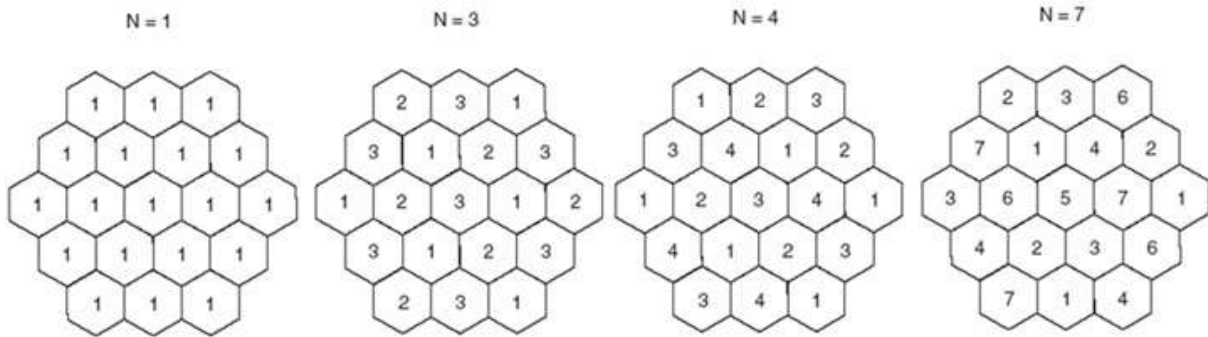


Figura 1-14. Patrones de re-uso más utilizados.

A menudo, los sistemas inalámbricos de banda ancha, como WiMAX, hacen uso de una planificación celular rectangular con sectores de 90°. En la Figura 1-15 se muestra un ejemplo de ésta, en donde las etiquetas A, B, C y D indican los 4 sectores utilizados alrededor de cada estación base, así como los canales utilizados. Hay que anotar que sectores adyacentes pueden utilizar los mismos canales siempre y cuando se utilice una técnica de discriminación por polarización, es decir, cambiar la polarización de la antena entre celdas contiguas.

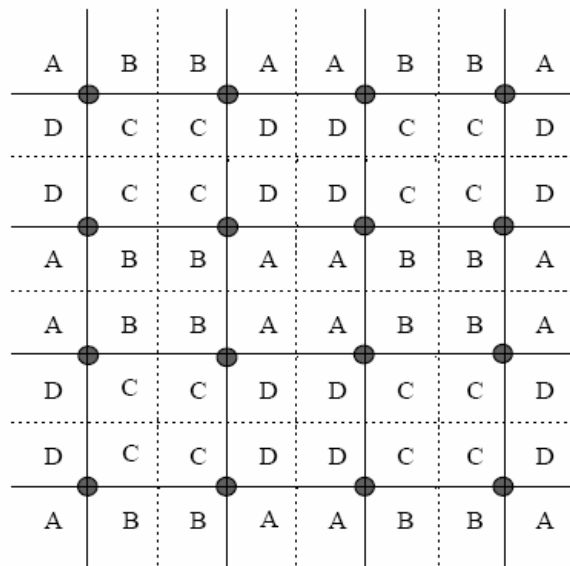


Figura 1-15. Patrón de celdas rectangulares.

En el este capítulo se realizó una revisión de los conceptos más importantes de radio y RF a ser tenidos en cuenta para el diseño de redes inalámbricas especialmente de WiFi y WiMAX, dentro de los cuales se encuentran las bandas de frecuencia, generación, transmisión y recepción de RF, antenas, patrones de radiación, líneas de transmisión, modulación de señales, re-uso de frecuencia, topologías de red, con el propósito de consolidar o brindar la base teórica al lector para un mejor entendimiento de los criterios técnicos que se generan en el capítulo 4.

2. CARACTERIZACIÓN DE LOS ESCENARIOS URBANOS COLOMBIANOS UTILIZADOS COMO REFERENCIA

Este capítulo está orientado a brindar una visión general de los entornos urbanos colombianos, analizando las características demográficas, mapas topográficos, usos del suelo, tipos de construcciones, basados en los POT⁴ y en la información estadística del DANE⁵ de las ciudades de Cali, Palmira, Popayán y Tuluá como escenarios seleccionados en el marco del proyecto para la aplicación de los criterios que se desarrollarán en los posteriores capítulos.

2.1. DEFINICIONES

- **Demografía.** Es el estudio de las características sociales de las poblaciones y su desarrollo a través del tiempo. Los datos demográficos hacen referencia, entre otros, al análisis de la población por edades, situación familiar, grupos étnicos y actividades económicas; las modificaciones de la población, nacimientos, matrimonios y fallecimientos; esperanza de vida, estadísticas sobre migraciones, sus efectos sociales y económicos; grado de delincuencia; niveles de educación y otras estadísticas económicas y sociales.

Para el diseño de una red conocer las características demográficas como la densidad de población, la situación familiar y las actividades económicas dentro del área de interés es importante, ya que permite tomar decisiones sobre el tipo de sistema a implementar, de tal manera que se puedan satisfacer las necesidades de los usuarios potenciales.

- **Mapas Topográficos.** Es una representación de la superficie terrestre mediante curvas de nivel que tiene como finalidad mostrar las variaciones del relieve de la tierra.

⁴ Plan de Ordenamiento Territorial

⁵ Departamento Administrativo Nacional de Estadística

Además de las curvas de nivel, suelen incluirse otras variables geográficas como la vegetación, los suelos, las redes hídricas entre otros.

A partir de los mapas topográficos se pueden obtener los modelos digitales del terreno, los cuales facilitan la selección del modelo de propagación más adecuado sobre el área en la cual se desea desplegar una red, debido a que brindan información sobre variaciones en las elevaciones del terreno.

- **Usos del Suelo.** Hacen referencia a los diferentes usos que el hombre puede hacer de la tierra (urbana o rural), su estudio y los procesos que llevan a determinar el más conveniente en un espacio concreto; en las zonas urbanas el uso del suelo se divide principalmente el residencial, industrial, comercial o de negocios.

Al análisis de los mapas de usos del suelo es importante en el diseño de una red, ya facilitan la planeación de capacidad, teniendo en cuenta el tipo de usuarios que va a tener determinado sector.

2.2. CALI

La ciudad de Cali es uno de los principales centros económicos e industriales del país, el principal centro urbano, económico, industrial y agrario del sur-occidente colombiano y es la tercera ciudad más poblada según el censo realizado por el DANE en el año 2005 [16].

La Figura 2-1 [17] muestra el mapa de la zona urbana de Cali, sobre la cual se realiza el estudio demográfico, topográfico.

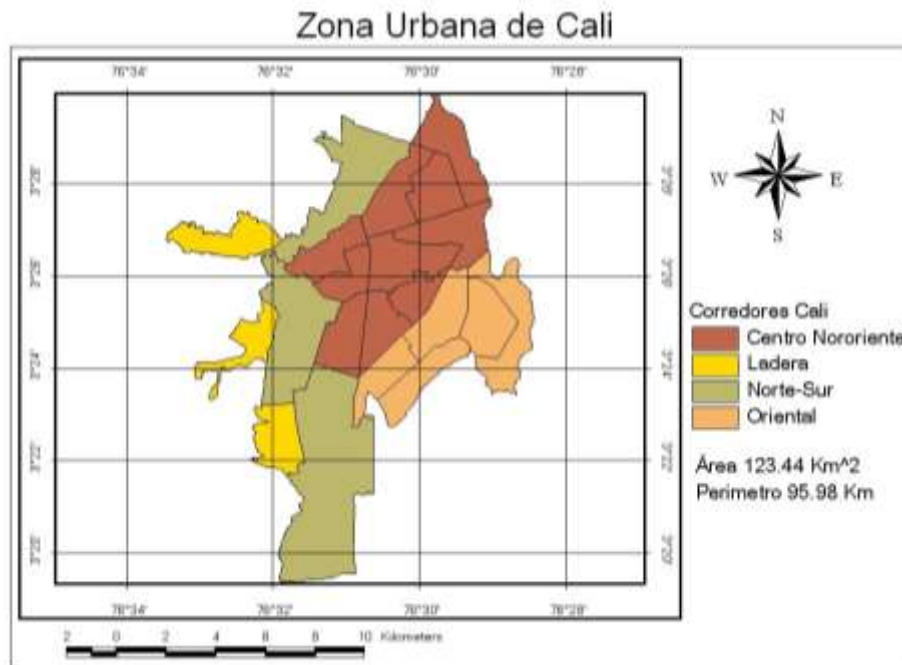


Figura 2-1. Mapa Zona Urbana de Cali.

2.2.1. Ubicación Geográfica y Superficie

Cali está ubicada en las coordenadas 3° 27' 00" N 76° 32' 00" O sobre el valle del río Cauca, y cuenta con un área de 123.44 Km²; en la Figura 2-1 se observa el mapa de Cali, con sus correspondientes coordenadas geográficas [17].

2.2.2. Características Demográficas

- **Población – Hogares.** La ciudad de Cali cuenta con 2.039.626 habitantes en su zona urbana, distribuida entre 554.793 hogares, para un promedio de 3.7 personas por hogar, en la Figura 2-2 [16] se puede observar la distribución de los hogares dentro de las 21 comunas de esta ciudad.

Tamaño de los Hogares - Cali

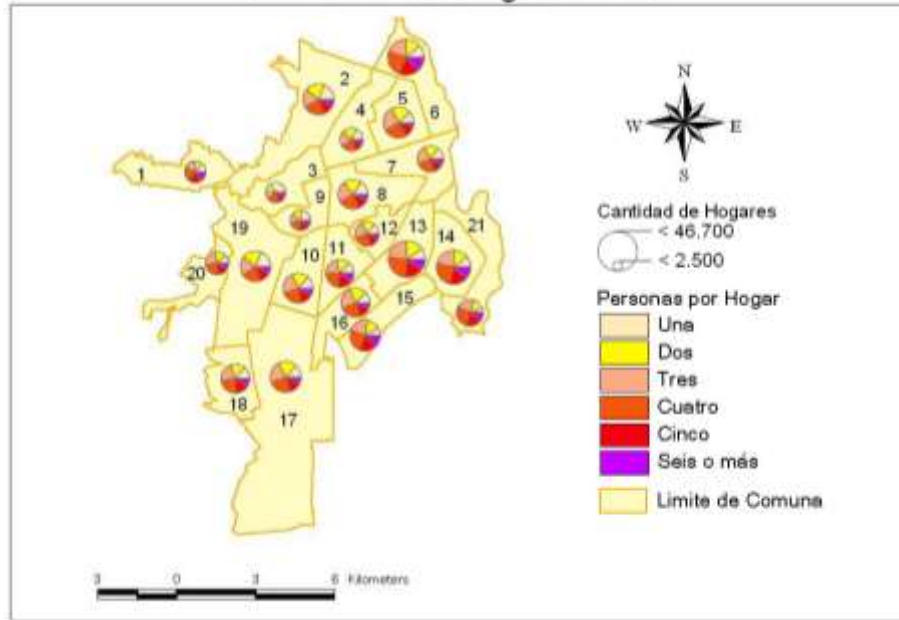


Figura 2-2. Mapa Tamaño de los Hogares – Cali.

- **Tipología de Vivienda.** La Figura 2-3 [16] presenta la distribución y la tipología de las viviendas de la ciudad de Cali, donde se observa claramente que el tipo de construcción predominante son las casas, seguido de los apartamentos.

Tipología de Vivienda - Cali

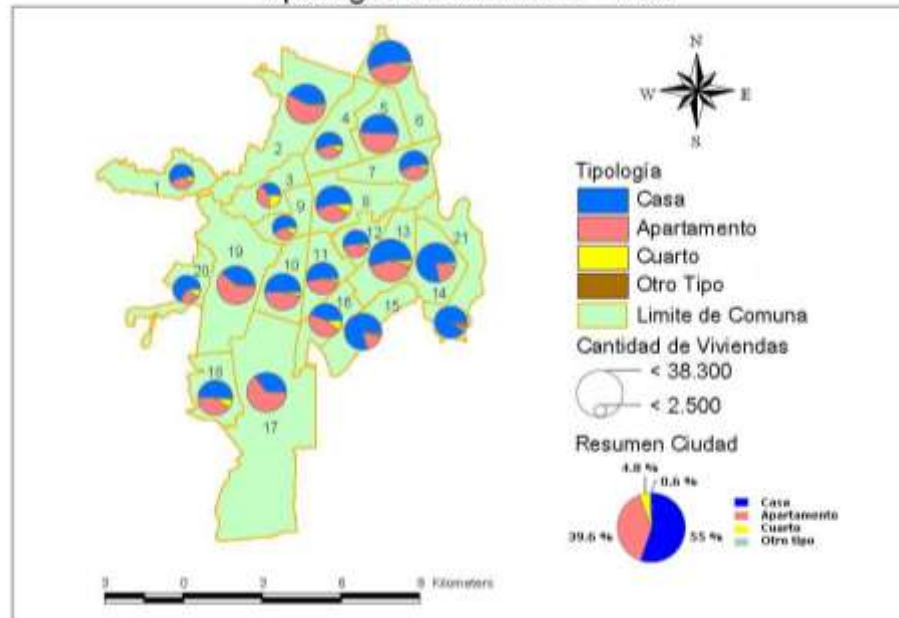


Figura 2-3. Mapa Tipología de Vivienda – Cali.

Los materiales más utilizados para la construcción de viviendas son concreto y ladrillo con más del 85%, seguido por la madera, tapia, bahareque, guadua con un 3 % aproximadamente cada uno, según información del Censo del DANE del año 1993.

- **Unidades Económicas.** La ciudad de Cali cuenta con 75.000 unidades económicas aproximadamente, de las cuales en su mayoría se dedican al comercio y a los servicios, y se encuentran ubicados en su mayoría en la parte norte y central de la ciudad, la Figura 2-4 [16] muestra la distribución de las Unidades económicas.

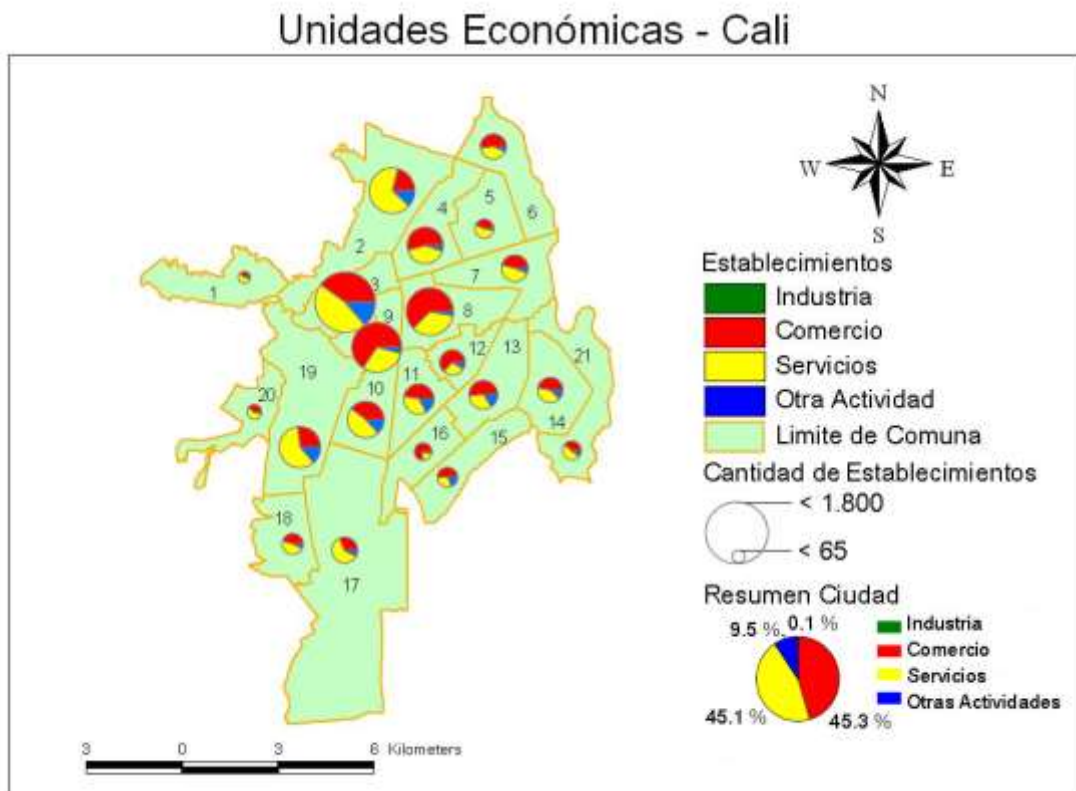


Figura 2-4. Mapa Unidades Económicas – Cali.

En la Tabla 2-1[16] se resumen algunas de las principales características de la población, viviendas y unidades económicas de la ciudad de Cali, obtenidas a partir de la información publicada por de DANE del censo realizado en el año 2005.

Tabla 2-1. Aspectos Demográficos de Cali.

Población	
Total Hogares	554.793
Total Población	2.039.626
Densidad de Población	18.710,5 Habitantes/Km ²
Número de Personas por Hogar	3,7
Hogares con Actividad Económica	12.760
Viviendas	
Vivienda Tipo Casa	276.956
Vivienda Tipo Apartamento	199.409
Vivienda Tipo Cuarto	24.171
Vivienda de Otro Tipo	3.021
Total Viviendas	503.557
Unidades Económicas	
Establecimientos dedicados a la Industria	75
Establecimientos dedicados al Comercio	33.868
Establecimientos dedicados a los Servicios	33.718
Establecimientos dedicados a otras Actividades	7.102
Total Unidades Económicas	74.763

2.2.3. Características Topográficas

La ciudad de Cali se encuentra entre los 941 m.s.n.m. (metros sobre el nivel del mar) en su parte más baja y los 1.141 m.s.n.m en la parte alta de la ciudad conformado por los cerros tutelares de la ciudad, donde se ubican la mayor parte de los asentamientos subnormales de la ciudad, debido a la ocupación ilegal de estos terrenos.

La altura promedio de la ciudad es de 995 m.s.n.m, la Figura 2-5 muestra el modelo digital del terreno, donde se puede observar con mayor detenimiento los cambios en las elevaciones.

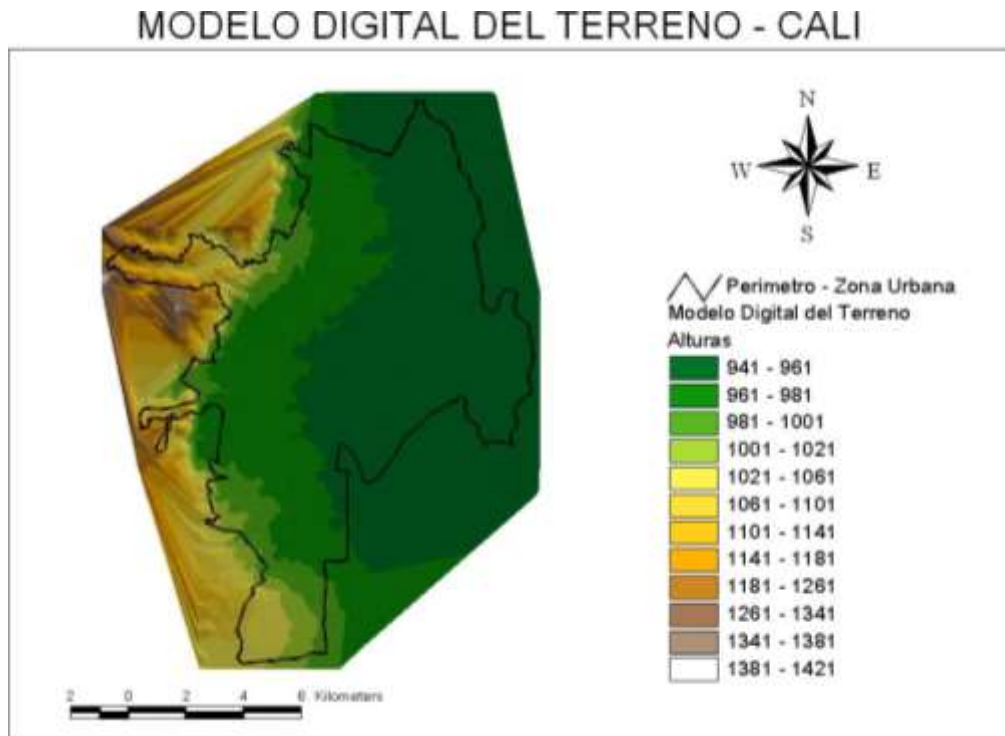


Figura 2-5. Mapa Modelo Digital del Terreno - Cali.

2.2.4. Usos de Suelo

La normativa actual para la utilización de suelo en la ciudad de Cali, tiene en cuenta los siguientes indicadores [17].

- **Área Residencial (R1, R2, R3, R4 y R5).** Específicos para vivienda unifamiliar, bifamiliar o edificación entre 4 y 12 pisos dependiendo del tipo de actividad residencial.
- **Área Mixta (M1, M2 y M3).** Propósitos múltiples en estas áreas, las edificaciones pueden tener una altura máxima de 12 pisos.
- **Industrial Mixta.** Vivienda existente, 2 pisos y altillo, y edificaciones Industriales con altura libre.
- **Industria Especial.** Edificaciones con altura, volumen y aislamiento libre.
- **Galerías.** Normas de volumetría aislamiento de acuerdo al área de actividad donde se ubique.

- **Terminal de Transportes.** Usos Mixtos, con una altura y aislamiento de 12 pisos máximo.
- **Patrimonial.** Patrimonio urbano arquitectónico.

La Figura 2-6 [17] muestra la distribución de las diferentes actividades de uso del suelo de la ciudad de Cali.

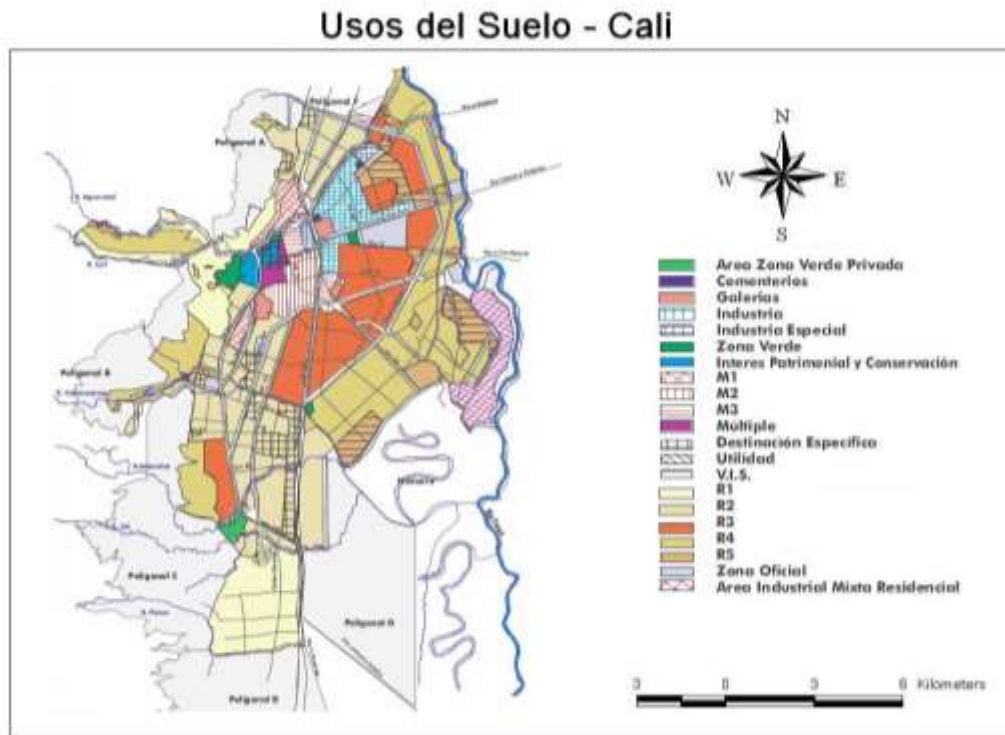


Figura 2-6. Mapa Usos del Suelo – Cali.

2.3. PALMIRA

Es una de las ciudades más importantes del Valle del Cauca por ser parte del área metropolitana de Cali, junto con las ciudades de Candelaria, Jamundí, y Yumbo, además de su creciente desarrollo agroindustrial, educativo y turístico [16].

La zona urbana de Palmira es mostrada en el mapa de la Figura 2-7 [18], como mapa base para los estudios económicos, poblacionales, de utilización del suelo de esta ciudad.

Zona Urbana de Palmira

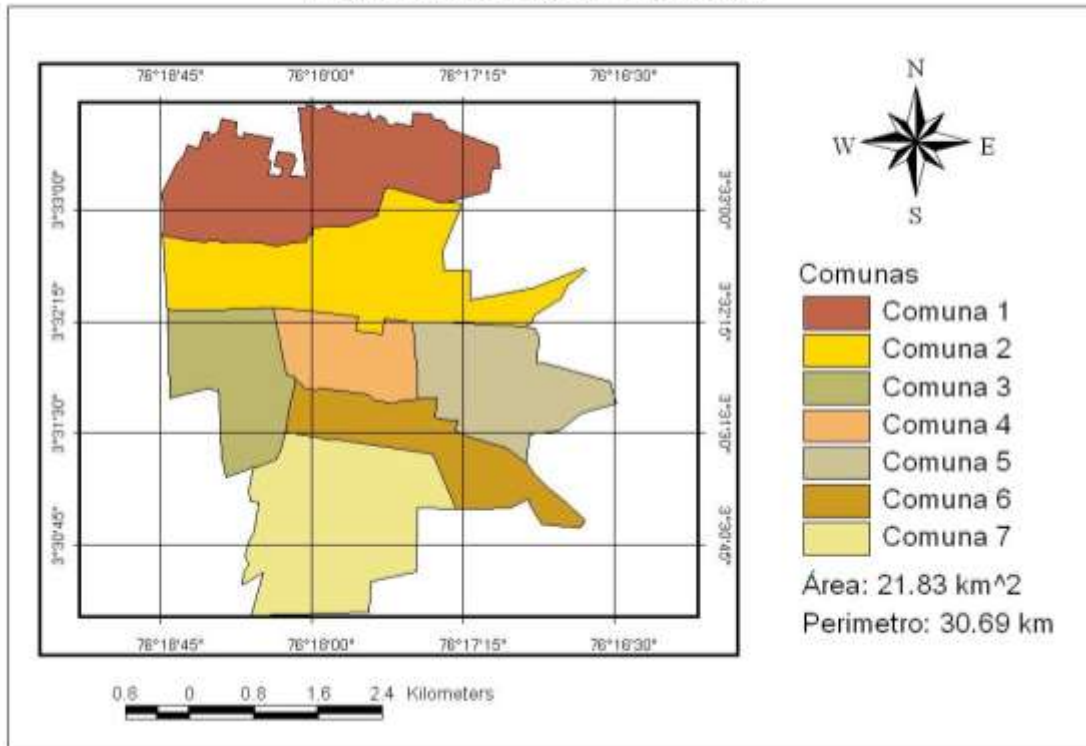


Figura 2-7. Mapa Zona Urbana de Palmira.

2.3.1. Ubicación Geográfica y Superficie

La ciudad de Palmira se encuentra a 28 Km de la Ciudad de Cali, y está ubicada en 3° 31' 48" N de latitud y 76° 18' 13" O de longitud al oriente del departamento del Valle, y su zona urbana cuenta con un área de 21,83 Km²; la Figura 2-7 [18] se muestra la ubicación geográfica de esta ciudad.

2.3.2. Características Demográficas

- **Población – Hogares.** El municipio de Palmira cuenta con 278.388 habitantes, de los cuales el 80.12 % (223.049 personas) viven la zona urbana, distribuidos en 60.590 hogares, lo cual da un promedio de 3.7 habitantes/hogar, en la Figura 2-8 [16] se muestra la distribución de los hogares dentro ciudad, partiendo de los promedio equivalentes por manzana geográfica.

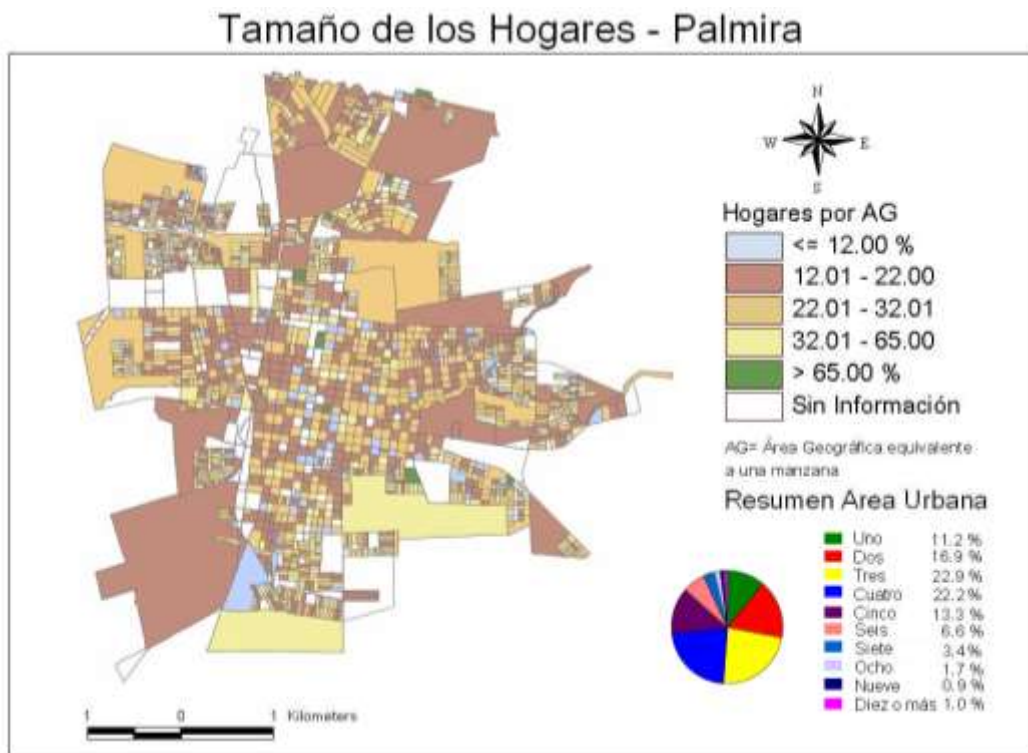


Figura 2-8. Mapa Tamaño de los Hogares – Palmira.

- Tipología de Vivienda.** En el área urbana de Palmira existen 56.573 viviendas, de las cuales el 73.9 % son casas, el 20.1 % son apartamentos, la Figura 2-9 [16] muestra la distribución y la tipología de las viviendas en áreas geográficas equivalentes a una manzana.

En las viviendas construidas hasta el año 1993 según el DANE, el 87.2 % utilizan concreto y ladrillo, seguido por la tapia pisada con un 8.37 %, como los materiales más comunes.

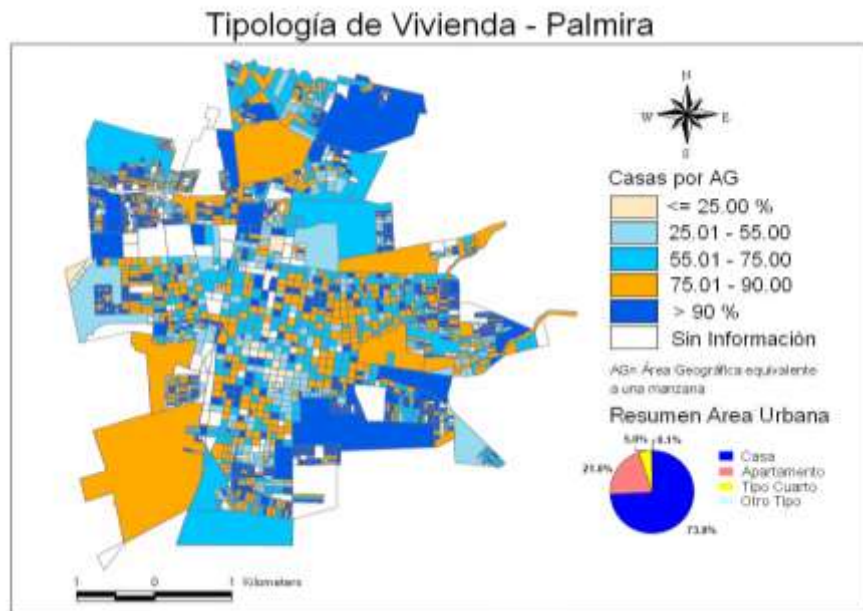


Figura 2-9. Mapa Tipología de Vivienda – Palmira.

- **Unidades Económicas.** En Palmira existe 8.643 unidades económicas, siendo el comercio la más importante con un 54 % de las unidades, seguido por los servicios con un 31 %, la industria con un 9% y otras actividades con 6 %, la Figura 2-10 [16] muestra el mapa de Palmira con la distribución de las Unidades económicas por manzana.

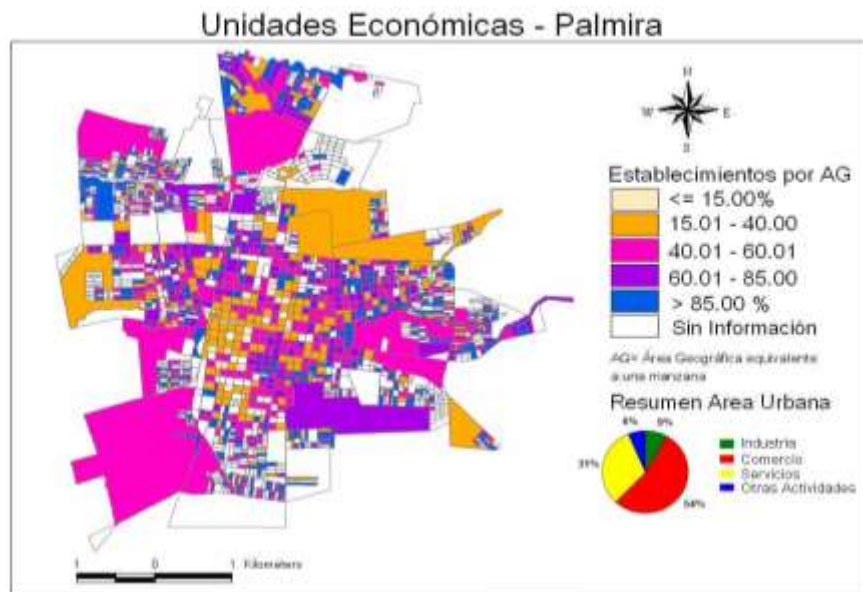


Figura 2-10. Mapa Unidades Económicas – Palmira.

En la Tabla 2-2 [16] se resumen algunas de las principales características de la población, viviendas y unidades económicas de la ciudad de Palmira, obtenidas a partir de la información publicada por de DANE del censo realizado en el año 2005.

Tabla 2-2. Aspectos Demográficos de Palmira.

Población	
Total Hogares	60.590
Total Población	223.049
Densidad de Población	10.217,5 Habitantes/Km ²
Número de Personas por Hogar	3.7
Hogares con Actividad Económica	3.454
Viviendas	
Vivienda Tipo Casa	41.807
Vivienda Tipo Apartamento	11.880
Vivienda Tipo Cuarto	2829
Vivienda de Otro Tipo	57
Total Viviendas	56.573
Unidades Económicas	
Establecimientos dedicados a la Industria	778
Establecimientos dedicados al Comercio	4.667
Establecimientos dedicados a los Servicios	2.679
Establecimientos dedicados a otras Actividades	519
Total Unidades Económicas	8.643

2.3.3. Características Topográficas

La ciudad de Palmira se encuentra entre los 990 m.s.n.m. en su parte más baja y los 1.025 m.s.n.m en la parte alta, con una altura promedio de 1005 m.s.n.m., el modelo digital del terreno de la Figura 2-11 muestra las diferentes elevaciones a lo largo de la ciudad, de lo cual podemos concluir que su terreno es semiplano.

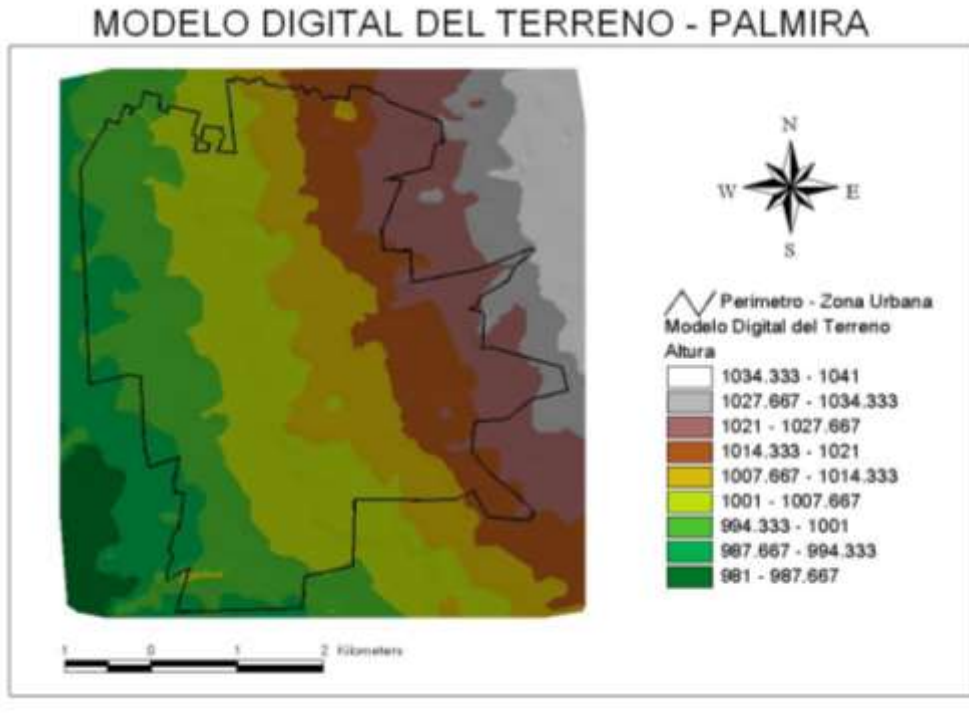


Figura 2-11. Mapa Modelo Digital del Terreno - Palmira.

2.4. POPAYÁN

La ciudad de Popayán se ha desarrollado durante los últimos años como ciudad universitaria, gracias al creciente número de instituciones de educación superior, dentro de las cuales se destacan la Universidad del Cauca, el Colegio Mayor, Universidad Cooperativa de Colombia, entre otros, razón por la cual se ha consolidado como un centro de convergencia para estudiantes de Nariño Huila y Valle, facilitando el desarrollo del comercio en la ciudad.

La Figura 2-12 [19] muestra el mapa de la zona urbana de Popayán, sobre la cual se realiza el estudio demográfico, topográfico.

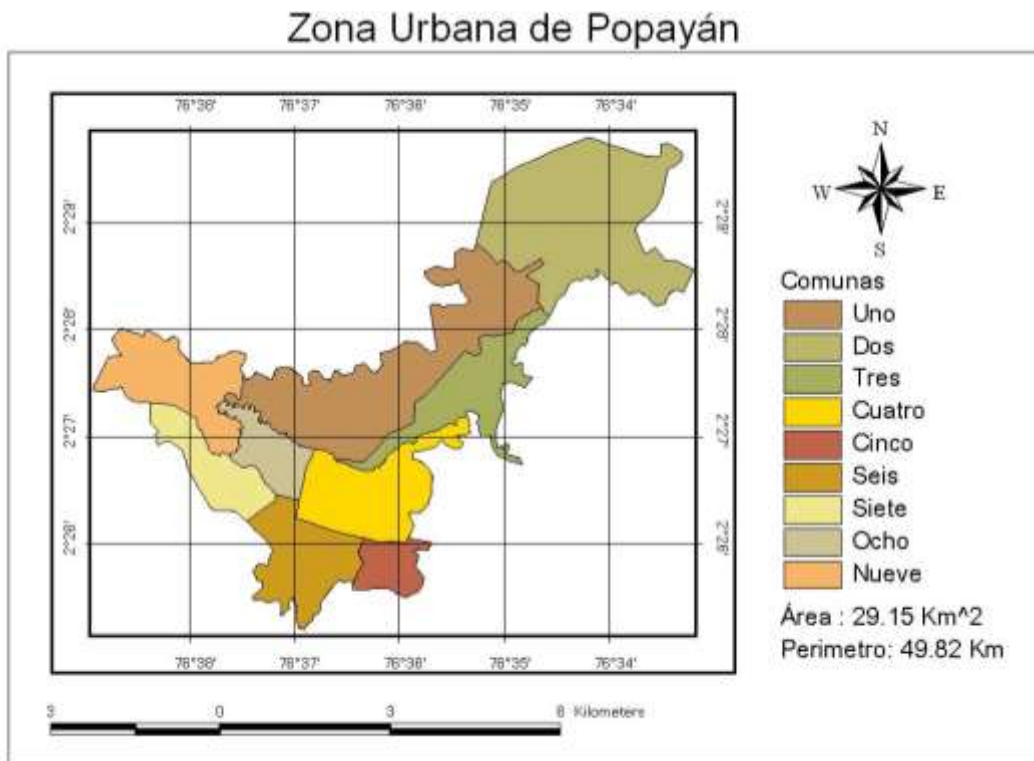


Figura 2-12. Mapa Zona Urbana de Popayán.

2.4.1. Ubicación Geográfica y Superficie

La zona urbana de Popayán cuenta con una extensión territorial de 29.15 Km², y se encuentra localizada en el Valle de Pubenza, entre la Cordillera Occidental y Central, en las coordenadas 2° 26' 39" N 76° 37' 17" O. La Figura 2-12 [19] muestra el mapa de Popayán con sus coordenadas.

2.4.2. Características Demográficas

- Población – Hogares.** Popayán cuenta con 59.839 hogares, entre los cuales se distribuyen 227.840 personas para un promedio de 3.8 personas por hogar, además el 6 % de los hogares cuenta con unidad económica, en la Figura 2-13 [16] se puede observar la distribución de los hogares dentro de esta ciudad.

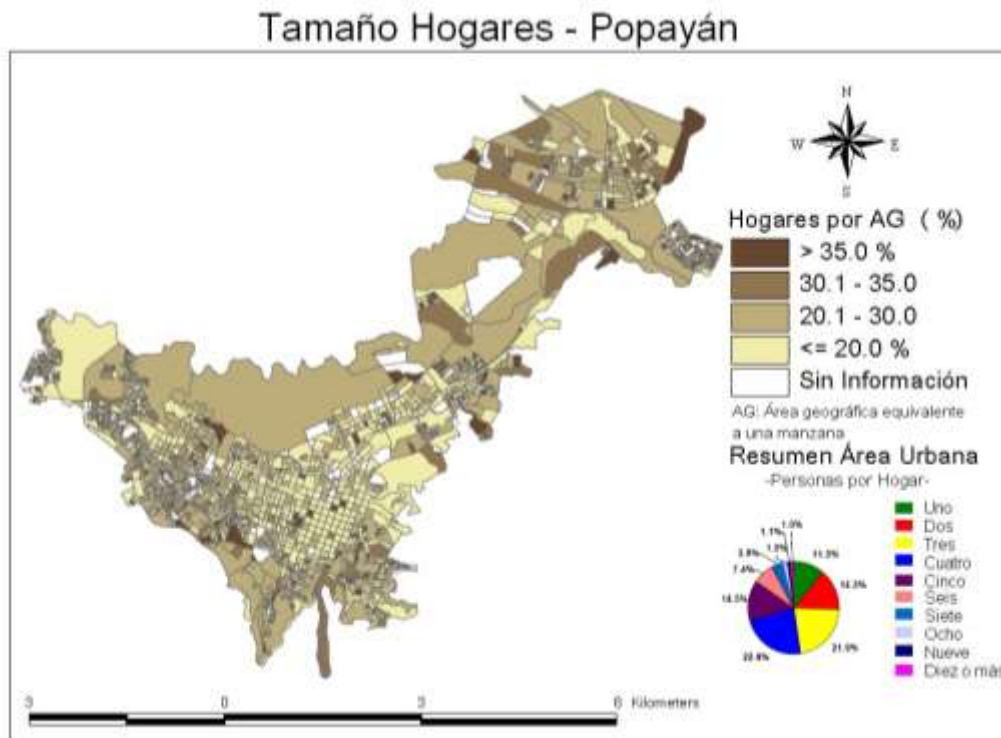


Figura 2-13. Mapa Tamaño de los Hogares – Popayán.

- **Tipología de Vivienda.** En Popayán actualmente hay 56.060 viviendas, de las cuales el tipo de construcción predominante son las casas con el 82,1 %, seguido de los apartamentos con el 12,1 %, la Figura 2-14 [16] presenta la distribución de las viviendas en la ciudad de Popayán.

Para el año 93, los materiales más utilizados en la construcción de viviendas en Popayán eran el ladrillo y concreto con un 90%, seguido por la guadua con un 3%.

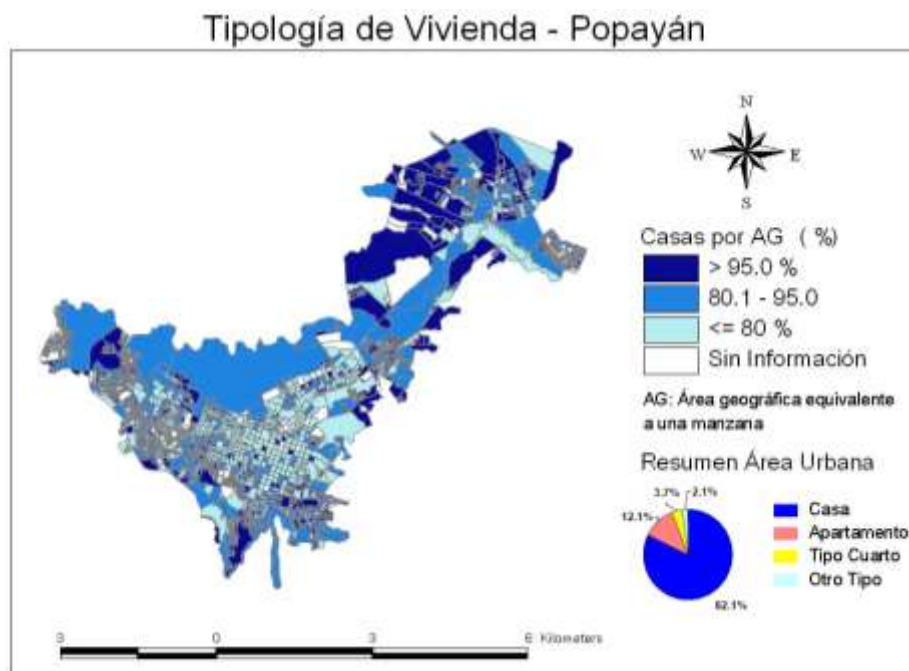


Figura 2-14. Mapa Tipología de Vivienda – Popayán.

- **Unidades Económicas.** El comercio es la actividad económica más importante, ya que de las 10.529 unidades económicas el 49 % de los establecimientos pertenecen a esta actividad, la Figura 2-15 [16] muestra la distribución de las unidades económicas por manzana.

La Tabla 2-3 [16] resume algunas de las principales características de la población, viviendas y unidades económicas de Popayán, obtenidas a partir de la información publicada por de DANE del censo realizado en el año 2005.

Unidad Económica - Popayan

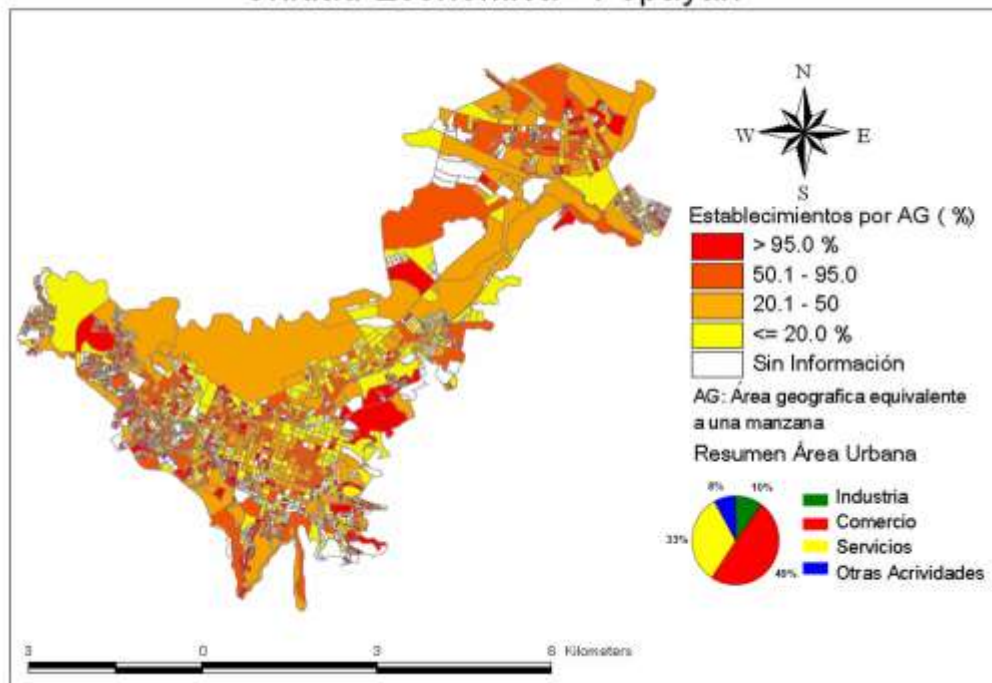


Figura 2-15. Mapa Unidades Económicas – Popayán.

Tabla 2-3. Aspectos Demográficos de Popayán.

Población	
Total Hogares	59.839
Total Población	227.840
Densidad de Población	7.816,1 Habitantes/Km ²
Número de Personas por Hogar	3,8
Hogares con Actividad Económica	3590
Viviendas	
Vivienda Tipo Casa	46.025
Vivienda Tipo Apartamento	6.783
Vivienda Tipo Cuarto	2.074
Vivienda de Otro Tipo	1178
Total Viviendas	56.060
Unidades Económicas	
Establecimientos dedicados a la Industria	1.053
Establecimientos dedicados al Comercio	5.159
Establecimientos dedicados a los Servicios	3.475
Establecimientos dedicados a otras Actividades	842
Total Unidades Económicas	10.529

2.4.3. Características Topográficas

Popayán cuenta con variaciones notables de la topografía a lo largo de la ciudad, encontrando las alturas mínimas alrededor de los 1680 m.s.n.m en la parte occidental, y hacia la parte norte las alturas máximas con un promedio de 1880 m.s.n.m., la altura promedio de la ciudad es de 1737 m.s.n.m, la Figura 2-16 muestra el modelo digital del terreno, donde se puede observar con mayor detenimiento los cambios en las elevaciones.

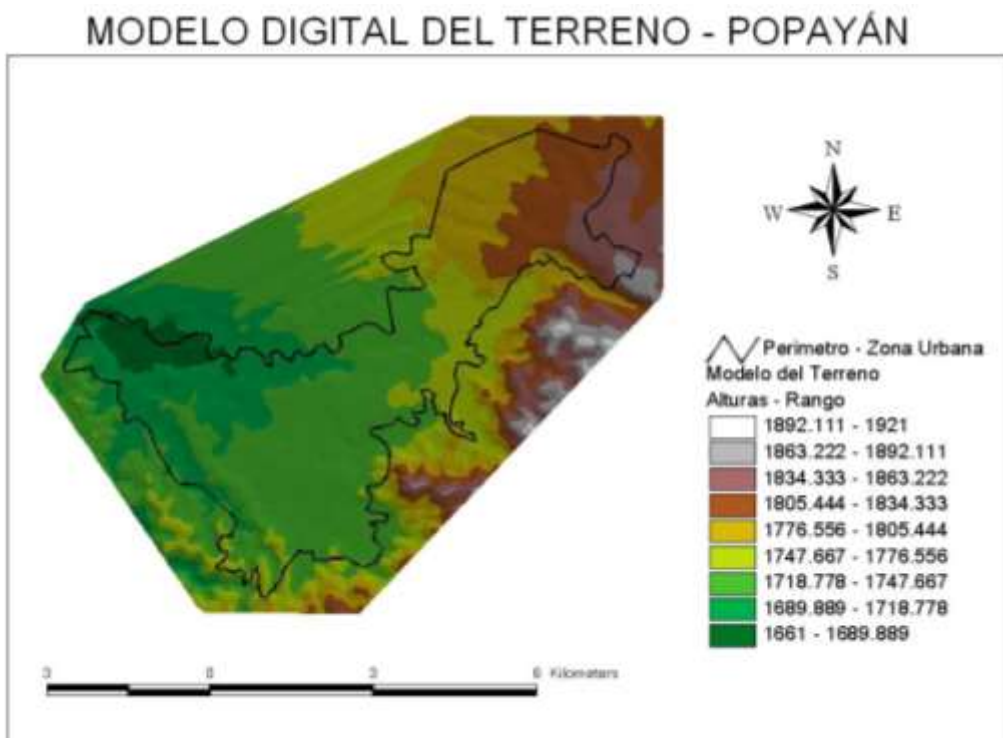


Figura 2-16. Mapa Modelo Digital del Terreno - Popayán.

2.4.4. Usos de Suelo

El POT de Popayán define los usos del suelo urbanos para la cabecera municipal y parte de sus alrededores, la Tabla 2-4 [19] resume las áreas proyectadas para los diferentes tipos de suelos.

2.5. TULUÁ

La ciudad de Tuluá es una de las ciudades más importantes del departamento del Valle, por ser un epicentro regional, comercial, industrial y agrícola, y por jugar un papel de centro equidistante entre Cartago, Armenia y Pereira hacia el norte y con Cali hacia el sur.

La Figura 2-18 [20] muestra el área urbana del municipio de Tuluá, sobre el cual se realiza el estudio demográfico, topográfico y de usos de suelo.

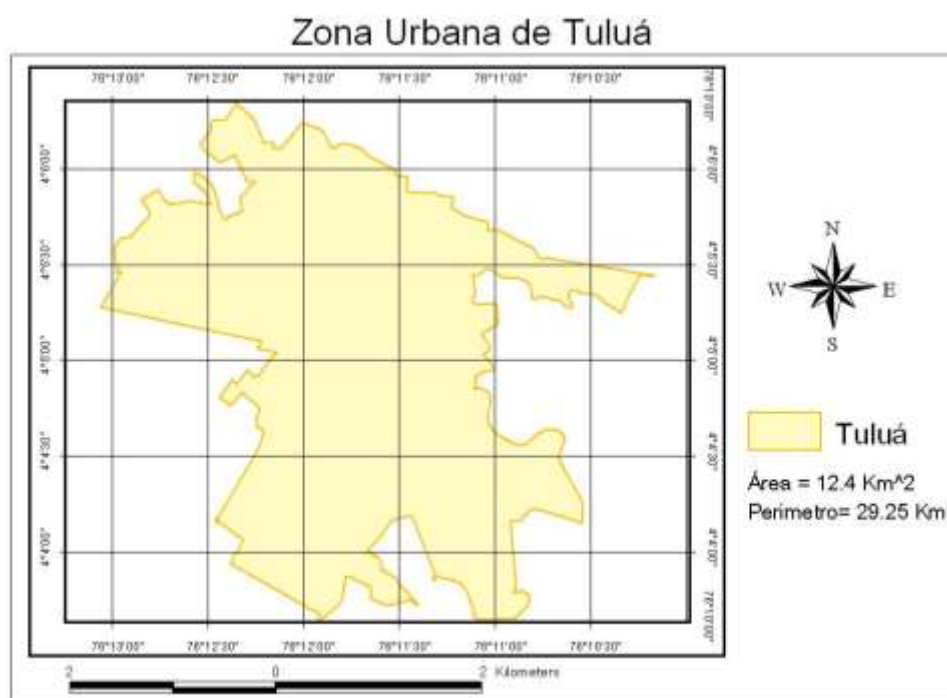


Figura 2-18. Zona Urbana de Tuluá.

2.5.1. Ubicación Geográfica y Superficie

Tuluá está ubicado en la zona Centro del Departamento Del Valle del Cauca a 102 Km de Cali, a 172 Km de Buenaventura y a 24 Km de Buga, es atravesado de sur a norte por el río Tuluá, cuenta con una extensión de 12.4 Km² y se encuentra a 4° 05' de latitud norte y 76° 12' de longitud occidental [20].

2.5.2. Características Demográficas

- **Población – Hogares.** La población en la zona urbana de Tuluá es de 157.512 personas, distribuida entre 42.452 hogares, lo cual representa un promedio de 3.7 personas por hogar. En la Figura 2-19 [16] se observa el porcentaje de hogares por manzana, de habitantes por hogar.

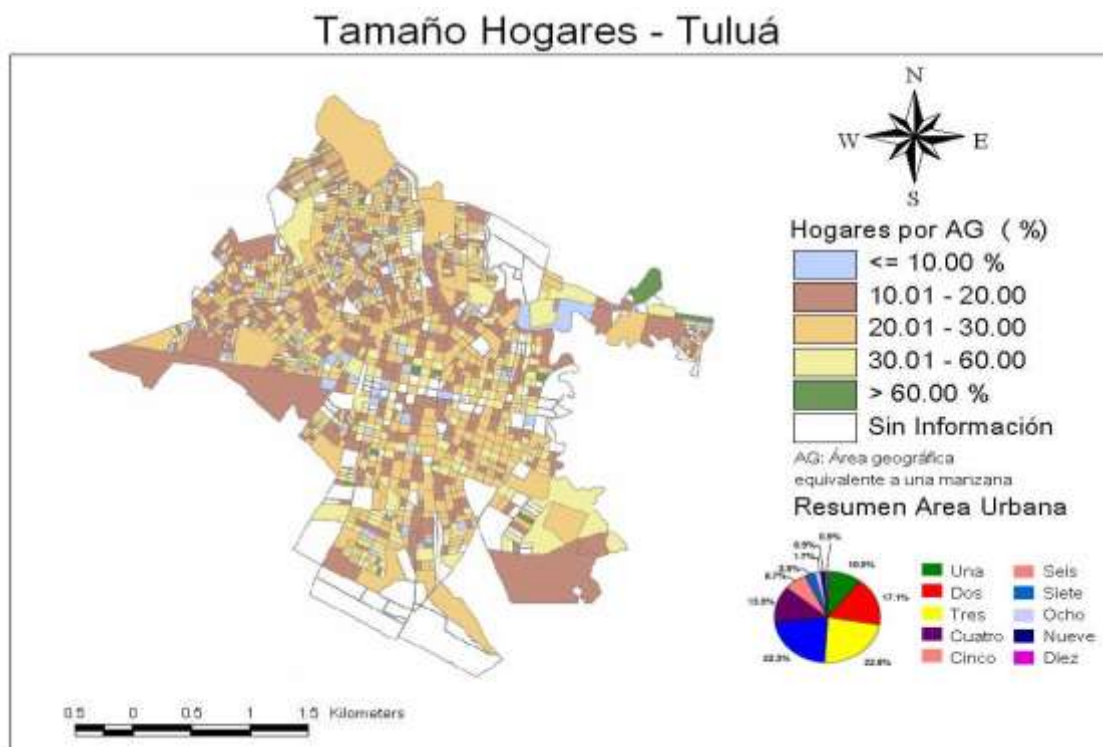


Figura 2-19. Mapa Tamaño de los Hogares – Tuluá.

- **Tipología de Vivienda.** En Tuluá el tipo de vivienda predominante son las casas con un 66,6 % de las 42.543 existentes en la ciudad, la Figura 2-20 [16] muestra la distribución de las casas por manzana y el porcentaje de cada tipo de vivienda.

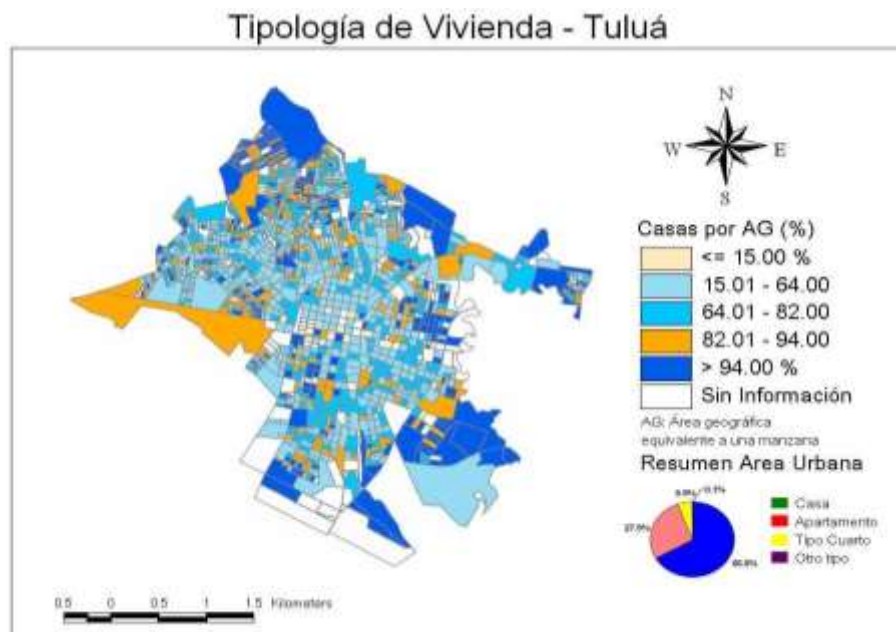


Figura 2-20. Mapa Tipología de Vivienda – Tuluá.

- **Unidades Económicas.** La ciudad de Tuluá cuenta con un total de 11.008 unidades económicas, de las cuales el comercio es la unidad predominante con un 52% del total, la Figura 2-21 [16] presenta la distribución de los establecimientos por manzana y el porcentaje de participación de las actividades económicas dentro de la ciudad.

La Tabla 2-5 [16] resume algunas de las principales características de la población, viviendas y unidades económicas de la ciudad de Tuluá, obtenidas a partir de la información publicada por de DANE del censo realizado en el año 2005.

Unidad Económica - Tuluá

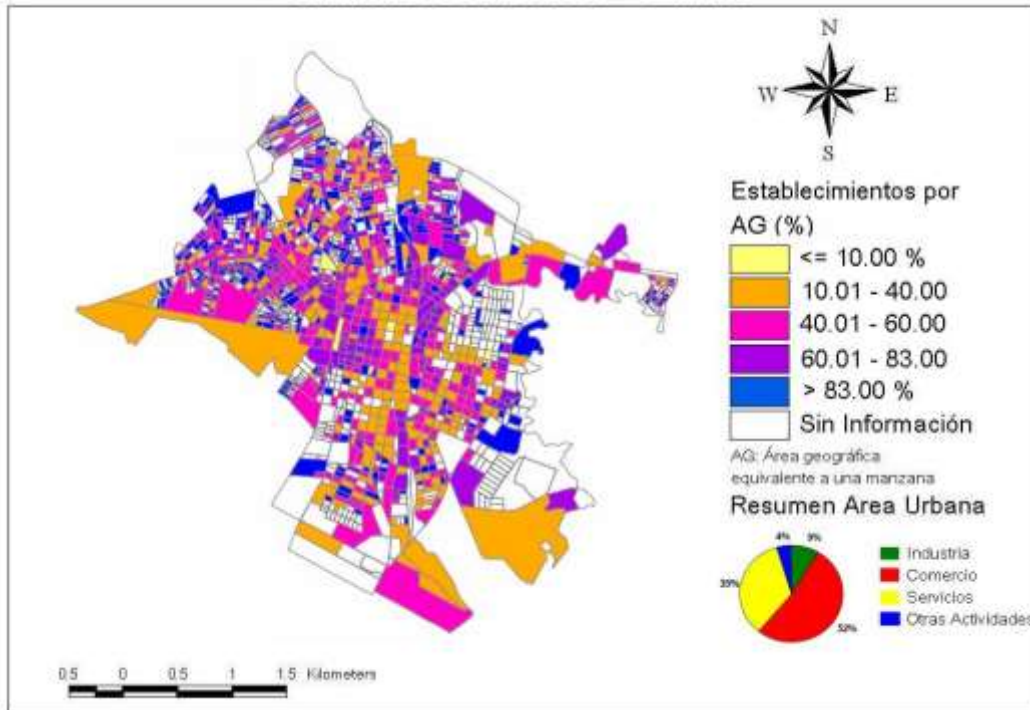


Figura 2-21. Mapa Unidades Económicas – Tuluá.

Tabla 2-5. Aspectos Demográficos de Tuluá.

Población	
Total Hogares	42.452
Total Población	157.512
Densidad de Población	12.702,6 Habitantes/Km ²
Número de Personas por Hogar	3,7
Hogares con Actividad Económica	2972
Viviendas	
Vivienda Tipo Casa	28.334
Vivienda Tipo Apartamento	11.870
Vivienda Tipo Cuarto – Otro Tipo	2.339
Total Viviendas	42.543
Unidades Económicas	
Establecimientos dedicados a la Industria	991
Establecimientos dedicados al Comercio	5.724
Establecimientos dedicados a los Servicios	3.853
Establecimientos dedicados a otras Actividades	440
Total Unidades Económicas	11.008

2.5.3. Características Topográficas

La Figura 2-22 muestra las características topográficas del terreno mediante el modelo digital del terreno de Tuluá, en la grafica se puede apreciar que la ciudad se ubica sobre un terreno casi plano, con una altura promedio de 973 m.s.n.m.

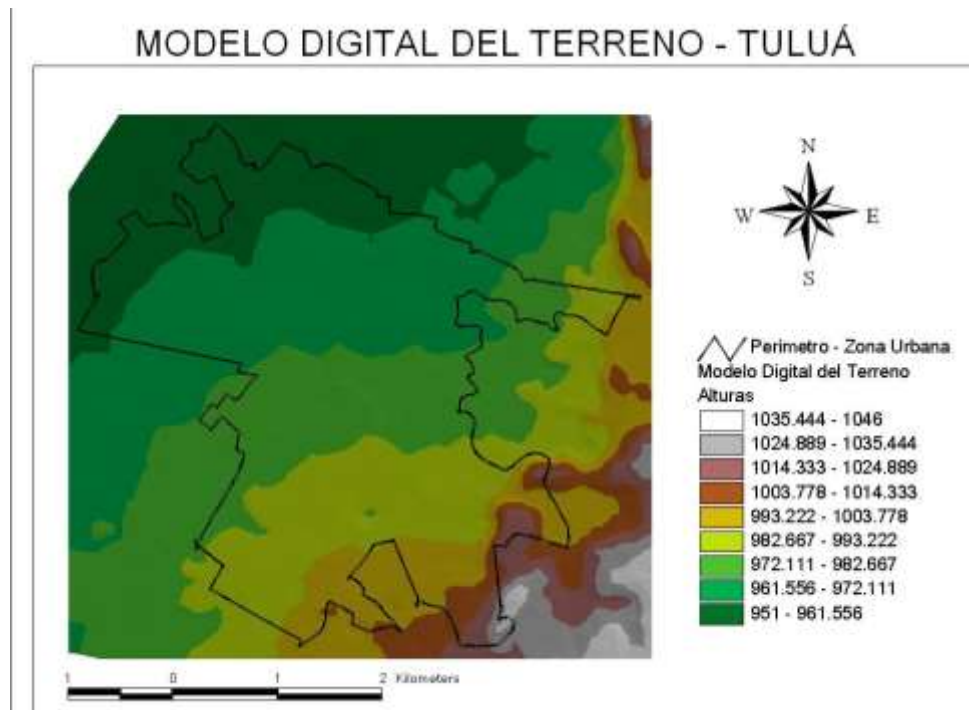


Figura 2-22. Mapa Modelo Digital del Terreno – Tuluá.

2.5.4. Usos de Suelo

Tuluá clasifica el uso del suelo dependiendo de las actividades que se llevan a cabo en este, las principales divisiones son: residencial, industrial, además define nodos para desarrollo, ecológicos entre otros, la Figura 2-23 [20] presenta el mapa de los usos de suelo.

Usos de Suelo - Tuluá

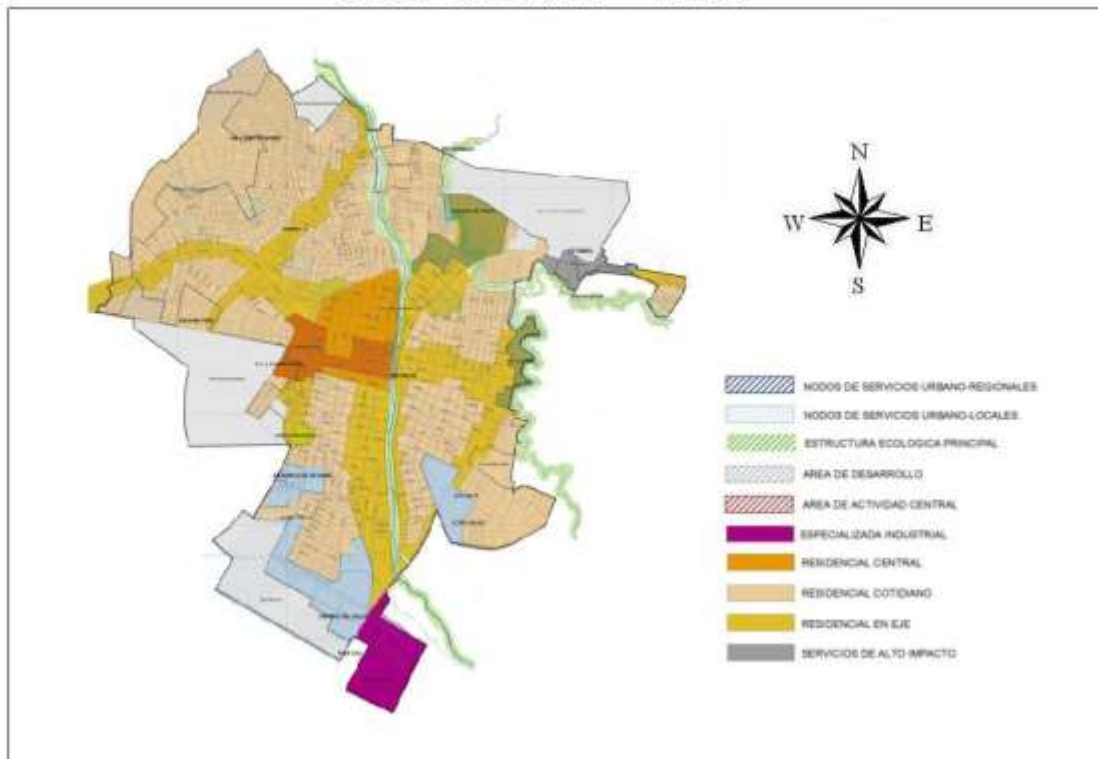


Figura 2-23. Mapa Usos del Suelo – Tuluá.

Es importante la recolección de la información demográfica, topográfica de las ciudades en las cuales se desea desplegar una red inalámbrica, pues, esto permite una apropiada selección de los modelos de propagación, cálculos de capacidad, selección de sistema. En este capítulo se desarrolló la recolección de esa información para cuatro ciudades seleccionadas, con diferentes densidades poblacionales, extensiones, que servirán de ejemplo para el diseño de redes WMAN, aplicando los criterios que se generan en el capítulo 4.

3. ANÁLISIS DEL MARCO REGULATORIO EN LA PRESTACIÓN DE SERVICIOS WIFI Y WIMAX EN COLOMBIA

Este capítulo trata los aspectos legales del marco regulatorio colombiano vigente para la prestación de servicios a través de este tipo de redes. Este capítulo será de vital importancia, dado que en él se definen los límites técnicos y de prestación de servicios que deben ser tenidos en cuenta para el funcionamiento de un WISP que opere en las bandas de frecuencia de las tecnologías de interés.

3.1. BANDAS DE FRECUENCIA Vs. TECNOLOGÍA

En este punto se debe hacer una distinción entre el tipo de banda de frecuencia y la tecnología que será utilizada para la prestación del servicio. Por un lado se tienen las bandas licenciadas y no licenciadas, y desde el punto de vista tecnológico se tiene a WiFi y WiMAX, que son dos tecnologías con segmentos de utilización totalmente diferentes. Para lograr un mejor entendimiento de cómo estos dos aspectos interactúan, se realizará una aproximación desde cada tecnología haciendo énfasis en las bandas que cada una utiliza.

- **WiMAX.** Hasta el momento, los esfuerzos tanto del WiMAX *Forum* como de la IEEE por el desarrollo y masificación de esta tecnología, han estado enfocados prácticamente en el rango de 2 a 11 GHz, para aplicaciones punto a multipunto y sin línea de vista, siendo las redes de área metropolitana o WMAN el segmento de mercado para la cual fue diseñada y en donde se espera tenga mayor impacto. En este sentido, las bandas de frecuencia aceptadas mundialmente para su implementación son: 5.8, 3.5 y 2.5 GHz (Tabla 3-1[1]).
- **Banda sin licencia de 5 GHz.** Este rango de frecuencia va desde los 5.25 hasta 5.85 GHz. En la parte alta de la banda, que corresponde también a la

banda U-NII⁶ (5.725 – 5.850 GHz), muchos países permiten potencias de salida superiores a 1 *Watt*, lo cual hace de ella una banda de trabajo muy atractiva para aplicaciones de gran cobertura.

- **Banda con licencia de 3.5 GHz.** Corresponde a las bandas entre los 3.4 y 3.6 GHz, las cuales han sido designadas por la mayoría de países para dar accesos de banda ancha, con excepción de los Estados Unidos, en donde es utilizada para operaciones del gobierno.
- **Banda con licencia de 2.5 GHz.** Las bandas entre los 2.5 y 2.69 GHz han sido habilitadas en Estados Unidos, México, Brasil y algunos países asiáticos, para aplicaciones de banda ancha.

Tabla 3-1. Resumen de la asignación mundial de frecuencias para WiMAX.

País/Área geográfica	Bandas utilizadas
Norte América, México	2.5 y 5.8 GHz
América central y Sur América	2.5, 3.5 y 5.8 GHz
Europa oriental y occidental	3.5 y 5.8 GHz
Medio Oriente y África	3.5 y 5.8 GHz
Asia Pacífico	3.5 y 5.8 GHz

Como se mencionó anteriormente, las entidades encargadas de la regulación de WiMAX están enfocando sus esfuerzos en el rango de frecuencias que va desde los 2 a 11 GHz, debido a los múltiples beneficios que este ofrece, tanto desde el punto de vista técnico como comercial. A estas frecuencias, las ondas de radio pueden penetrar más fácilmente los edificios, así como bordear y reflejarse en obstáculos para lograr una extensión en la cobertura, permitiendo que la estación base y los dispositivos clientes no requieran una línea de vista directa, lo cual es de gran utilidad en ambientes urbanos [2]. Sin embargo, la regulación es un aspecto sumamente importante en el despliegue de la tecnología y que deberá ser tenido en cuenta en la escogencia del perfil adecuado para cada escenario.

Diferentes versiones o perfiles de WiMAX han sido definidos para estas frecuencias, como resultado de los diferentes sistemas de regulación que gobiernan la asignación

⁶ U-NII (*Unlicensed National Information Infrastructure*), banda de frecuencia designada por la Comisión Federal de Comunicaciones Estadounidense para libre utilización de equipos de radio.

del espectro radioeléctrico. Por ejemplo, la banda de 3.5 GHz requiere de licencia para su operación, pero su rango de cobertura puede llegar hasta los 10 Km (aunque en la práctica el radio típico de las celdas es de 2 – 4 Km), lo cual la hace ideal para aplicaciones de gran cobertura. Por su parte, la banda de 5 GHz no requiere licencia en la mayoría de países, lo cual significa que cualquiera puede hacer uso de ella, pero toda implementación en dicha banda esta expuesta a congestión e interferencia. Esto conlleva a que cualquier equipo certificado WiMAX debe operar a niveles de potencia mucho menores con áreas de cobertura limitadas.

Aunque las bandas sin licencia presentan una gran oportunidad de negocio, esto no quiere decir que aquellos interesados en operar en ellas no deban someterse a ciertas reglas técnicas, y obviamente constituirse como empresas legalmente establecidas para la prestación de servicios de valor agregado o telefonía, lo cual también conlleva la adquisición de una licencia ante el organismo regulador de servicios de telecomunicaciones de cada país. A su vez, los equipos utilizados deben estar debidamente aprobados y certificados por los organismos de regulación internacionales, lo cual es de gran importancia para garantizar una correcta interoperabilidad entre diferentes fabricantes y poder brindar una mayor versatilidad al despliegue de la red. Los primeros perfiles WiMAX a ser certificados se listan en la Tabla 3-2 [13].

Tabla 3-2. Primeros perfiles de sistemas para la certificación WiMAX.

Frecuencia	Duplexación	Ancho del Canal	Nombre del Perfil
3.5 GHz	TDD	7 MHz	3.5T1
3.5 GHz	TDD	3.5 MHz	3.5T2
3.5 GHz	FDD	3.5 MHz	3.5F1
3.5 GHz	FDD	7 MHz	3.5F2
5.8 GHz	TDD	10 MHz	5.8T

- **WiFi.** Esta tecnología fue desarrollada pensando en aplicaciones de área local, *hotspots*, redes internas para empresas, *campus* universitarios, entre otros, pero siempre pensando en dispositivos de utilización masiva y de bajo costo, por lo cual hace uso de las bandas sin licencia disponibles dentro del espectro y que son apropiadas para ofrecer servicios de banda ancha.
- **802.11 b/g.** Este estándar trabaja en la banda ISM (*Industry, Scientific and Medical*) de 2.4 GHz, la cual esta asignada a nivel mundial para todo tipo de

aplicaciones tanto empresariales, educativas y de entretenimiento. Esto significa que un equipo certificado WiFi 802.11 b/g no requiere de una licencia de las autoridades competentes para su puesta en marcha. Esta tecnología ocupa 11 canales sobre la banda, empezando en 2.412 GHz hasta 2.462 GHz en pasos de 5 MHz. Debido a que cada canal ocupa 22 MHz, solo los canales 1, 6 y 11 se consideran libres de interferencia, y son factibles de utilizar en áreas pequeñas o donde sea necesario realizar re-uso de frecuencia, en la Tabla 3-3 [14] se ilustra esta asignación de canales.

Tabla 3-3. Asignación de canales para 802.11 b/g.

Canal	Frecuencia Inferior (GHz)	Frecuencia Central (GHz)	Frecuencia Superior (GHz)
1	2.4010	2.4120	2.4230
2	2.4060	2.4170	2.4280
3	2.4110	2.4220	2.4330
4	2.4160	2.4270	2.4380
5	2.4210	2.4320	2.4430
6	2.4260	2.4370	2.4480
7	2.4310	2.4420	2.4530
8	2.4360	2.4470	2.4580
9	2.4410	2.4520	2.4630
10	2.4460	2.4570	2.4680
11	2.4510	2.4620	2.4730

Aunque aquí solo se han presentado 11 canales, en realidad se encuentran disponibles 14, pero dado que la regulación colombiana, que sigue los lineamientos de la Comisión Federal de Comunicaciones estadounidense FCC, solo acepta esta canalización, el estudio de estos será omitido.

- **802.11 a.** La versión a del estándar 802.11 puede utilizar la banda ISM de 5.8 GHz (5.725 GHz – 5.825 GHz) o la parte alta de la banda U-NII. Esta banda tiene asignados 300 MHz de espectro y está dividida en tres secciones de 100 MHz. Las dos primeras son adyacentes y la tercera esta 375 MHz por encima del tope de la segunda, la distribución de espectro para estas bandas se muestra en la Tabla 3-4 [21].

Tabla 3-4. Asignación del espectro para la banda ISM y U-NII.

Banda/Parte del espectro	Comienzo (GHz)	Final (GHz)
Parte 87	0.4700	10.5000
Parte 97	2.3900	2.4500
Parte15	2.4000	2.4830
Parte 18	2.4000	2.5000
Parte 80	2.4000	9.6000
ISM 802.11b/g	2.4010	2.4730
Parte 74	2.4500	2.4835
Parte 101	2.4500	2.5000
Parte 90	2.4500	2.8350
Parte 25	5.0910	5.2500
U-NII Baja	5.1500	5.2500
U-NII Media	5.2500	5.3500
Parte 97	5.6500	5.9250
U-NII Alta	5.7250	5.8250
ISM 802.11a	5.7250	5.8500
Parte 18	5.7250	5.8750

La tecnología 802.11a utiliza modulación digital OFDM, al igual que 802.11g, con 64 sub portadoras de 300 KHz agrupadas en canales de 20 MHz. Esta característica la hace más flexible y resistente a la interferencia multi-trayecto y de otros equipos. Sin embargo, debido a que utiliza casi el doble de la frecuencia de 802.11b/g, presenta mayores pérdidas de espacio libre, alcanzando alrededor del 18% de la señal que se obtendría con 802.11b/g, con la misma configuración de antenas y potencia de transmisión.

3.2. REGULACIONES Y LEYES QUE AFECTAN EL DESPLIEGUE DE REDES 802.11 Y 802.16 EN COLOMBIA

3.2.1. Bandas sin licencia.

La base para la explotación de frecuencias de uso libre en Colombia es la Resolución 689 de Abril de 2004 [22]. A continuación se hace una revisión de los aspectos más importantes de esta norma, necesarios para llevar a cabo una buena práctica de ingeniería en la implementación de este tipo de redes.

- **Bandas de frecuencia atribuidas para este fin.** Dentro del territorio nacional se atribuyen a título secundario, para una operación sobre una base de no interferencia y no protección de interferencia, los siguientes rangos de frecuencias radio eléctricas (Tabla 3-5) para su libre utilización por sistemas de acceso inalámbrico que empleen tecnologías de espectro ensanchado y modulación digital, de banda ancha y baja potencia:

Tabla 3-5. Bandas de frecuencia de uso libre en Colombia.

Banda de frecuencia
902 a 928 Mhz
2400 a 2483.5 Mhz
5150 a 5250 Mhz
5250 a 5350 Mhz
5470 a 5725 Mhz
5725 a 5850 Mhz

La resolución hace referencia a dos tipos de modulación, la primera es la modulación de espectro ensanchado (DSSS y FHSS) y la segunda son las modulaciones digitales. Dentro de esta última categoría se incluye la modulación OFDM que utilizan las tecnologías basadas en el estándar IEEE 802.16, WiMAX y Pre WiMAX, así como los estándares WiFi 802.11 a/g, las cuales son de interés para este proyecto.

- **Condiciones operativas en las bandas de 902 a 928 MHz, 2400 a 2483,5 MHz y 5725 a 5850 MHz.** En este punto la resolución trata los sistemas de salto en frecuencia DSSS y FHSS en las bandas antes mencionadas, pero dado que el proyecto está enfocado hacia tecnologías inalámbricas que hacen uso de técnicas de modulación digital, se revisarán solo las normas que apliquen para ellas.
 - La resolución establece, que los sistemas que utilizan técnicas de modulación digital pueden operar en las bandas de 902 a 928 MHz, de 2400 a 2483,5 MHz, y de 5725 a 5850 MHz. El ancho de banda mínimo a 6 dB de potencia en recepción debe ser de por lo menos 500 kHz.
 - **Potencia.** La potencia de salida máxima del transmisor en sistemas que utilicen modulación digital en las bandas de 902 a 928 MHz, de 2400 a 2483,5 MHz, y de 5725 a 5850 MHz, no excederá 1 vatio o 30 dBm de potencia.

- **Antenas directivas.** Si se utilizan antenas directivas con ganancia mayor a 6 dBi, la potencia pico de salida del transmisor debe ser reducida por debajo de los valores establecidos, como sea apropiado por la cantidad de dB que la ganancia de la antena exceda los 6 dBi.
 - Los sistemas en la banda de 2400 a 2483,5 MHz, que sean utilizados exclusivamente para operaciones fijas punto a punto, pueden emplear antenas de transmisión directivas con ganancia mayor a 6 dBi siempre y cuando la máxima potencia pico de salida del transmisor sea reducida en 1 dB por cada 3 dB que la ganancia de la antena exceda los 6 dBi.
 - Los sistemas que operen en la banda de 5725 a 5850 MHz que sean utilizados exclusivamente para operaciones fijas punto a punto, pueden emplear antenas de transmisión directivas con ganancia mayor a 6 dBi sin la correspondiente reducción en la potencia pico de salida del transmisor.
- Los sistemas deben ser operados de tal forma que se asegure que el público no sea expuesto a niveles de energía de radio frecuencia que exceda las normas que expida el Ministerio de Comunicaciones o el organismo estatal pertinente.
- **Condiciones operativas en las bandas de 5150 a 5250 MHz, 5250 a 5350 MHz, 5470 a 5725 MHz y 5725 a 5825 MHz, para sistemas U-NII.** Son condiciones operativas de los sistemas de acceso inalámbrico y redes inalámbricas de área local, que utilicen técnicas de modulación digital, para el correcto funcionamiento de los llamados sistemas para el desarrollo de la infraestructura de la información U-NII, en las bandas de 5150 a 5250 MHz, de 5250 a 5350 MHz, 5470 a 5725 MHz y de 5725 a 5825 MHz, las siguientes:
 - **Potencia:**
 - Para la banda de 5150 a 5250 MHz, la potencia de transmisión pico sobre la banda de frecuencia de operación no debe exceder el menor valor entre 50 mW ó $4 \text{ dBm} + 10 \log B$, donde B es el ancho de banda de emisión en MHz a

26 dB. Si son utilizadas antenas de transmisión directivas con ganancia mayor a 6 dBi, la potencia de transmisión pico deberá ser reducida en la cantidad de dB que la ganancia de la antena exceda los 6 dBi.

- Para las bandas de 5250 a 5350 MHz y de 5470 a 5725 MHz, la potencia de transmisión pico sobre la banda de frecuencia de operación no debe exceder el menor valor entre 250 mW ó $11 \text{ dBm} + 10 \log B$, donde B es el ancho de banda de emisión en MHz a 26 dB. Si son utilizadas antenas de transmisión directivas con ganancia mayor a 6 dBi, la potencia de transmisión pico deberá ser reducida en la cantidad de dB que la ganancia de la antena exceda los 6 dBi.
 - Para la banda de 5725 a 5825 MHz, la potencia de transmisión pico sobre la banda de frecuencia de operación no debe exceder el menor valor entre 1 W ó $17 \text{ dBm} + 10 \log B$, donde B es el ancho de banda de emisión en MHz a 26 dB. Si son utilizadas antenas de transmisión directivas con ganancia mayor a 6 dBi, la potencia de transmisión pico deberá ser reducida en la cantidad de dB que la ganancia de la antena exceda los 6 dBi. Sin embargo, los dispositivos U-NII en operación fija punto a punto en esta banda pueden emplear antenas directivas con ganancia de hasta 23 dBi sin la correspondiente reducción de la potencia de salida pico del transmisor. Si se sobrepasan los 23 dBi la potencia del transmisor debe ser reducida en 1 dB por cada dB de ganancia adicional a los 23 dBi.
 - El operador de un dispositivo U-NII, es responsable de asegurar que los sistemas que emplean antenas con alta ganancia directiva sean utilizados exclusivamente para operaciones fijas punto-a-punto.
- **Limites de Emisiones Indeseadas.** Las emisiones pico fuera de las bandas de frecuencia de operación deberán ser atenuadas de acuerdo con los siguientes límites:

- Para transmisores que operen en las bandas de 5150 a 5250 MHz, 5250 a 5350 MHz y de 5470 a 5725, todas las emisiones fuera de la banda no deberán exceder una PIRE⁷ de -27 dBm/MHz.
- Para transmisores que operen en la banda de 5725 a 5825 MHz, todas las emisiones dentro del rango de frecuencia comprendido desde el borde de la banda hasta 10 MHz por encima o por debajo del borde de la banda, no deberán exceder una PIRE de -17 dBm/MHz; para frecuencias 10 MHz o más, por encima o por debajo del límite de la banda, las emisiones no deberán exceder una PIRE de -27 dBm/MHz.

➤ **Disposiciones Generales:**

- Cualquier dispositivo U-NII que opere en la banda de 5150 a 5250 MHz deberá utilizar una antena de transmisión que sea parte integral del dispositivo.
- Dentro de la banda de 5150 a 5250 MHz, los dispositivos U-NII estarán restringidos a operaciones en interiores o recintos cerrados para reducir cualquier potencial de producir interferencias co-canal perjudiciales a las operaciones del servicio móvil por satélite MSS.
- Todos los dispositivos U-NII deberán ser considerados para operar en un ambiente público e incontrolado. Los dispositivos deben ser operados de tal forma que se asegure que el público no sea expuesto a niveles de energía de radio frecuencia que exceda las normas que expida el Ministerio de Comunicaciones o el organismo estatal pertinente.
- Los operadores y fabricantes de dispositivos U-NII son responsables de asegurar una estabilidad de frecuencia tal que una emisión sea mantenida dentro de la banda de operación bajo todas las condiciones de operación.

⁷ Potencia Isotrópica Efectivamente Radiada, hace referencia a la potencia que entrega el trasmisor, menos las pérdidas de la línea de transmisión, más la ganancia de la antena.

- Los dispositivos U-NII que operen en la banda de 5250 a 5350 MHz y de 5470 a 5725 MHz deberán emplear un mecanismo de TPC (Control de Transmisión de Potencia). Los dispositivos U-NII deberán tener capacidad para operar al menos 6 dB por debajo del valor medio PIRE de 30 dBm. No se requiere mecanismo de TPC para sistemas con una PIRE menor a 500 mW (27 dBm).
 - Los dispositivos U-NII que operen en la banda de 5250 a 5350 MHz y de 5470 a 5725 MHz deberán emplear un mecanismo de detección de radar de DFS (Selección Dinámica de Frecuencia), para detectar la presencia de sistemas de radar y evitar la operación co-canal con estos sistemas. El umbral de detección del DFS para dispositivos con una PIRE entre 200 mW a 1 W es de -64 dBm. El umbral de detección es la potencia promedio recibida en 1 microsegundo a una antena de referencia de 0 dBi.
- **Antenas Omnidireccionales.** En la resolución 689 de 2004 se restringía la utilización de antenas omnidireccionales a sistemas inalámbricos cuya potencia radiada fuera menor o igual a 100 mW (20 dBm), estableciendo que los sistemas que excedan los 100 mW de potencia deberían emplear antenas direccionales con un ancho de lóbulo no mayor a 90 grados. Sin embargo, en junio de 2007 el ministerio emitió la resolución 1689 derogando esta restricción alegando que *en la actualidad existen internacionalmente múltiples y diversos aparatos inalámbricos de banda ancha y baja potencia que utilizan antenas omnidireccionales con potencias iguales o algo superiores a los 100mW, que cumplen con las demás disposiciones de la resolución 689 de 2004.*
 - **Interferencias.** La utilización de sistemas de acceso inalámbrico y redes inalámbricas de área local, que utilicen tecnologías de espectro ensanchado y modulación digital, de banda ancha y baja potencia, está condicionada al cumplimiento de las siguientes condiciones:

- No deben causar interferencia perjudicial a las estaciones de un servicio primario⁸ a las que se les hayan asignado frecuencias con anterioridad o se les puedan asignar en el futuro.
- No pueden reclamar protección contra interferencias perjudiciales causadas por estaciones de un servicio primario a las que se les hayan asignado frecuencias con anterioridad o se les puedan asignar en el futuro.

Si un dispositivo ocasiona interferencia perjudicial a una radiocomunicación autorizada a título primario, aunque el aparato cumpla con las normas técnicas establecidas en los reglamentos de radiocomunicación o los requisitos de autorización de equipo, se deberá suspender la operación del dispositivo. La utilización no podrá reanudarse hasta que se haya subsanado el conflicto interferente.

3.2.2. Bandas licenciadas

Debido a que WiFi solo hace uso de bandas de frecuencia libres, esta sección solo hará referencia al sistema WiMAX licenciado por el Ministerio de Comunicaciones para su uso comercial en Colombia.

- **Licencias para el uso de la banda de frecuencias de 3,5 GHz para acceso de banda ancha inalámbrico.** Se concedieron 3 licencias de orden nacional y dos licencias de orden departamental. Las tres primeras licencias fueron una contraprestación del ministerio a los tres operadores de Larga Distancia Nacional, TELECOM, ETB y ORBITEL, por contar con al menos un millón de líneas fijas en el país, presentar ingresos operacionales superiores a \$ 500.000 millones de pesos y tener la habilidad de prestar servicios de valor agregado y larga distancia. Las otras dos se adjudicaron mediante un proceso de licitación entre los interesados. Los tres permisos nacionales son cada uno de 42 MHz en los canales A, B y C con duplexación FDD en la banda de 3.5 GHz, los permisos departamentales son de 14 MHz en los canales D y E y se dispuso un canal de reserva para aplicaciones futuras (Figura 3-1) [6].

⁸ Servicio Primario: Hace referencia a las estaciones de servicios gubernamentales y de sistemas básicos, por ejemplo, Sistemas de Radar, Sistemas de Servicios Móviles por Satélite.

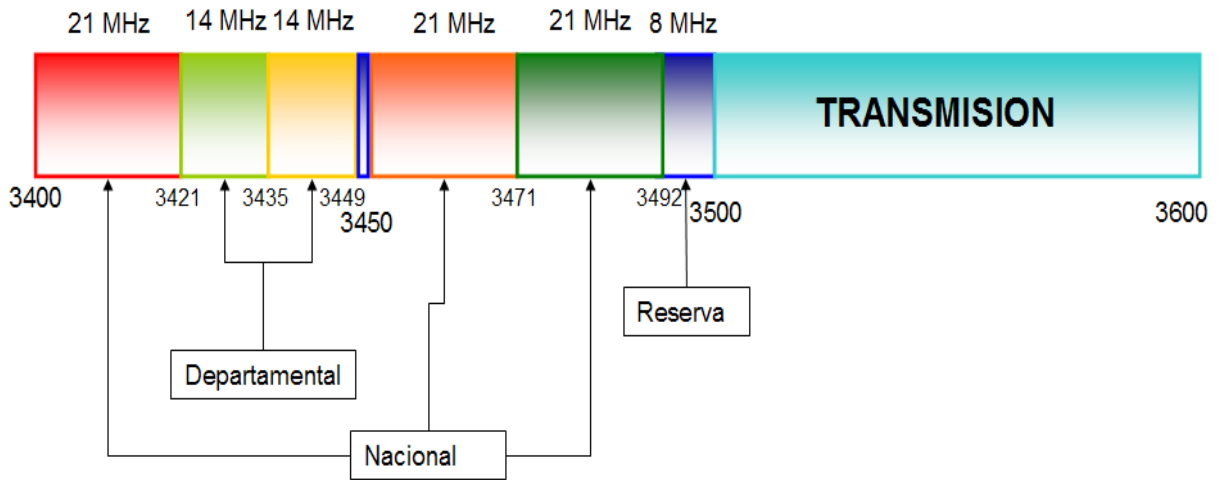


Figura 3-1. Canalización de la banda de 3.5 GHz en Colombia.

Mediante la resolución 2064 de 2005 [6], el Ministerio de Comunicaciones realizó la asignación y planificación de las bandas de frecuencias del espectro radioeléctrico destinadas a la prestación de servicios de telecomunicaciones mediante sistemas que utilicen sistemas de distribución Punto a Punto y Punto Multipunto para Acceso de Banda Ancha Inalámbrica, dicha atribución se efectuó de la siguiente manera:

BANDA	RANGO	BANDA	RANGO
A	3400 MHz a 3421 MHz	A´	3500 MHz a 3521 MHz
D	3421 MHz a 3435 MHz	D´	3521 MHz a 3535 MHz
E	3435 MHz a 3449 MHz	E´	3535 MHz a 3549 MHz
B	3450 MHz a 3471 MHz	B´	3550 MHz a 3571 MHz
C	3471 MHz a 3492 MHz	C´	3571 MHz a 3592 MHz
F	3492 MHz a 3500 MHz	F´	3592 MHz a 3600 MHz

Como se puede apreciar, se asignaron 5 bandas cada una de las cuales poseen una principal, destinada al UPLINK y una secundaria para DOWNLINK. Las bandas A, B y C presentan cada una de ellas un ancho de banda de 21 MHz (en total sería de 42 MHz sumando el canal de subida y de bajada), que correspondería a un sistema con multiplexación FDD con un ancho de banda del canal de RF de 21 MHz. Por su parte las bandas designadas para permisos departamentales D y E tienen un ancho de

banda de 14 MHz (en total sería de 28 MHz sumando el canal de subida y de bajada) (Figura 3-2) [6].

Esta disposición de canales es inadecuada para la distribución de un tráfico asimétrico como el tráfico de Internet, y conserva la filosofía de la distribución de tráfico telefónico tradicional. Este hecho afecta la planificación de una red IP creando ineficiencias en el aprovechamiento del ancho de banda.

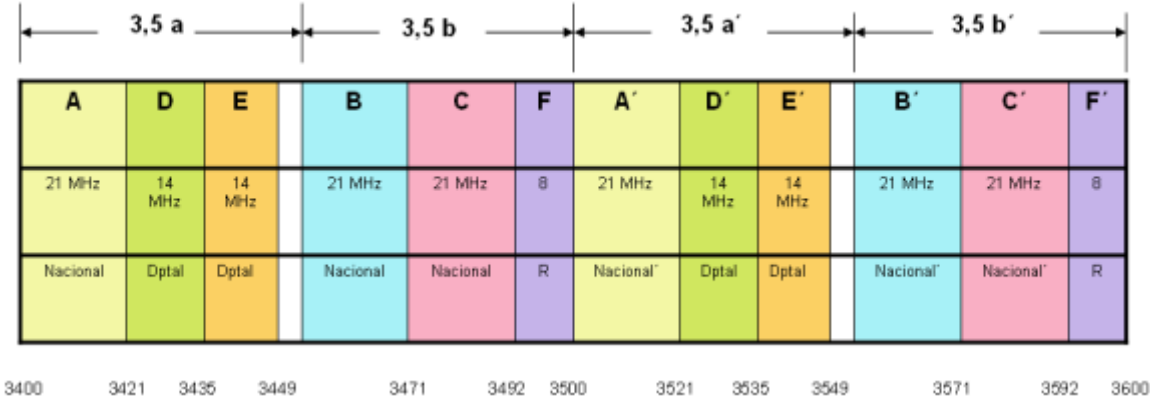


Figura 3-2. Canalización de la banda 3.5 GHz según resolución 2064 de 2005.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es el costo de la frecuencia que se usaría; a manera de ejercicio, utilizando el Decreto 1972 de 2003 [23] la liquidación del pago anual para el uso del espectro radioeléctrico es de NUEVE MIL QUINIENTOS SESENTA Y UN MILLONES de pesos para su uso en todo el departamento del Valle, mientras que el pago de esta misma frecuencia utilizando un sistema TDD con un ancho de banda de canal de RF de 1,75 MHz es de CUATROCIENTOS DIECIOCHO MILLONES DE PESOS.

Del valor total del costo de la licencia para el departamento del Valle, el factor correspondiente a la porción de mercado básico, para la liquidación del valor del espectro radioeléctrico, es de 0,215 del cual la porción de 0,150 corresponde al área urbana de Cali y 0,0075 a su área rural, para un total de 0,1575.

El resto del departamento, excluyendo a Cali, tiene un factor por porción del mercado correspondiente a Z=0,0575 que corresponde al 26,74% del mercado total. Lo

anterior quiere decir que el 26,74% del mercado del departamento se encuentra fuera de la ciudad de Cali, que tiene más del 73% del mercado de telecomunicaciones. Esto basado en los factores de liquidación del espectro radioeléctrico por parte del ministerio de Comunicaciones, lo cual muestra que las regalías a pagar por el uso de la banda licenciada son realmente altas, por lo cual será de vital importancia para un proveedor de servicio ofrecer el servicio masivamente en las áreas urbanas.

- **Proceso de asignación de licencias departamentales WiMAX.** La asignación de los permisos para la prestación de servicios banda ancha, mediante sistemas de distribución inalámbrico Punto a Punto y Punto a Multipunto en el área de Servicio Departamental, fue definida mediante la Resolución 1449 de Junio de 2006 [24]. En ella se especificaron las bandas de frecuencia disponibles para este proceso que son las denominadas DD' y EE', así como una serie de disposiciones generales que se describen a continuación:
 - **Número de permisos.** El ministerio de comunicaciones dentro de sus políticas de regulación decidió otorgar dos permisos, uno por cada banda atribuida para el uso del espectro radioeléctrico en cada una de las Áreas de Servicio Departamental, de tal forma que una empresa no podrá tener asignado más de un permiso en un mismo departamento.
 - **Contenido y Alcance del Permiso.** La licencia otorga el permiso para el uso del espectro radioeléctrico en la banda de frecuencia asignada para la prestación de servicios de telecomunicaciones. También concede la autorización para la instalación de la red de telecomunicaciones con utilización de sistemas de Distribución Punto a Punto y Punto a Multipunto para Acceso Inalámbrico, dentro del área geográfica de servicio autorizada. Se debe tener en cuenta que el permiso para el uso del espectro radioeléctrico no constituye por sí mismo, título habilitante para la prestación de servicios de telecomunicaciones, efecto para el cual se deberá contar con la concesión autorizada o licencia respectiva.
 - **Duración y Renovación de los Permisos.** Los permisos para el uso de frecuencias radioeléctricas se otorgarán por un término de diez (10) años, los

cuales podrán renovarse hasta por un plazo igual al inicial. En todo caso el tiempo total de duración de los permisos no excederá los veinte (20) años.

- **Proyecciones de Inversión.** El ministerio definió como una parte fundamental del proceso de evaluación, que el proponente debería presentar las proyecciones de inversión para los primeros cinco años de operación. Dichas proyecciones corresponden al valor que invertirá el operador para la implementación de la nueva infraestructura que utilizará para prestar servicios en la banda de 3.5 GHz en el respectivo departamento.
- **Plan de Cobertura.** Igual que el caso anterior, el ministerio exigió al proponente presentar las proyecciones de cobertura para los primeros cinco años de operación, expresada en número de municipios cubiertos del respectivo departamento con la señal radioeléctrica.
- **Capacidad de Usuarios Equivalente.** Para efecto de las calificación de las propuestas, el ministerio definió como capacidad de usuarios equivalente, el número de usuarios de servicios de telecomunicaciones, que utilicen sistemas de distribución Punto a Punto y Punto a Multipunto para acceso de banda ancha inalámbrica en la banda de 3.5 GHz, que podrán ser atendidos con la capacidad que instalará el operador en el respectivo departamento, utilizando para el cálculo de la capacidad de usuarios equivalente, un usuario estándar con las siguientes características: velocidad de transmisión de 512 Kbps, velocidad de recepción de 512 Kbps y re-uso 1:1, para cada uno de los cinco años.
- **Ganadores Licencias Departamentales.** El 26 de diciembre de 2006 el Ministerio de Comunicaciones dio a conocer la lista de ganadores de dicha licitación. En la Tabla 3-6 [25] se muestra los dos ganadores por departamento.

Tabla 3-6. Cuadro de Ganadores licencias WiMAX departamentales.

Departamento	Operadores con licencia WiMAX regional	
Amazonas	Comcel	-
Antioquia	Avantel	Cablecentro
Arauca	Comcel	-
Atlántico	Servisatelite	Cable Unión de Occidente
Bolívar	Cablecentro	Cable Unión de Occidente
Boyacá	Cablecentro	Cable Unión de Occidente
Caldas	Comcel	Cable Unión de Occidente
Caquetá	Comcel	-
Casanare	Avantel	Teleorinoquia
Cauca	Emcali	Cable Unión de Occidente
Cesar	Comsat	Cable Unión de Occidente
Choco	Comcel	-
Córdoba	Comsat	Cable Unión de Occidente
Cundinamarca	Avantel	Cable Unión de Occidente
Guania	Comcel	-
Guajira	Comsat	Cable Unión de Occidente
Guaviare	Comcel	-
Huila	Avantel	Cable Unión de Occidente
Magdalena	Avantel	Cable Unión de Occidente
Meta	Avantel	Cable Unión de Occidente
Nariño	Comcel	Cable Unión de Occidente
Norte de Santander	S3 Wireless	Cable Unión de Occidente
Putumayo	Comcel	-
Quindío	Comsat	Cable Unión de Occidente
Risaralda	Cablecentro	Cable Unión de Occidente
San Andrés	Comcel	Comsat
Santander	Comsat	Cable Unión de Occidente
Sucre	Comcel	Cable Unión de Occidente
Tolima	Avantel	Cablecentro
Valle del Cauca	Emcali	Cable Unión de Occidente
Vaupés	Comcel	-
Vichada	Comcel	-

3.3. RESUMEN Y CONSIDERACIONES GENERALES

- En principio puede parecer que WiFi y WiMAX están compitiendo por el mismo segmento de mercado, pero sin duda alguna, WiFi fue y seguirá siendo utilizado en entornos LAN en el futuro próximo, mientras que WiMAX fue diseñado con el propósito de dar acceso MAN a sectores residenciales y empresariales. La regulación del espectro radio eléctrico juega un papel fundamental en dichos segmentos de utilización; se puede ver claramente que el objetivo de dar a WiFi bandas sin licencia fue lograr su masificación y establecer la tecnología, en un

mercado que era dominado por las soluciones cableadas, como una alternativa viable tanto para aplicaciones residenciales como en redes de área local. Por su parte, el funcionamiento de WiMAX en bandas licenciadas de por sí delimita su utilización a operadores o empresas que cuenten con los medios suficientes como para ser acreedoras de tales permisos, y por ende casi obliga a utilizar esta tecnología en entornos donde sirva como medio de acceso masivo, pues, será la única forma de recuperar en plazos aceptables la inversión realizada en el pago de las licencias y de la infraestructura, lo cual solo puede llevarse a cabo en un entorno metropolitano.

- En cuanto al aspecto regulatorio, las bandas no licenciadas en Colombia se regulan mediante la resolución 684 de 2004, la cual se basa casi íntegramente en los lineamientos dictados por la Comisión Federal de Comunicaciones Estadounidense - FCC. En cierta medida esto es bueno, pues Colombia no cuenta con los laboratorios ni con el presupuesto para realizar pruebas de cobertura y de potencia, que permitan imponer límites concretos en cuanto a los niveles de radiación de los equipos de radiocomunicaciones. A esto se suma, que la gran mayoría de los equipos de telecomunicaciones son fabricados en Estados Unidos y antes de salir al mercado son previamente probados contra todas las leyes de la FCC para comunicaciones mediante propagación de energía RF, por lo tanto se garantizan unos niveles de seguridad para el público y de desempeño para los proveedores.
- El decreto que atribuyó las bandas de frecuencia para el uso de acceso inalámbrico de banda ancha designó cinco bandas simétricas con un ancho de banda de 42 MHz para la licencia nacional y 28 MHz para la licencia departamental, para el canal de RF asignado.
- La simetría de los canales de RF asignados hace necesario el uso de tecnologías de duplexación FDD.
- Tres de las cinco bandas serán de orden nacional y fueron asignadas a ETB, ORBITEL y TELECOM.

- El pago para el uso de las frecuencias se liquida según el decreto 1972 de 2003, el cual asigna porciones de mercado para cada Departamento y cada ciudad.
- El pago de una frecuencia licenciada, dado el alto costo que esto implica, requiere asegurar de manera intensiva el área urbana de la capital, dado que los costos de las licencias para el uso del ERE (espectro radioeléctrico) golpearan de manera significativa la inversión y por tanto la manera para retornarla.
- Después de revisada la resolución 2064 de 2005 sobre la asignación de las bandas de frecuencias WiMAX, es fácil apreciar que existe una discrepancia entre el ancho de banda designado para los permisos nacionales (42 MHz) con respecto a los departamentales (28 MHz). Teniendo en cuenta los altos costos de las licencias, lo que cualquier operador esperaría es poder ingresar masivamente a las ciudades capitales de los departamentos, pero la demanda en metrópolis como Bogotá, Medellín o Cali excedería fácilmente el ancho de banda disponible. Se debe tener en cuenta que en áreas urbanas densamente pobladas es recomendable contar con al menos 50 MHz, pues esto mejoraría notablemente la relación costo/beneficio de la red al permitir un menor número de celdas y estaciones base, infraestructura que ocupa gran parte de los costos fijos de una red metropolitana.
- Otro aspecto relevante de la resolución, es que asume una igualdad entre todos los departamentos, designando el mismo número de licencias para todos a pesar de no registrar el mismo nivel económico. Esto evita que los departamentos con grandes ciudades capitales y con mayores índices de desarrollo cuenten con un mayor número de operadores, que puedan satisfacer la concentración de mercado en estas regiones.
- El pago del espectro es muy alto y va en contra de las políticas del gobierno de masificación de la banda ancha, convirtiéndose en una barrera de entrada pues este costo inevitablemente será trasladado al usuario final.

Hasta el momento, con los tres últimos capítulos se ha desarrollado la base conceptual tanto desde el punto de vista técnico como legal para afrontar la parte más importante del

proyecto que hace referencia a la *generación de un conjunto de Criterios Técnicos para el Diseño e Implementación de redes WiFi/WiMAX en entornos urbanos colombianos*. En el capítulo 1 se hizo una revisión de los conceptos más importantes de radio y RF a ser tenidos en cuenta para el diseño de este tipo de redes con el objetivo de consolidar la información que el lector pueda tener al respecto y como base técnica para la posterior elaboración de los criterios de diseño; en el capítulo 2 se realizó una caracterización desde el punto de vista geográfico y demográfico de las ciudades colombianas escogidas como referencia para la aplicación de los criterios; y en el capítulo 3 se llevo a cabo el desarrollo del marco de referencia regulatorio de estas tecnologías para dar cuenta de cómo estos aspectos limitan los segmentos de mercado y utilización de las mismas, dando cumplimiento al objetivo específico planteado en el proyecto que hace alusión a *la generación de un marco de referencia que permita describir los segmentos de mercado y aspectos regulatorios relevantes para el despliegue de redes WiFi y WiMAX en áreas metropolitanas colombianas*. A continuación se presenta el capítulo que recoge los aspectos más importantes del proyecto y en donde se cumple el objetivo general del mismo.

4. CRITERIOS TÉCNICOS PARA EL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE REDES WiFi Y WiMAX COMO SOLUCIONES DE ACCESO METROPOLITANO EN COLOMBIA

En este capítulo se entrega un conjunto de criterios técnicos para ser tenidos en cuenta cuando se desee optar por una solución inalámbrica para ofrecer servicios de banda ancha en áreas metropolitanas utilizando las tecnologías 802.16 y 802.11. Los criterios generados se encuentran dentro del marco de trabajo consignado y explicado en el Anexo C, el cual abarca los aspectos fundamentales en cuanto al diseño y planeación de una red de estas características tanto desde el punto de vista técnico como económico. Sin embargo, dado que el objetivo del proyecto está enfocado hacia la parte técnica, solo la parte del modelo asociado a esta área será cubierta y desglosada en profundidad.

4.1. MODELO DE TRABAJO

El modelo de trabajo aquí propuesto, ha sido fruto de un extenso proceso de investigación aplicado al diseño y planeación de redes inalámbricas, en el cual fueron tenidos en cuenta los principios básicos de diseño y los modelos más utilizados a nivel mundial, con el objetivo de generar un marco de referencia que pueda ser aplicado tanto por operadores de red como por cualquiera que desee implementar un WISP. Por lo tanto, busca simplemente especificar las pautas para las etapas de planeación y diseño, que constituyen un proceso sólido para la posterior implementación y despliegue de este tipo de sistemas, con el ánimo de contribuir en el proceso de masificación de la banda ancha en Colombia mediante redes inalámbricas.

La Figura 4-1 [26] indica la constelación de los parámetros técnicos más relevantes a ser tenidos en cuenta, para una correcta ejecución y puesta en marcha de una red inalámbrica metropolitana basada en las tecnologías WiFi y WiMAX.

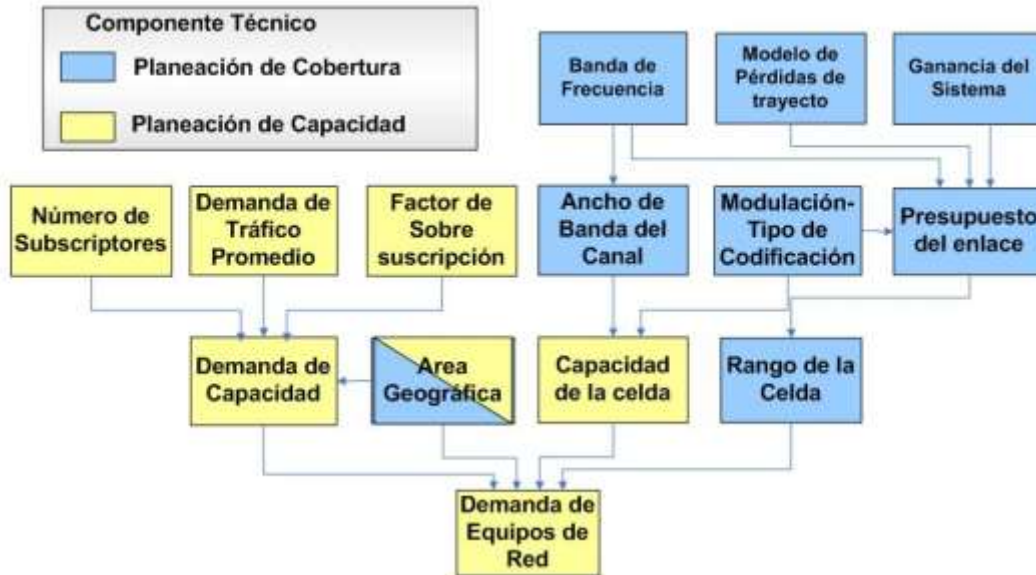


Figura 4-1. Parámetros técnicos más relevantes para el diseño de una red inalámbrica metropolitana.

Como se puede apreciar, el diseño de una red de estas características conlleva dar respuesta a un gran número de variables, las cuales a su vez, interactúan unas con otras para formar la solución total.

4.1.1. Desarrollo del modelo.

Sin importar la escala del sistema que es desarrollado, hay un número de actividades individuales que tienen interacción unas con otras. Por ejemplo, la selección de los emplazamientos para instalar las antenas estará influenciada por el costo, la cobertura, y necesidades de capacidad del sistema, y a su vez el costo, la cobertura y la capacidad estarán influenciados por la selección de la frecuencia de operación y el hardware de radio. Con este breve ejemplo se puede hacer una idea de la complejidad implicada en el diseño de un sistema de gran escala, cada aspecto individual alrededor del diseño del sistema tiene asociado su propio diagrama de flujos el cuál debe identificar las actividades que podrán o no, ser puntos clave de decisión.

Por lo anterior, y para dar respuesta de manera ordenada y coherente a la constelación de parámetros técnicos propuestos, se propone a continuación un proceso estructurado

que buscará de manera gradual acercarse a la solución final, y cubrir todos los pasos para lograr un diseño de red acertado, dicho proceso se ilustra en la Figura 4-2. Como tal, este modelo es totalmente nuevo, sin embargo, las fases presentes en el, así como su orden específico, se basan en la experiencia adquirida por los autores en la realización de diseños e instalaciones de redes inalámbricas para la prestación de servicios banda ancha en diferentes lugares de Colombia y para diferentes empresas del sector⁹, y en la extensa revisión que se ha llevado a cabo sobre autores y bibliografía referentes al tema.

⁹ Diseño red inalámbrica para la prestación del servicio de internet banda ancha: ERT (Empresa Regional de Telecomunicaciones del Valle), en las ciudades de Tuluá y Palmira (Valle del Cauca); INGENIO GLOBAL LTDA, en las ciudades de Mocoa y Valle de Sibundoi (Putumayo); DOBLECLICK E.U, en las ciudades de La Unión y San Pablo (Nariño); CABLE UNION DE OCCIDENTE S.A, en la ciudad de Tumaco (Nariño).

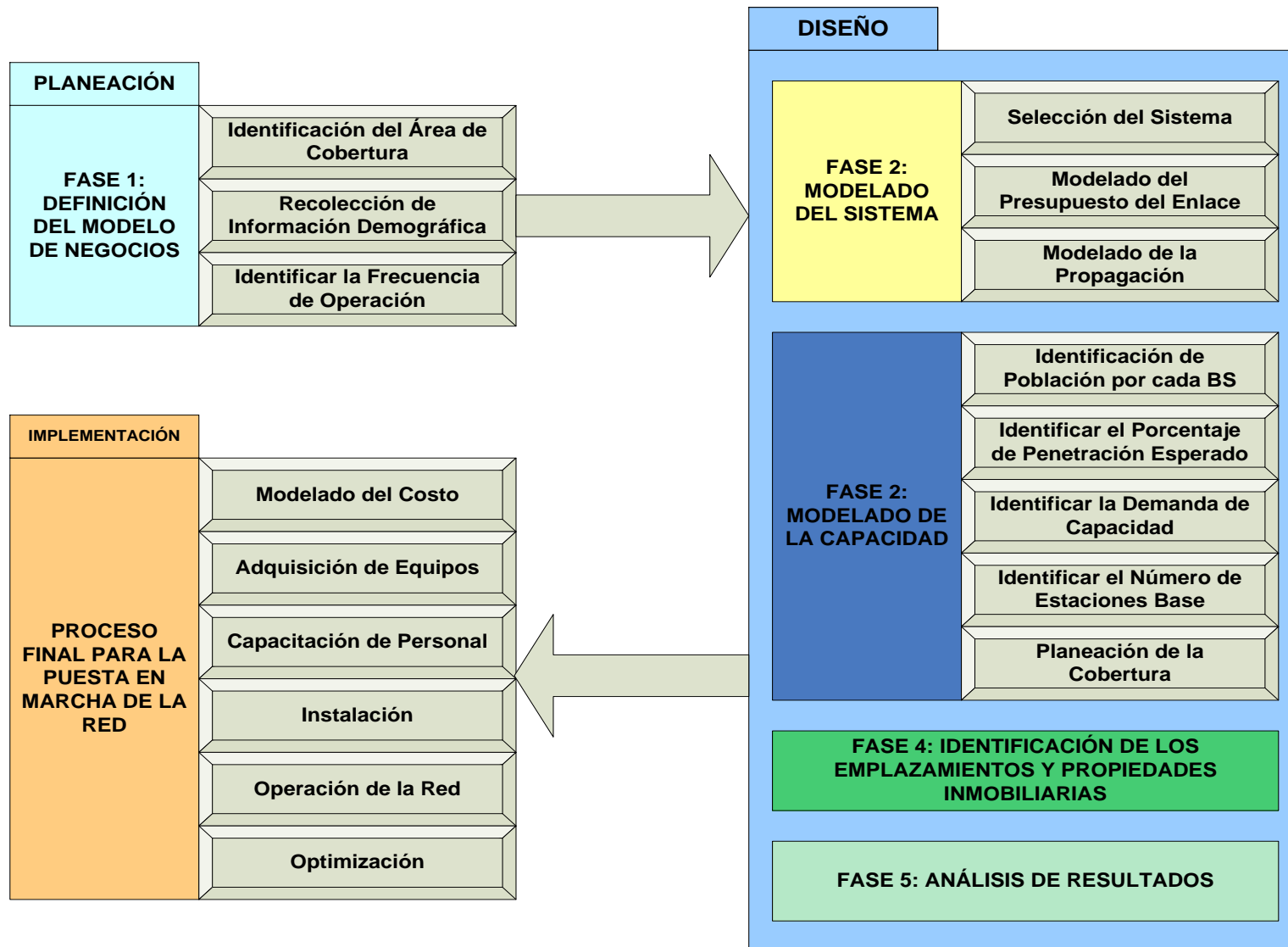


Figura 4-2. Diagrama del proceso propuesto para la planeación, diseño e implementación de la red.

4.2. FASE 1: DEFINICIÓN DEL MODELO DE NEGOCIO

Antes de iniciar el diseño de la red, es necesario tener una idea global de lo que se pretende realizar y alcanzar con dicha implementación. Es claro que el objetivo de una red inalámbrica en áreas urbanas, es ofrecer servicios a sus posibles clientes, pero también es cierto que como tal, ella es un negocio, y es necesario estar al tanto de cuales pueden ser los posibles escenarios de implementación, los posibles servicios que se montarían sobre la red, y los alcances y limitaciones de las tecnologías a utilizar, en este caso WiFi-WiMAX, antes de llevar a cabo cualquier inversión.

4.2.1. Identificación del área de cobertura.

Este ítem es de gran importancia en el proceso de planeación de una red inalámbrica, pues brinda una primera aproximación a la cobertura total que le será exigida al sistema. Tradicionalmente, las regiones de cualquier país, están divididas en urbanas, sub-urbanas y rurales, en múltiples estudios a nivel mundial se ha definido un cuarto tipo de región llamado ex urbano, el cual hace referencia a zonas residenciales alejadas de los centros de las ciudades con baja densidad de viviendas. Definir estas áreas es importante, pues el principal competidor en prestación de servicios de banda ancha en ciudades y zonas urbanas, DSL, depende en gran medida de la distancia del usuario final a la central telefónica.

Las zonas rurales, hacen referencia a pequeñas poblaciones alejadas de las grandes metrópolis. En Colombia existe una gran cantidad de este tipo de ciudades y en algunas ocasiones la densidad poblacional de estas áreas amerita la prestación de algún tipo de servicio de banda ancha, pero debido a su remota ubicación son desatendidas por los grandes operadores; como ejemplo, en el Cauca se puede citar poblaciones como Bolívar, La Vega y Balboa; en Nariño, La Unión, San Pablo entre otras. Sin embargo, para los propósitos de este proyecto, las zonas de interés serán las urbanas y sub-urbanas. A continuación, la Tabla 4-1[27] consigna las principales características de estos escenarios.

Tabla 4-1. Caracterización de las diferentes áreas geográficas.

Escenario	Características
Urbano	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Alta densidad de usuarios potenciales para sistemas WiMAX y WiFi ➤ Muchos edificios residenciales y empresariales ➤ El tamaño de las celdas debe ser reducido para satisfacer los altos requerimientos de capacidad ➤ Fuerte competencia: Conducida por el tamaño del mercado y la disponibilidad de tecnologías de acceso alternas, por lo tanto se esperan abundantes fuentes de interferencia. <p>Debido al ambiente competitivo un nuevo operador puede esperar:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Baja penetración en el mercado ➤ Altos gastos en estrategias de mercadeo y ventas <p>Otras consideraciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Utilizar bandas de frecuencias licenciadas sería lo ideal para minimizar posibles interferencias <p>Ejemplo: Bogotá, Cali, Palmira, Medellín.</p>
Sub-Urbano	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Densidad moderada de usuarios potenciales para sistemas WiFi y WiMAX ➤ Alto porcentaje de viviendas solo para uso residencial ➤ Es posible que DSL y Cable Modem no estén disponibles en toda el área ➤ El radio de las celdas puede incrementarse, pero la capacidad puede seguir limitada con asignación de espectro insuficiente <p>Un nuevo operador puede esperar:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Una penetración de mercado más alta que una zona urbana <p>Ejemplo: Tuluá, Popayán.</p>
Ex Urbano	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Vecindarios residenciales con moderada o poca densidad de viviendas ➤ Pocos establecimientos de negocios ➤ Medio de comunicación predilecto, telefonía celular ➤ Cable y DSL parcial o no disponibles ➤ Celdas de gran radio, limitadas básicamente por el terreno ➤ Alto porcentaje de personas que viajan a zonas sub-urbanas o urbanas ➤ Se espera una alta penetración para sistemas fijos que ofrezcan servicios de Internet banda ancha <p>Ejemplo: Timbio (Cauca), Soacha, Chía, (Bogotá)</p>
Rural	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Zonas distantes de las grandes ciudades ➤ Usuarios residenciales y pequeños negocios ➤ Servicio inexistente de DSL/Cable Modem ➤ Alta demanda por acceso a Internet por instituciones educativas y gubernamentales ➤ Poca competencia <p>Un nuevo operador puede esperar:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Una alta tasa de penetración para redes inalámbricas y rápida curva de adopción <p>Otras consideraciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ La alta capacidad e instalación del <i>backhaul</i> puede ser una dificultad <p>Ejemplo: Corregimientos alejados de los cascos urbanos, por ejemplo Cajete, La rejoya (Popayán - Cauca).</p>

Para lograr un mejor resultado es necesario hacer uso de mapas cartográficos analógicos o digitales, los cuales brindaran un panorama global del área esperada de acción para la red. Cuando se termine de revisar este ítem se debe conocer con la mayor exactitud posible el área donde se espera ofrecer los servicios.

4.2.2. Recolección de información demográfica.

Este ítem también es de suma importancia, pues, será un factor decisivo en el cálculo de la capacidad del sistema. La información demográfica hace referencia a la caracterización de la distribución de la población desde varios puntos de vista, entre los más importantes se encuentran; la edad, el nivel de ingresos, estratificación, nivel educativo, así como la identificación de las zonas residenciales, industriales o corporativas dentro del área de cobertura definida en el paso anterior. Esta información también es de gran utilidad para la realización del mercadeo, publicidad y en especial para la definición de los perfiles de usuario y planes de servicios que serán ofrecidos. Para el desarrollo de este ítem se recomienda contactar a las oficinas de estadísticas nacionales o regionales, para el caso de Colombia sería el DANE (Departamento Nacional de Estadística), el cual en su página Web tiene disponible al público gran parte de esta información organizada por departamentos y ciudades. También se puede acudir a las oficinas de planeación de cada ciudad para obtener los POT o Planes de Ordenamiento Territorial, que por lo general también están disponibles al público en general.

En realidad vale la pena tomarse un poco de tiempo para realizar este proceso, el cual no es costoso y solo requiere un poco dedicación y astucia, ya que entre más precisos sean estos datos mejor será el modelado de la capacidad del sistema, el cual definirá el número de estaciones base y por lo tanto gran parte del costo final de la red.

4.2.3. Servicios.

Después de haber recolectado y tabulado la información acerca del nivel de ingresos y la estratificación de la población, y definido las zonas empresariales y residenciales, es necesario pensar en que tipo de servicios se pueden ofrecer a cada uno de estos grupos. Inicialmente se recomienda que el servicio base para enganchar usuarios sea el de

Internet banda ancha, pues desde el punto de vista de implementación el WISP solo requiere un punto de conexión a Internet (E1/T1¹⁰), una radio base para transmitir la señal y un CPE en las instalaciones del cliente para recibir tal señal.

Una vez el usuario tenga el servicio de Internet se pueden entrar a promocionar la VoIP (*Voice Over Internet Protocol*), que hace referencia a la utilización de la red IP de Internet para realizar llamadas telefónicas sin la utilización de la RTPC (Red Telefónica Pública Conmutada). Este servicio se está convirtiendo a nivel mundial en uno de los preferidos por parte de los proveedores pues ofrece una diferenciación con respecto a otras empresas y es una gran fuente de ganancias pues gracias a las tarifas reducidas que se manejan es fácil realizar su mercadeo y posterior venta a los usuarios. Sin embargo, su implementación no es tan sencilla como una red que ofrezca solo servicios de datos, dado que ya existe todo un mercado de telefonía RTPC tanto para llamadas locales como de larga distancia, con operadores que poseen una licencia ante el Ministerio de Comunicaciones como Telecom, Orbitel y ETB, es necesario tener una licencia del mismo tipo para prestar este servicio, pues, si no se trataría de una competencia desleal con dichas empresas.

La manera más fácil para un nuevo WISP de lograr tal permiso, es realizar una alianza con alguna empresa prestadora de VAS (*Value Added Services* – Servicios de Valor Agregado) que se encargue tanto de la provisión de minutos, como de los convenios necesarios con los demás operadores para poder enrutar las llamadas desde la red IP interna hasta el destino, que bien puede ser otro dispositivo IP o un teléfono convencional, así como de asignar la numeración. El tema de la numeración es especialmente importante cuando, por ejemplo, un teléfono celular o un teléfono fijo convencional trate de llamar a un usuario con un línea VoIP dentro de la red IP del WISP, ya que los dispositivos ajenos al protocolo de Internet no pueden comunicarse con un dispositivo que se identifique con una dirección IP en lugar de un número convencional.

Además de esto, la VoIP requiere de dispositivos adicionales dentro de la infraestructura de red para que las llamadas se puedan establecer de manera apropiada (Figura 4-3). De manera concisa, estos dispositivos son:

¹⁰ E1, hace referencia a la tasa de transmisión Europea para canales digitales con una velocidad de 2.048 Mbps; T1, hace referencia a la tasa de transmisión Estadounidense para canales digitales con una velocidad de 1.544 Mbps.

- **ATA (*Analog Telephone Adaptor*).** El ATA es el dispositivo que va en las instalaciones del usuario, y su función principal es convertir las señales de voz análogas provenientes de un teléfono convencional en señales digitales para ser transmitidas sobre la red IP. Para ello utiliza *codecs* especiales que permiten comprimir la voz y minimizar el uso de ancho de banda, los más utilizados son el G.711 y el G.729.

- **Softswitch.** El *softswitch* es el encargado de realizar las funciones de señalización requeridas para transmitir las llamadas a la RTPC, comúnmente se utiliza la señalización SS7 (*Signaling System 7*). Otra de sus funciones principales es la de mapear el número convencional marcado por el usuario en una dirección IP, para que los paquetes de voz puedan viajar por la red de Internet y alcanzar su destino, bien sea otro ATA, un teléfono fijo o un celular.

- **Gateway.** La *gateway* es el elemento encargado de enlazar la red VoIP con la RTPC. Se puede considerar como una caja que por un lado tiene un interfaz LAN y por el otro dispone de una o varias de las siguientes interfaces:
 - FXO. Para conexión a extensiones de centralitas ó a la red telefónica básica.
 - FXS. Para conexión a enlaces de centralitas o a teléfonos analógicos.
 - BRI. Acceso básico RDSI (2B+D)
 - PRI. Acceso primario RDSI (30B+D)

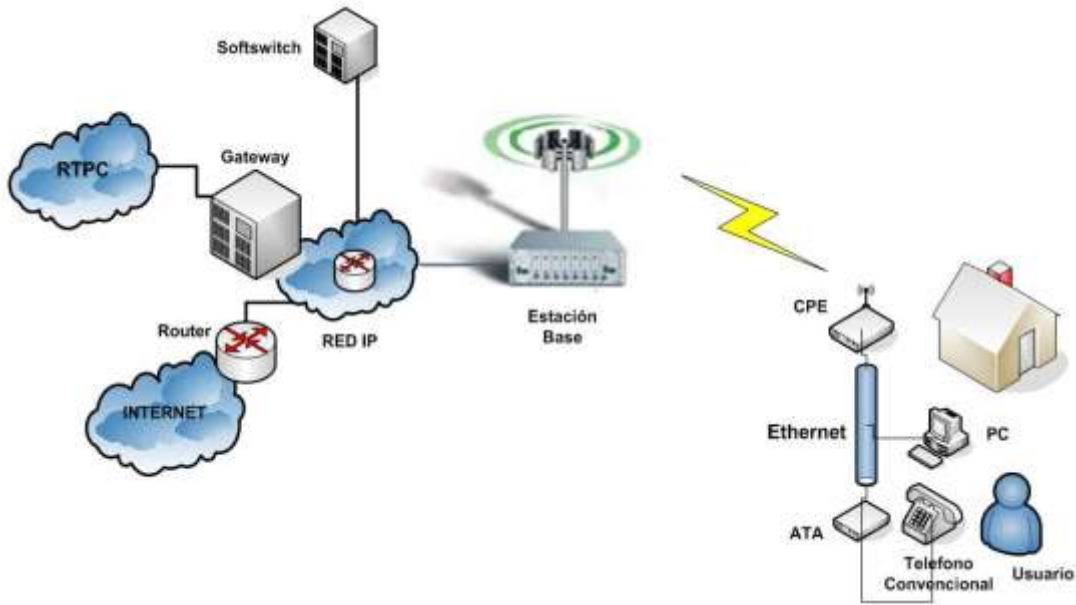


Figura 4-3. Arquitectura de red VoIP + Red de Acceso Inalámbrica.

Como se puede apreciar la puesta en marcha de una red para la prestación de servicios VoIP no es tan sencilla como una red de solo datos, son muchos los aspectos que deben tenerse en cuenta tanto desde el punto de vista legal como tecnológico, por lo cual se recomienda asesorarse de una empresa de VAS con experiencia para minimizar los inconvenientes y maximizar la eficiencia. Para los intereses de este proyecto, la telefonía VoIP será tratada desde el punto de vista de capacidad y sus incidencias en la red de acceso inalámbrica.

4.2.4. Selección de la frecuencia de operación.

Un aspecto clave en el diseño de una red inalámbrica metropolitana es la escogencia del tipo de banda a utilizar, es decir, si será licenciada o no licenciada. En el capítulo 3 ya se mostró en detalle las bondades y defectos de cada una de ellas, la Tabla 4-2 [2][3][5] presenta un resumen de las características más relevantes.

Tabla 4-2. Caracterización de las bandas de frecuencia disponibles para WISP's.

Banda	2.4 GHz	5.8 GHz	2.5 GHz	3.5 GHz
Licencia	No	No	Si a nivel mundial, en Colombia no se ha hecho ningún proceso de licitación para esta banda.	Si, el proceso de adjudicación ya se realizo en Colombia.
Ancho de banda	83.5 MHz	100 MHz	22.5 MHz	42 MHz licencia Nacional y 28 MHz licencia Departamental.
Potencia Máxima	30 dBm, reducción de potencia dependiendo del tipo de antenas (omnidireccionales o directivas)	30 dBm sin reducción de potencia en antenas directivas con ganancia>23dBi	30 dBm	35 dBm
Estaciones base requeridas	Debido a la baja frecuencia el número de estaciones puede reducirse, pero esto dependerá de la capacidad que el sistema tenga que soportar.	Debido a la alta potencia manejada el número de estaciones puede reducirse, pero esto dependerá de la capacidad que el sistema tenga que soportar.	Por lo general será necesario un mayor número de estaciones base para satisfacer la capacidad de usuarios en entornos urbanos debido a las limitaciones en el espectro asignado.	Por lo general será necesario un mayor número de estaciones base para satisfacer la capacidad de usuarios en entornos urbanos debido a las limitaciones en el espectro asignado.
CPE's Indoor/ Outdoor	Puede soportar CPE's <i>indoor</i> en usuarios a menos de 400 metros de distancia de la BS, debido a la alta interferencia en entornos urbanos, CPE's <i>outdoor</i> pueden ser utilizados en cualquier parte.	Puede soportar CPE's <i>indoor</i> en usuarios a menos de 800 metros de distancia de la BS, CPE's <i>outdoor</i> pueden ser utilizados en cualquier parte.	Debido al gran número de celdas, podrá soportar una gran cantidad de CPE's <i>indoor</i> , dando como resultado CPE's de menor precio y bajos costos de instalación.	Debido al gran número de celdas, podrá soportar una gran cantidad de CPE's <i>indoor</i> , dando como resultado CPE's de menor precio y bajos costos de instalación.

Después de haber analizado este ítem detenidamente, con los beneficios y desventajas de cada banda tanto desde el punto de vista de costos y desempeño que estas pueden presentar en zonas urbanas, se debe hacer una selección de la que mejor se acomode a las expectativas de la red. En zonas urbanas se recomienda hacer uso de bandas licenciadas, pues, se supone que son áreas de alta congestión RF por el gran número de competidores y operadores inalámbricos. Para el caso de WiMAX, esto no sería posible para una nueva empresa, debido a que las licencias en Colombia en la banda de 3.5 GHz se encuentran asignadas, por lo tanto, alguien que quiera hacer uso de esta banda tendrá que hacer una alianza con alguno de los concesionarios que la poseen. Si no es posible realizar una alianza de este tipo o adquirir una franquicia y aún se desea prestar el servicio en un área metropolitana, la opción que se recomienda es hacer uso de la banda U-NII de 5.725 a 5.825 GHz, que si bien es no licenciada es mucho más limpia y libre de interferencias que la banda ISM de 2.4 GHz. Por lo tanto una alternativa sería utilizar radio bases y CPE's WiMAX en la banda de 5.725 a 5.825 GHz lo cual daría como resultado una red de gran desempeño pero de alto costo, pues actualmente los CPE's WiMAX oscilan alrededor de los 800 dólares. Otra opción sería utilizar una red híbrida utilizando equipos WiMAX en 5.8 GHz para los *backhaul* para realizar la distribución a los usuarios finales con equipos WiFi en 2.4 GHz, lo cual disminuirá en gran medida el costo de la red. Estas configuraciones serán explicadas con más detalle en la siguiente etapa, sin embargo, al finalizar la revisión de este ítem se debe tener una idea aproximada de cual banda de frecuencia utilizar.

4.3. FASE 2: MODELADO DEL SISTEMA

Una vez se ha recopilado la información necesaria y se ha construido una idea global del alcance, servicios y tecnologías que podrían utilizarse en la red, se procede con la siguiente fase que corresponde con el diseño de la red.

4.3.1. Selección del Sistema.

En este punto se tienen dos alternativas para escoger: WiFi o WiMAX. Para ayudar en este proceso se ha realizado una matriz DOFA para cada una de ellas para brindar al

lector un panorama sobre sus fortalezas y debilidades, estas están resumidas en las Tablas 4-3 y 4-4 [2][3][14][15].

Tabla 4-3. Matriz DOFA de WiFi.

Fortalezas	Oportunidades
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tecnología Inalámbrica altamente difundida, con una gran cantidad de productos y aplicaciones. ➤ Bajo costo de productos. ➤ Amplia gama de productos disponibles actualmente, lo cual significa que también se tiene un buen soporte técnico. ➤ Velocidad y facilidad en la Instalación ➤ Estándar continuamente mejorado, tanto en velocidad como en seguridad ➤ Es la base para otros estándares ➤ Buena velocidad para aplicaciones de datos: 54 Mbps en 802.11a/g y 11 Mbps en 802.11b. ➤ Es la tecnología dominante para WLAN ➤ Gran Flexibilidad para adaptarse a cualquier aplicación. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Acceso de primer kilómetro en lugares de difícil acceso para otras tecnologías ➤ Política de banda ancha del gobierno Colombiano que fomenta la utilización de nuevas tecnologías, para la masificación de la banda ancha. ➤ Conectividad e Inclusión Social ➤ Tendencia y promoción de la Masificación de banda ancha ➤ Acceso universal a la información (Educación) ➤ Políticas de Disminución de la Brecha digital con bajos costos ➤ Nuevos Mercados (VoIP) ➤ Situación económica del país hace que las soluciones que presenten menor costo sean las preferidas.
Debilidades	Amenazas
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Rango de cobertura ➤ Degradación de la señal y retardo ➤ Acceso a las bandas libres ➤ Interferencia con otros dispositivos ➤ Ancho de banda limitado ➤ Soporte limitado para servicios en tiempo real como VoIP. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Acceso libre a la banda de 2.4 GHz ➤ Tecnologías DSL/Cable Modem ya han ganado terreno en las principales ciudades de Colombia. ➤ Poco conocimiento de la población colombiana sobre las tecnologías inalámbricas y sus verdaderas posibilidades y ventajas.

Tabla 4-4. Matriz DOFA de WiMAX.

Fortalezas	Oportunidades
<ul style="list-style-type: none"> ➤ WiMAX está basada en técnicas OFDM, las cuales ofrecen gran inmunidad contra el desvanecimiento y la interferencia. ➤ Alta velocidad: 70 Mbps (teórico). ➤ Sistemas adaptables a las condiciones del canal y auto configurable. ➤ Costos bajos a futuro, con la aparición de productos certificados, y basados en los estándares 802.16 (ventaja sobre soluciones propietarias). ➤ Con los procesos de estandarización se fortalecerá la competencia entre diferentes fabricantes. ➤ Facilidad de implementación y despliegue. Productos certificados posibilitan instalaciones <i>plug and play</i>. ➤ Protocolos de QoS que posibilitan la utilización de video y VoIP. ➤ Escalabilidad: soporte para cientos de usuarios por estación base. ➤ Soporte para movilidad: con la extensión 802.16-2005 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Política de banda ancha del gobierno Colombiano que fomenta la utilización de nuevas tecnologías, incluida WiMAX. ➤ Regulación en cuanto a espectro que libera varias bandas para sistemas inalámbricos entre 900 y 5850 MHz. Algunas de estas frecuencias coinciden con las utilizadas por WiMAX. ➤ Baja oferta de acceso banda ancha en Colombia: baja cobertura, altos costos, etc. ➤ Muy pocos competidores para el acceso inalámbrico banda ancha en Colombia. ➤ Infraestructura celular para redes convergentes.
Debilidades	Amenazas
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Disponibilidad actual limitada para el mercado de consumo, no existen chips WiMAX disponibles para dispositivos portátiles como <i>Laptops</i> o PDAs. ➤ Alto costo en equipos actuales, para proveedores de servicio. ➤ El retardo en el proceso de certificación ha generado muchos proyectos pre WiMAX, y otras tecnologías de banda ancha que serán una fuerte competencia. ➤ Los CPE's de los clientes pueden ser ubicados <i>indoor</i> u <i>outdoor</i>, sin embargo, la instalación de estos al interior de las viviendas no garantiza una calidad de recepción de señal uniforme. De hecho, una infraestructura WiMAX con CPE's <i>indoor</i> necesitara celdas de tamaño reducido, lo cual conlleva a mayores gastos en infraestructura de red. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bajo nivel de adopción del acceso banda ancha en Colombia. Preferencia de las conexiones telefónicas por sus bajos costos. ➤ Tecnologías DSL/Cable Modém ya han ganado terreno en las principales ciudades de Colombia. ➤ Dificil situación económica del grueso de la población Colombiana. ➤ Evolución de otros estándares de área metropolitana como 802.20. ➤ Poco conocimiento de la población colombiana sobre las tecnologías inalámbricas y sus verdaderas posibilidades y ventajas.

Como se puede apreciar cada una de ellas tiene sus beneficios y desventajas, en gran parte la decisión sobre que tecnología escoger estará afectada por el presupuesto con el que se cuente para el proyecto. Pero también hay que tener en cuenta que en un escenario urbano el desempeño y la cobertura son también factores decisivos para la prestación del servicio y la calidad del mismo.

Es claro que si alguien quiere implementar una red inalámbrica metropolitana debe contar con un buen presupuesto, de otra forma, se estaría hablando de la instalación de un *hotspot* o una WLAN los cuales están por fuera del enfoque de este trabajo de grado. Por lo tanto asumiendo que el presupuesto es adecuado estas son las recomendaciones para la elección del sistema:

- Para escoger la tecnología primero se debe haber hecho una elección sobre la banda de frecuencia. Para áreas metropolitanas de gran envergadura como Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla, Bucaramanga, definitivamente se recomienda hacer uso de espectro licenciado. Esto deja como alternativa a WiMAX, debido a que WiFi opera solo en bandas libres.
- Como se ha mencionado en el capítulo 3, en Colombia la banda licenciada para WiMAX definida por el Ministerio de Comunicaciones es la de 3.5 GHz, la cual ya ha sido asignada, tanto a nivel nacional como departamental. Por lo tanto, si se quiere prestar el servicio con WiMAX en banda licenciada, se deberá hacer algún tipo de alianza con un concesionario que la posea o comprar una franquicia, lo cual es muy común, y es conocido como mercado secundario del espectro. Si esto es factible, entonces, se debe proceder al diseño del sistema tomando a WiMAX como la tecnología escogida, tanto en las radio bases como en los CPE's.
- Si no se pudo adquirir el permiso para trabajar en la banda licenciada, y aún se quiere prestar el servicio y seguir con la idea de montar la red en el área metropolitana, se recomienda utilizar WiMAX en la banda U-NII de 5.725 GHz a 5.825 GHz, que si bien es una banda no licenciada, es mucho más limpia y libre de interferencias que la banda ISM de 2.4 GHz. Aunque WiFi también opera en la banda U-NII con el estándar 802.11a, no se recomienda su utilización en un área

metropolitana de gran envergadura pues su cobertura es limitada y aún utilizando antenas de alta ganancia no se garantizan enlaces estables.

- Ahora bien, si el proyecto se quiere implementar en una zona urbana no muy grande como Popayán, Tuluá o ciudades pequeñas, donde la competencia no es muy fuerte y la cantidad de clientes no es muy grande, se recomienda utilizar WiMAX en la banda no licenciada U-NII de 5.725 GHz a 5.825 GHz, dado que, el espectro en estas ciudades no se encuentra tan congestionado y los equipos WiMAX vienen equipados con múltiples sistemas para evitar la interferencia como Selección Dinámica de Frecuencia (DFS, *Dynamic Frequency Selection*), Retransmisión Automática de Datos (ARQ, *Automatic Request for Retransmission*), antenas inteligentes entre otros. Además, como la cantidad de clientes es poca el utilizar una banda libre evita al operador el pago de cuantiosas regalías por el uso del espectro al Ministerio de Comunicaciones, lo cual afectaría sensiblemente los precios ofrecidos al usuario final. Igual que en el caso anterior también podría utilizarse WiFi en la banda U-NII con el estándar 802.11a, pero no se recomienda su utilización pues su cobertura es limitada y aún utilizando antenas de alta ganancia no se garantizan enlaces estables.

- De las recomendaciones anteriores se concluye que el mejor sistema para una zona urbana es utilizar WiMAX de extremo a extremo, es decir, tanto en las radio bases como en los CPE en una configuración PTM (punto multipunto), ya que sin duda alguna sería una red confiable y de alto desempeño. Sin embargo, también es factible implementar una red híbrida que conjugue las dos tecnologías, esta sería una opción recomendable cuando se requiere disminuir costos, pues no se trabajaría con CPE's WiMAX si no con WiFi, lo cual la hace una solución mucho más viable para entornos colombianos teniendo en cuenta la economía del país y la capacidad de compra limitada del grueso de la población, este esquema se muestra en la Figura 4-4.

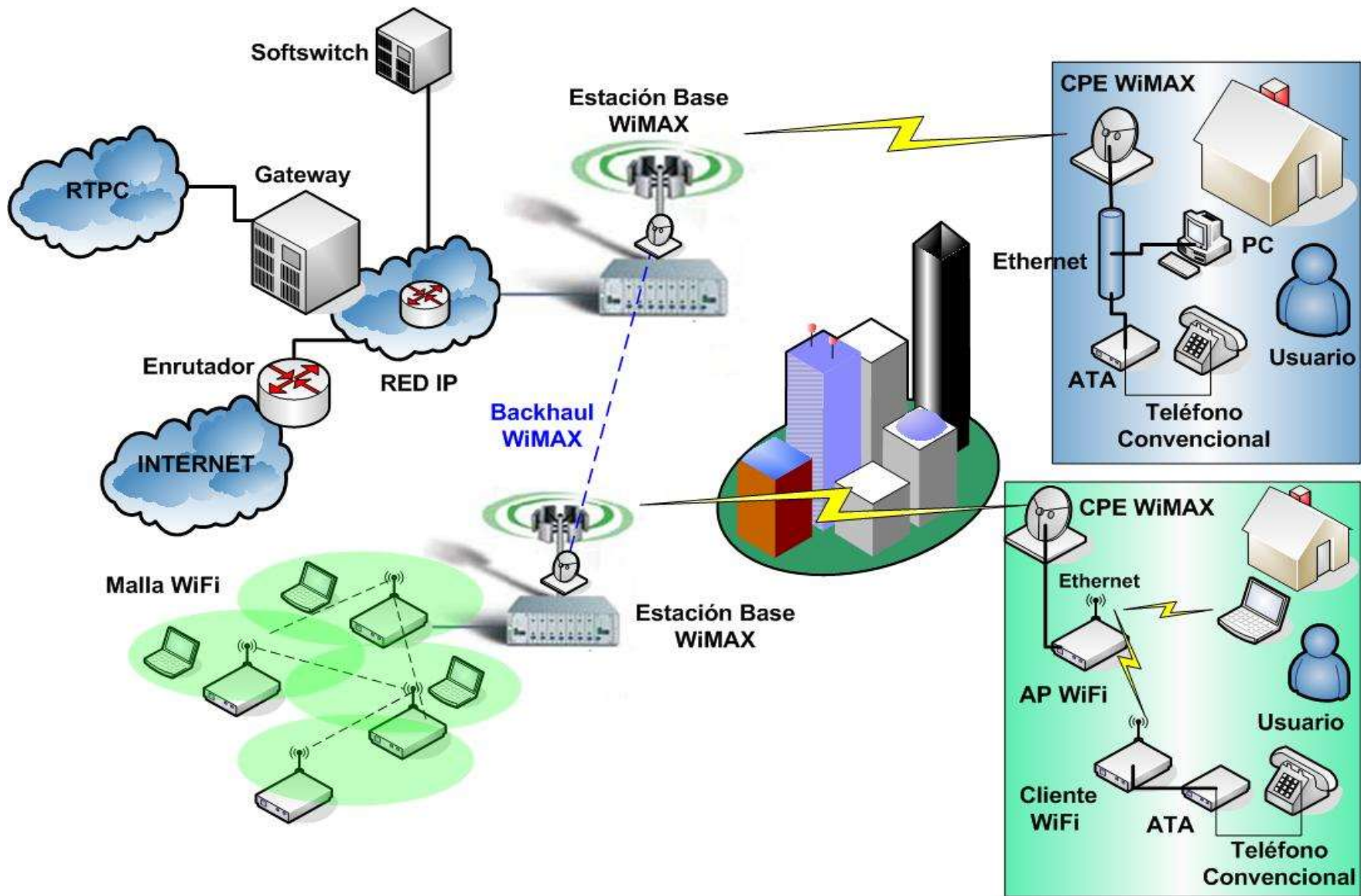


Figura 4-4. Diagrama general arquitectura red inalámbrica metropolitana WiMAX- WiFi.

Lo que se quiere en este caso es utilizar los beneficios de WiMAX para implementar el *backhaul* y transportar la señal hasta los nodos de distribución, que se implementarían con WiFi, los cuales a su vez podrían tener una configuración en malla. Este esquema añadiría a la red un gran dinamismo pues múltiples dispositivos como *laptops*, agendas personales (PDA, *Personal Digital Assistant*) y cualquier otro que tenga el chip WiFi podría conectarse a la red. De igual forma esta configuración es factible en una red completamente WiMAX PTM en una metrópoli aunque en este caso el operador podría adoptar este esquema para diversificar sus servicios o para crear *hotspots* en zonas públicas dentro de la ciudad, como centros comerciales, instituciones educativas, hoteles, etc.

- En un futuro cercano se prevé que salgan al mercado equipos duales WiFi/WiMAX, de hecho ya se encuentra disponibles varias soluciones de este tipo, como por ejemplo la *MeshMAX* de *Proxim* [28], la cual implementa en un solo equipo un radio WiMAX en 3.5 GHz y un radio WiFi en 2.4 GHz con capacidades de configuración en malla. Sin embargo, actualmente el costo de equipos con estas capacidades es realmente alto y sumado a esto, los protocolos dinámicos utilizados para la constitución de la malla son propietarios evitando cualquier intento de interoperabilidad si en un momento dado se llegase a escoger otro fabricante. Aunque las redes en malla presentan una novedosa forma de cubrir grandes distancias y prestar servicios inalámbricos, también es cierto que su diseño requiere cuidados especiales, con respecto a parámetros como la degradación del ancho de banda, *jitter* y retardos por salto [29]. En el anexo D se encuentra un resumen de las consideraciones más importantes a tener en cuenta sobre este tipo de sistemas.

- Para el caso específico del estándar IEEE 802.16-2005 (WiMAX móvil), la situación es aún más crítica desde el punto de vista de costos, pues por el momento su penetración en el mercado es realmente baja debido a los altos precios de sus CPE's, y son pocos los proveedores que ofrecen una plataforma totalmente funcional con todas las características OFDMA-2048 que especifica el estándar. Además, se prevé que este sistema opere en la banda licenciada de 2.5 GHz, factor que lo haría incompatible con el estándar para operaciones fijas de WiMAX (802.16-2004) hecho que retardaría aún más su penetración masiva en el

mercado. Para el caso específico de Colombia, el Ministerio de Comunicaciones aún no ha definido políticas claras acerca de la distribución y futura asignación de esta banda, lo cual ha creado indecisión por parte de los operadores que ganaron la licitación para WiMAX Fijo en la banda de 3.5GHz, pues no hay certeza acerca de su inversión en esta tecnología. Con este panorama, se recomienda la realización de un futuro proyecto de grado que se enfoque en el estándar 802.16-2005 y revise en detalle las coyunturas y aspectos a tener en cuenta para su futura implementación en Colombia

4.3.2. Modelado del Presupuesto del Enlace.

Hace referencia a la tabulación de todas las ganancias y pérdidas experimentadas por la señal de radio entre el transmisor y el receptor. Para desarrollar este ítem, como resultado del paso anterior ya se deben tener escogidos los equipos que se van a utilizar, debido a que se necesitan los datos exactos de la potencia de salida del transmisor (**P_{tx}**), pérdidas de la línea de transmisión (**L_{tx}**), la ganancia de la antena (**G**) y la sensibilidad del receptor de acuerdo a la modulación (**S**), para calcular el presupuesto del enlace, estos datos son proporcionados por cada fabricante mediante las hojas de datos (*datasheets*) que acompañan a cada dispositivo. Lo que se busca con este paso es determinar las máximas pérdidas permitidas en el enlace (**L**) basado en las características de los equipos a utilizar, para posteriormente utilizar este dato como uno de los parámetros de entrada en el modelo de propagación para calcular el radio de la celda, para esto se hace uso de la ecuación A-2 explicada en el Anexo A, que hace referencia a la ecuación de balance del enlace. En el Anexo B¹¹ se desarrollan los ejemplos de cálculo y se encuentra la tabla de valores de sensibilidad definidos por el estándar (Tabla B-2).

4.3.3. Cálculos de Propagación.

En el Anexo A se describen los modelos de propagación más utilizados en ambientes urbanos, lo que se busca con dichos modelos es encontrar el radio de cobertura *r* promedio de las estaciones base, que se puede esperar de cualquier sitio en las áreas topográficas definidas. Actualmente, existen herramientas software especializadas que

¹¹ Se recomienda leer el Anexo B pues en el se desarrollan los ejemplos de cálculo de WiMAX en las diferentes ciudades tomadas como referencia, que complementan los criterios expuestos en este capítulo.

realizan estos cálculos pero su precio en el mercado puede alcanzar fácilmente los 20.000 dólares, por esto y como valor agregado para este proyecto se ha desarrollado una herramienta en Java¹² llamada *WiCalculator V. 1*, con el fin de sistematizar las formulas de los diferentes modelos y facilitar el proceso de cálculos del enlace. Básicamente los resultados obtenidos con la herramienta serán el radio de cobertura r promedio de la celda y la relación señal a ruido de cada modulación para cada terreno. La utilización de modelos de propagación es un paso obligado si se quiere realizar un diseño lo más aproximado posible a la realidad, y en especial en grandes áreas donde es necesario determinar con la mejor exactitud el número de estaciones base necesarias para brindar total cobertura. Las tablas con los cálculos de cobertura para los equipos y las diferentes ciudades de prueba se encuentran en el Anexo B, para los cálculos de este trabajo de grado se utilizaron como referencia los niveles de sensibilidad en recepción para las diferentes modulaciones y espaciamiento de canales definidas por la IEEE para el estándar 802.16-2004.

4.3.4. Realización de un *Site Survey*.

Los modelos y cálculos mencionados anteriormente son una buena aproximación y alternativa para modelar la propagación de las señales especialmente en áreas extensas. Sin embargo, es necesario realizar correcciones a los resultados obtenidos por dichos modelos, ya que existen un sin número de variables que en un entorno real pueden afectar la propagación, la mejor manera de obtener esta información es realizar un *Site Survey* o Análisis RF del sitio. Un *Site Survey* es un proceso que se realiza de manera gradual, mediante el cual las personas encargadas de realizar el diseño de la red descubren y registran el comportamiento de las ondas de radiofrecuencia en la zona donde se pretende dar cobertura. Su objetivo principal es asegurar una cobertura uniforme que brinde un servicio de calidad a los usuarios de la red. La realización de un *Site Survey* proporciona una visión realista de cómo se comportaría la propagación de las ondas en las instalaciones donde se piensa realizar el despliegue de la red.

Para este procedimiento puede recurrirse a analizadores de espectro, software especializado funcionando sobre equipos radio y otros instrumentos de precisión capaces de sintonizar las bandas de frecuencia y de detectar actividad en bandas cercanas que

¹² JAVA, lenguaje de programación orientado a objetos desarrollado por *SUN MICROSYSTEMS*.

puedan afectar las transmisiones de las bandas elegidas. Cuando se trate de una ciudad grande no es necesario recorrer todas y cada una de las calles, pues, esto sería un proceso tedioso que causaría pérdida de tiempo y dinero, se recomienda que el *Site Survey* se realice en las zonas de mayor densidad de usuarios, donde existan fuentes conocidas de interferencia, o donde la densidad de construcciones de la zona la conviertan en una área hostil para la propagación, pues precisamente la información recogida en aquellos lugares será la más valiosa para realizar las correcciones.

4.4. FASE 3: MODELADO DE LA CAPACIDAD

En la fase anterior se escogió la banda de frecuencia, la tecnología a utilizar, se realizaron los cálculos de propagación de acuerdo al tipo de terreno y características de desempeño del sistema escogido y se registro la propagación de las ondas en el sitio, en otras palabras, se determinó con la mayor precisión posible la cobertura que puede ofrecer el sistema. Ahora, es necesario estimar cual será la demanda de capacidad que se le exigirá al sistema y el número de estaciones base necesarias para soportarla. Como se menciono en la fase anterior WiMAX es el sistema recomendado para WMAN por lo cual con respecto a esta tecnología se desarrollaran los cálculos de capacidad.

4.4.1. Identificación de la cantidad de usuarios potenciales.

Este ítem se resuelve con la información demográfica recolectada en la Fase 1, básicamente este dato hace referencia a la cantidad de población dentro del área de cobertura que podrían ser usuarios potenciales del servicio. Es claro que no todas las personas dentro del área de acción de la red serán usuarios del sistema, por esto es necesario delimitar este dato a una cifra realista para realizar los cálculos de capacidad.

4.4.2. Identificación del porcentaje esperado de penetración.

Este dato también puede obtenerse de la información demográfica recolectada en la Fase 1, se puede analizar el nivel económico y educativo de la población para darse una idea

aproximada de que tantas personas del total estarían interesadas en adquirir el servicio, o se puede recurrir a encuestas en las zonas de cobertura.

Generalmente se debe esperar un periodo de tiempo antes de que los usuarios empiecen a comprar una nueva tecnología, un nuevo servicio o a un nuevo operador de ese servicio. Para algunos consumidores tanto los nuevos servicios como aquellas empresas que los prestan deben estar bien probados y certificados antes de firmar un contrato de prestación de servicios. La telefonía móvil y en especial WiFi han establecido un mercado de bienes y servicios a nivel mundial para las redes inalámbricas en la transmisión de datos, por lo cual, la entrada de una nueva tecnología como WiMAX tendrá una rápida aceptación. Los precios cobrados por los servicios por parte del nuevo operador también tendrán un efecto en la rapidez de adopción de la tecnología, y además las zonas donde no existe ningún tipo de proveedor presentaran una tasa de adopción mayor que ciudades o centros urbanos donde hay oferta de DSL o Cable Modem. La Figura 4-5 [27] muestra la tasa de adopción tentativa para una nueva tecnología¹³, para alcanzar el 90% del mercado esperado para diferentes años.

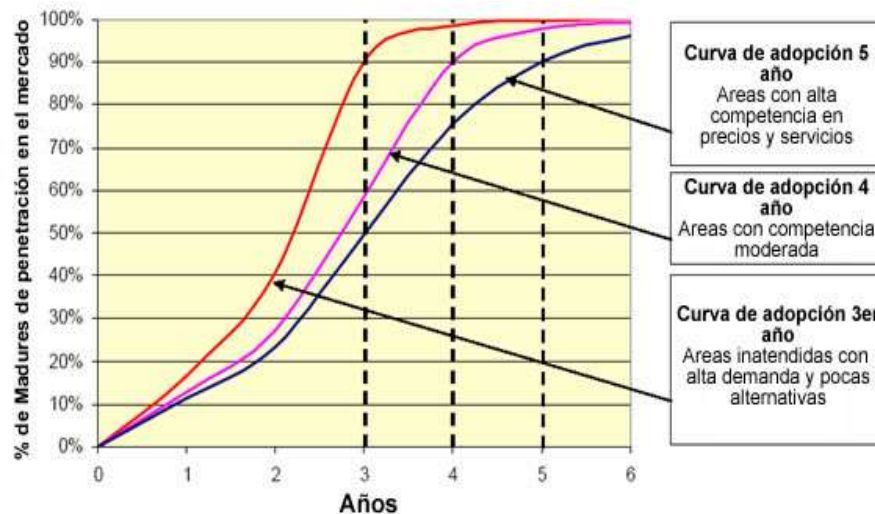


Figura 4-5. Tasa de adopción del mercado para una nueva tecnología.

¹³ Esta curva de adopción fue definida por el estudio denominado *Rogers Innovation Adoption Curve*. Para mayor información visitar www.valuebasedmanagement.net

Cuando se haya definido el porcentaje de penetración, este se multiplica con el número total de usuarios potenciales encontrado en el ítem anterior para así obtener el estimado final de suscriptores, dato que también se conoce como la base de usuarios del sistema.

4.4.3. Planeación de Capacidad.

El objetivo de la planeación de capacidad es calcular la cantidad de usuarios que puede soportar cada sector de una BS base de acuerdo a las exigencias de capacidad y servicios ofrecidos por el proveedor, para finalmente calcular el número de estaciones base que serán necesarias para atender dicha demanda. Los cálculos de capacidad estarán orientados a la tecnología WiMAX pues ya se estableció que para entornos metropolitanos esta es la tecnología recomendada.

- **Throughput OFDM.** Como ya se mencionó en la sección 1.6, el estándar IEEE 802.16-2004 utiliza OFDM 256-FFT (sub-portadoras) como método de multiplexación donde cada sub-portadora es modulada en un tiempo de símbolo que está relacionado de manera inversa con el espaciamiento de la frecuencia portadora, de modo tal que entre ellas exista una mínima interferencia o en otras palabras que sean ortogonales, independientes una de la otra. En este punto hay que mencionar que la capa OFDM PHY define 56 canales de guarda, también llamados nulos pues nunca son energizados, para evitar la interferencia entre portadoras y 8 canales pilotos usados para sincronización, lo cual deja 192 sub-portadoras dedicadas al transporte de datos o información útil [5].

Ahora bien, la capacidad de cada sub-portadora depende de varios factores, entre los más importantes se encuentran, la modulación correspondiente, que puede ser BPSK (1 bit por sub-portadora), QPSK (2 bit por sub-portadora), 16 QAM (4 bits por sub-portadora) o 64 QAM (6 bits por sub-portadora), el tamaño del canal y la tasa convolucional utilizada para control de errores y FEC.

A continuación se presentan la ecuación fundamental [5] para calcular la capacidad de un canal OFDM de acuerdo a los parámetros mencionados anteriormente:

$$C_{OFDM} = \frac{N_{FFT-USADAS} \times n \times c}{T_G + T_S} \quad (4-1)$$

Donde,

- C_{OFDM} , es la capacidad en del canal (sector) OFDM.
- $N_{FFT-USADAS}$, son las sub-portadoras utilizadas para el envió de datos (192).
- n , son los bits por sub-portadora que puede transmitir la modulación escogida.
- c , es el código de convolución para CRC y FEC utilizado por la modulación, pueden ser 1/2, 2/3 o 3/4.
- T_S , es el tiempo de símbolo OFDM para el canal escogido.

$$T_S = \frac{1}{\Delta f} = \frac{N_{FFT}}{BW \times \alpha} \quad (4-2)$$

- T_G , es el tiempo de guarda, OFDM soporta tasas de 1/4, 1/8, 1/16 y 1/32 del tiempo de símbolo. Para los cálculos se utilizara 1/16.
 - N_{FFT} , es el número de sub-portadoras o puntos de transformada (256).
 - BW , es el ancho de banda del canal utilizado.
 - α , es el factor de muestreo para el canal escogido. Para el canal de 3.5 MHz $\alpha=8/7$, para el canal de 7 MHz $\alpha=28/25$ y para el canal de 10 MHz $\alpha=144/125$.
- **Tipos de servicio WiMAX.** Dentro de su arquitectura WiMAX define varios tipos de servicio que son soportados para ofrecer diferentes niveles de calidad (QoS, *Quality of Service*) con el objetivo de que el operador dentro de su modelo de negocio dise ne diferentes Niveles de Contrato (SLA, *Service Level Agreement*) para satisfacer las necesidades de sus usuarios [5].
 - **Servicios CBR (*Constant Bit Rate*).** WiMAX soporta servicios con tasas constantes de bits, mediante la configuración de canales de frecuencia dedicados a flujos de tráfico específico, por lo tanto CBR es muy adecuado

para aplicaciones que tienen límites estrictos de latencia y *throughput* y que generen flujos estables de paquetes de tamaño fijo, como VoIP. CBR permite definir una tasa mínima reservada de ancho de banda, también llamada CIR (*Committed Information Rate*) que será la velocidad mínima que se le garantizará al usuario cuando se conecte y una tasa máxima de velocidad o MST (*Maximum Sustained Traffic*) que establecerá el tope de velocidad al que el usuario podrá llegar.

- **Servicios VBR (*Variable Bit Rate*).** WiMAX soporta servicios con tasa de bits variable para aquellas aplicaciones que no tienen demandas de tráfico fijo. VBR se adapta muy bien a aplicaciones que generen cargas de tráfico que fluctúen en el tiempo incluyendo *streaming* de video comprimido y VoIP con supresión de silencios. Igual que el caso anterior VBR también permite definir una tasa mínima reservada de ancho de banda CIR y una tasa máxima de velocidad o MST (*Maximum Sustained Traffic*).
- **Servicios *Best Effort*.** Los servicios *best effort* están diseñados para flujos de tráfico con los requerimientos de QoS más bajos en términos de latencia en el acceso al canal y sin ancho de banda garantizado. Los servicios BE son apropiados para aplicaciones como navegación Web y transferencia de archivos, que pueden tolerar interrupciones intermitentes y reducciones de *throughput* sin consecuencias serias.
- **Factor de Sobre Suscripción (OSR, *Over Subscription Rate*).** Es bien conocido que el tráfico de Internet está formado por ráfagas, y que los usuarios muy probablemente no transmitirán información a máxima velocidad todo el tiempo simultáneamente. Por lo tanto, puede ser utilizada una multiplexación estadística para ahorrar recursos, por ejemplo, con un factor de sobre suscripción igual a 10, un sector de una estación base con un *throughput* neto de 15 Mbps, puede ser utilizado para dar servicio a 150 suscriptores a una velocidad de 1 Mbps *half duplex* /512 kbps *full Duplex*.

El OSR debe ser lo suficientemente alto como para minimizar el número de sectores por estación base y lo suficientemente bajo como para mantener

satisfechos a los usuarios con el servicio. La escogencia de un factor adecuado depende de las aplicaciones que los usuarios utilicen, si por ejemplo, la conexión solo se utiliza para leer *e-mails* y navegar en Internet, se puede utilizar un factor de concentración alto, por el contrario servicios multimedia como *streaming* de video o música exigirán una alta capacidad y requerirán un *throughput* constante de la red. Algunas aplicaciones, como las P2P (*peer to peer*) son aún más problemáticas desde el punto de vista del factor de concentración, pues, un usuario puede descargar archivos de música o video a máxima velocidad por muchas horas o incluso todo el tiempo.

- **Throughput promedio por usuario.** En este punto es necesario calcular la demanda de capacidad promedio exigida por cada usuario según los tipos de servicio que serán ofrecidos (CBR, VBR, BE), el porcentaje de usuarios que pertenezca a cada uno de ellos, el OSR y si se está utilizando duplexación FDD o TDD. Como se mencionó en el Capítulo 1, en FDD se tiene dos canales diferentes para el *downlink* y *uplink*, mientras que TDD utiliza el mismo canal para los dos enlaces. En términos de capacidad la diferencia radica en que en FDD cada enlace (*downlink/uplink*) tendrá su propia capacidad independiente una de la otra, por el contrario en TDD se habla de un *throughput* agregado que consiste en la suma de los dos enlaces, ya que ambos comparten el mismo canal. En Colombia los proveedores WiMAX utilizarán sistemas FDD, debido a que esta fue la canalización aprobada por el Ministerio de Comunicaciones, por lo tanto los ejemplos de cálculo estarán orientados hacia este sistema (ver Anexo B).
- **Número de suscriptores por sector.** El objetivo de este ítem es establecer cuántos usuarios desde el punto de vista de capacidad puede soportar un solo sector de una estación base WiMAX. Para ello se utilizan los datos de capacidad del canal y *throughput* promedio por usuario calculados anteriormente:

$$NumerodeSuscriptores_{SECTOR} = \frac{CapacidadCanal_{OFDM}}{Throughputpromedio_{USUARIO}} \quad (4-3)$$

Donde,

- $NumerodeSuscriptores_{SECTOR}$, es el número de usuarios soportados desde el punto de vista de capacidad por el sector.
 - $CapacidadCanal_{OFDM}$, es el *throughput* OFDM del canal calculado con la ecuación fundamental 4-1.
 - $Throughputpromedio_{USUARIO}$, es la capacidad promedio demandada por cada usuario calculado en el ítem anterior.
- **Número de sectores necesarios.** Ahora que ya se conoce el número de usuarios soportados por la capacidad de cada sector, es necesario determinar cuantos sectores serán necesarios para albergar la base de usuarios esperada calculada en el ítem 4.4.2 mediante la ecuación 4-4.

$$NumeroSectores = \frac{NumeroTotalUsuarios}{NumerodeSuscriptores_{SECTOR}} \quad (4-4)$$

Encontrada la cantidad de sectores, es fácil calcular el número de estaciones base. Actualmente, la gran mayoría de proveedores de equipos inalámbricos de banda ancha, fabrican sus estaciones base con una capacidad de 6 sectores, y de hecho esta es la configuración más utilizada por los WISP's a nivel mundial, porque permite tener una mayor capacidad y una mejor cobertura para usos metropolitanos. Además, las nuevas arquitecturas de las BS permiten tener un sistema flexible en el cual la adición de sectores se haga de manera progresiva a medida que la capacidad de la red lo exija y el presupuesto lo permita, en la Figura 4-6 [30] se muestra un ejemplo de esto.

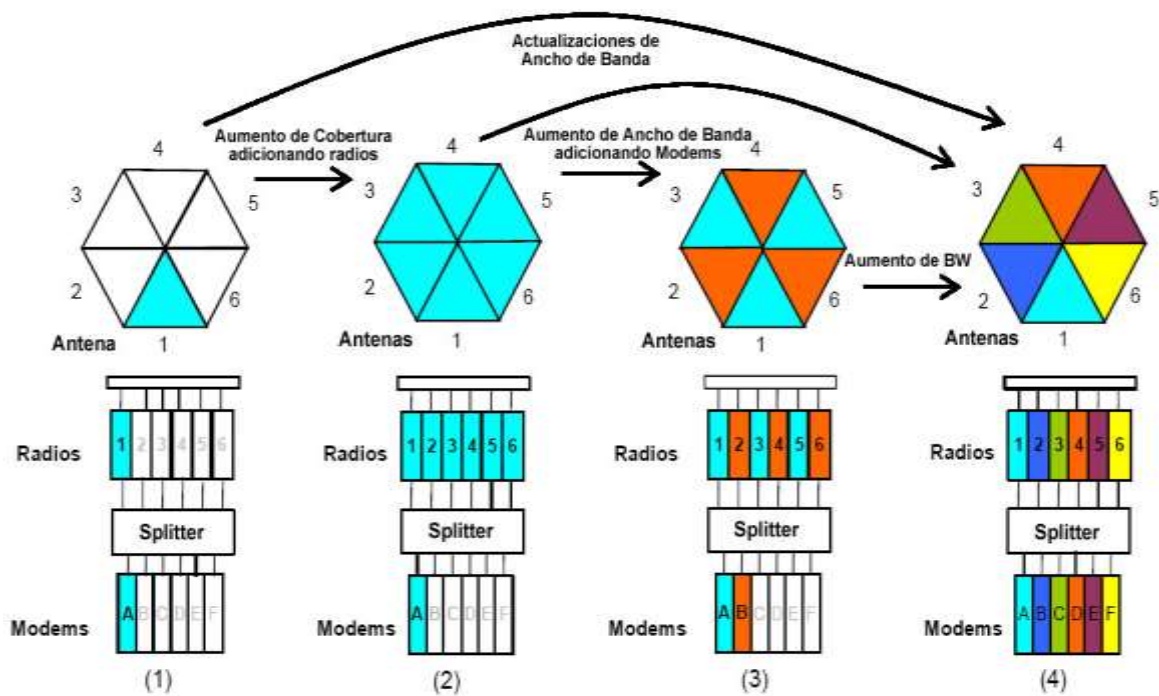


Figura 4-6. Estación base de 6 sectores con capacidad flexible.

En la parte (1) de la Figura 4-6 se puede apreciar una BS de seis sectores que tiene: una antena, que es el elemento encargado de poner las ondas de radio en el aire y de definir el patrón de radiación; una unidad de RF, que es la encargada de realizar la amplificación y un módem, que es donde se implementa como tal el estándar y se realizan las funciones de modulación y demodulación. Esta configuración sería la que inicialmente podría tener un WISP cuando apenas inicie operaciones, dando cobertura a un sector con una sola frecuencia. A medida que los usuarios aumenten y se encuentren más dispersos será necesario comprar más antenas, por ejemplo, completando los seis sectores como en la parte (2), para este caso un solo módem podría alimentarlas a todas, convirtiéndose prácticamente en una antena omnidireccional pues se estaría radiando con una sola frecuencia un sector de 360°. Sin embargo, aunque esto puede ser una solución en primera instancia no es recomendable hacerlo debido a que la interferencia sería grande con otros sistemas y con otras estaciones base, por esto se recomienda por lo menos hacer uso de dos frecuencias, como en la parte (3). En este caso, se tienen dos módems cada uno de los cuales alimenta a tres sectores, este sería el primer paso para realizar el re-uso de frecuencia mencionado en la sección 1.9. Finalmente en la parte (4), se tiene la situación ideal donde cada sector es alimentado por un módem diferente, esto

brindaría una gran inmunidad a la interferencia co-canal y aumentaría el ancho de banda total. Estaciones Base de 6 sectores serán las utilizadas como referencia para los cálculos.

- **Planeación de Frecuencia y asignación de canales.** Como se explicó en la sección 1.9, el objetivo de la planeación de frecuencias es asignar un número limitado de canales de frecuencia a cada uno de los sectores de la estación base para lograr una interferencia inter-celda mínima. Debido a la estructura celular de las redes inalámbricas de banda ancha metropolitanas, este proceso se realiza de manera muy similar a otras redes celulares como GSM (*Global System for Mobile Communications*).

Una distribución típica de la frecuencia de 3.5 GHz, es un espaciado de 2x21 MHz o 2x28 MHz para FDD. En este trabajo de grado se toma un espaciado de 2x21 MHz, es decir, 21 MHz para el *downlink* y 21 MHz para el *uplink* como se muestra en la Tabla 4-5 [31], que ha sido definido por el ministerio de comunicaciones para las licencias WiMAX nacionales en Colombia. Esto quiere decir que están disponibles 6 canales con un ancho de banda de 7 MHz o 12 canales con un BW de 3.5 MHz.

Tabla 4-5. Asignación de canales utilizada para la banda A WiMAX en FDD.

	<i>Downlink</i>	<i>Uplink</i>
Espectro Asignado	21 MHz	21 MHz
Número de Canales	3 de 7 MHz	3 de 7MHz
Rango	3400 a 3421 MHz	3500 a 3521 MHz
Par 1 (P1)	3403 MHz	3503 MHz
Par 2 (P2)	3410 MHz	3510 MHz
Par 3 (P3)	3417 MHz	3517 MHz

Teniendo en cuenta la asignación de canales definida por el Ministerio de Comunicaciones para una de las tres bandas nacionales WiMAX mostrada en la Tabla 4-5, se recomienda la asignación de canales para BS de 6 sectores propuesta en la Figura 4-7.

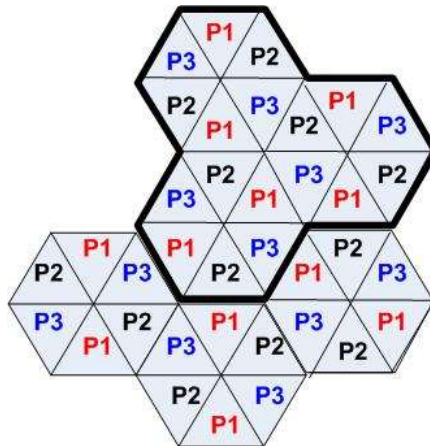


Figura 4-7. Diagrama re-uso de frecuencia recomendado para la banda A de 3.5 GHz.

4.4.4. Planeación de Cobertura.

Como resultado del proceso de planeación de capacidad se conoce el número de estaciones base, necesarias para satisfacer las exigencias de tráfico de la base de usuarios. El objetivo de la planeación de cobertura es simplemente comparar este resultado con los obtenidos en los cálculos de propagación para determinar si el radio de cobertura de las celdas de acuerdo al tipo de terreno y al área de servicio definida en la sección 4.2.1, también satisface los requerimientos del sistema. Puede darse el caso de que según la planeación de capacidad con 2 BS es suficiente para satisfacer las necesidades, pero las condiciones del terreno y los tipos de modulación determinan radios de celda que hacen que 2 BS no sean suficientes para dar cobertura a toda el área, entonces, será necesario revisar si se requiere adicionar más estaciones base al sistema. En este punto es importante mencionar que WiMAX trabaja con modulación adaptativa, como se explicó en el capítulo 1 las modulaciones más altas como 64QAM y 16QAM tienen coberturas limitadas pero mayores velocidades, y modulaciones bajas como QPSK y BPSK tienen grandes coberturas pero velocidades menores, por lo tanto, cada modulación tendrá su propio radio dentro del cual albergara un determinado número de usuarios a cierta velocidad. Por estas razones es importante que el operador defina los tipos de servicios y que porcentaje de usuarios espera estén dentro de cada uno para definir los rangos de cobertura.

Una vez se tenga el radio de la celda, una forma sencilla de resolver este ítem es superponer estos datos en un mapa del área de cobertura para así visualmente determinar cuántas BS serán necesarias (ver Anexo B).

4.5. FASE 4: IDENTIFICACIÓN DE LOS EMPLAZAMIENTOS Y PROPIEDADES INMOBILIARIAS

Después de haber culminado las tareas para modelar la capacidad y la cobertura del sistema, es momento de analizar cuales pueden ser los posibles emplazamientos para las estaciones base. En los pasos anteriores ya se definió esto de manera teórica, es decir, sobre el mapa ya se conoce donde debe ir cada estación base, este ítem hace referencia a la escogencia de la casa, lote o edificios que van a albergar a las BS y que obviamente estarán ubicados lo más cerca posible de los puntos previamente escogidos.

Cuando el emplazamiento es identificado son varios los aspectos que se deben analizar, los más relevantes se mencionan a continuación:

- Es importante hacer una visita física y verificar que posea una altura adecuada, si se trata de una casa o edificio, se recomienda que las antenas tengan la menor cantidad de obstrucciones en su línea de vista hacia el área de cobertura. Se deben tratar de evitar vallas publicitarias de gran envergadura, árboles frondosos, edificios de granito o concreto en las inmediaciones, y cualquier tipo de construcción que sea una obstrucción. Como norma general se recomienda que una estación base en un área metropolitana, este ubicada sobre una altura de 30 metros.
- Se debe verificar la disponibilidad de espacio para los equipos de radio o para la construcción de una torre de antena, de ser necesario. Además, se debe verificar la existencia de energía eléctrica, de interconexiones para el sistema, de vías de acceso y de seguridad. A menudo el emplazamiento ideal puede carecer de uno o más de estos elementos.
- Determinar los costos y las complejidades adicionales asociadas con la consecución del espacio requerido, energía, e interconexión para el emplazamiento deseado es una parte crítica del proceso de selección. El diagrama de flujos de la Figura 4-8 identifica los aspectos críticos que deben ser considerados al seleccionar un sitio. Como con la mayoría de los sistemas basados en radio, raramente habrá una solución perfecta. Según las indicaciones

de la prioridad del diagrama de flujo, la cobertura debe ser una consideración primaria, aunque a menudo otras consideraciones dictarán el uso de un sitio así no sea una óptima solución desde el punto de vista de la cobertura.

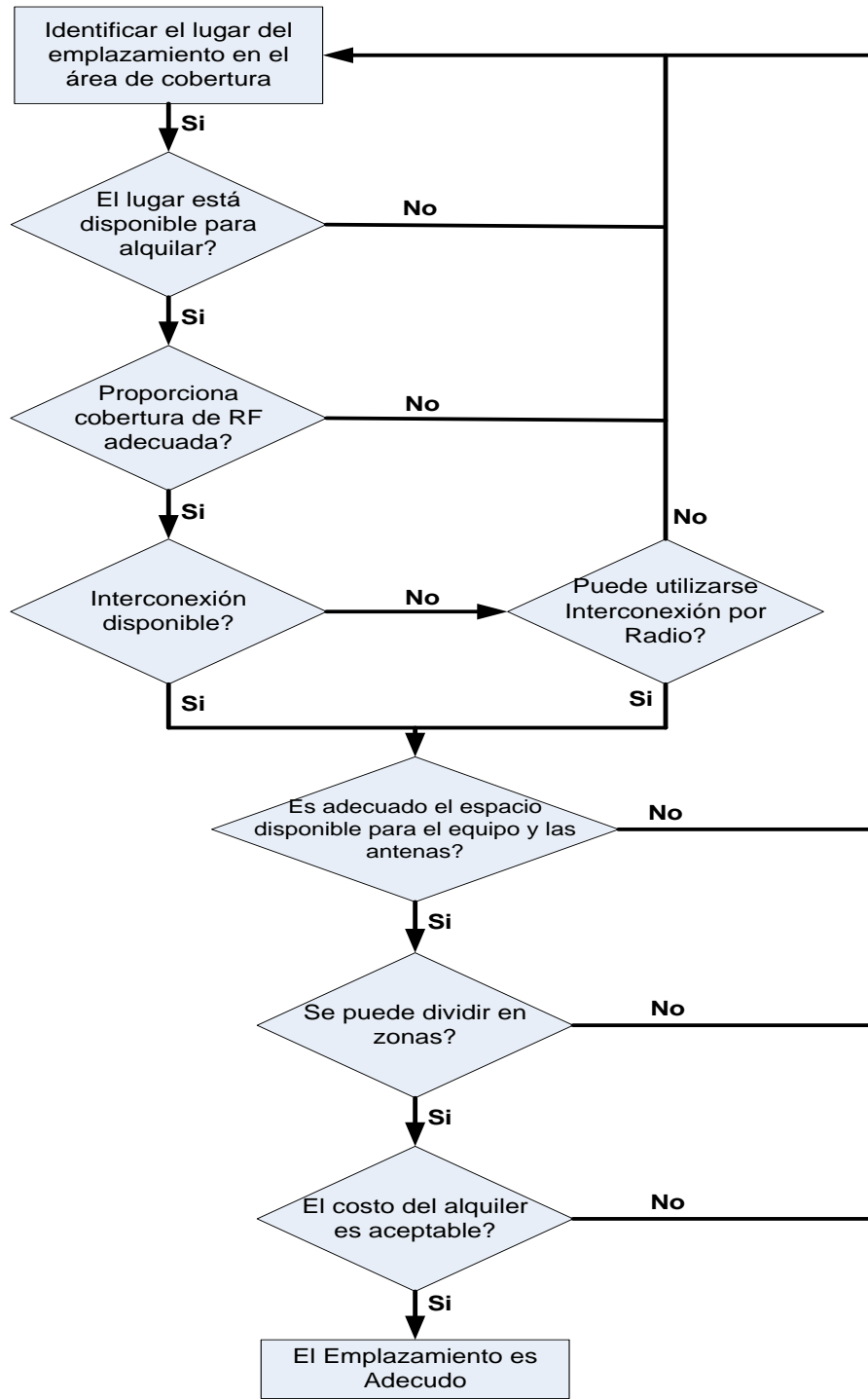


Figura 4-8. Diagrama de flujo para la selección de los emplazamientos.

4.6. FASE 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al terminar las fases anteriores, se ha cubierto gran parte de los aspectos concernientes al diseño y planeación de la red. En este punto se ha definido el modelo de negocio, se ha modelado el sistema y la capacidad por lo cual la persona o empresa que vaya a implementar un WISP, haciendo uso de las tecnologías WiFi/WiMAX, debe tener ya una idea concisa de lo que va a hacer y como lo va a hacer, conociendo los escenarios y ventajas e inconvenientes de este tipo de tecnologías. Para resumir, a continuación se presentan las preguntas que han sido respondidas:

- ¿Cuál es el área de cobertura de la red?
- ¿Cuál es la cantidad de población dentro del área de cobertura y sus características en cuanto a niveles de ingresos, educación, etc.?
- ¿Qué consideraciones especiales requieren los servicios de datos y VoIP?
- ¿Qué frecuencia de operación se debe utilizar?
- ¿Cómo se pueden utilizar las tecnologías WiFi y WiMAX en entornos metropolitanos?
- ¿Cuales son las fortalezas y debilidades de cada sistema, y en que casos deben ser utilizados?
- ¿Cuál es la cobertura esperada del sistema de acuerdo al terreno y frecuencia?
- ¿Cuál es el número de estaciones base necesarias para cubrir toda el área?
- ¿Cuál es la cantidad de usuarios potenciales para cada BS?
- ¿Cuál es la capacidad promedio que será demandada a cada estación base?
- ¿Qué criterios de deben tener en cuenta para seleccionar un emplazamiento?

Después de haber resuelto los ítems de las fases anteriores, la parte tecnológica de la red ha sido descrita y caracterizada totalmente, habiendo realizado lo que se conoce como el diseño lógico de la red. Ahora es necesario analizar los resultados detenidamente para determinar si desde el punto de vista económico el proyecto es factible, para luego pasar a la fase de implementación.

4.7. FASE 6: PUESTA EN MARCHA DE LA RED

Esta es la última fase para la realización del proyecto y está relacionada con la implementación física del modelo lógico determinado en las fases anteriores.

4.7.1. Modelado del Costo.

Esta es quizás una de las tareas más complejas de esta fase pues deberán ser tenidas en cuenta una gran cantidad de variables y gastos. Como se menciona en el Anexo C, donde se describe el marco de trabajo tecno-económico, el costo de construir y operar una red de estas características puede ser dividido en costos de capital y operacionales, más conocidos como CAPEX y OPEX, respectivamente. Dado que el análisis económico de una red de banda ancha inalámbrica está fuera del alcance de este trabajo de grado, se recomienda revisar el Anexo C donde se ofrece una explicación de cada uno de estos rubros a manera informativa, pues, esta área por si sola ameritaría un estudio completo. Para brindar una pequeña referencia, la Tabla 4-7 lista un conjunto de gastos que pueden ser tenidos en cuenta para cada caso.

Tabla 4-6. Algunos rubros para el presupuesto operativo y de capital.

Rubros para el presupuesto de capital	Rubros para el presupuesto operativo
<ul style="list-style-type: none">➤ Inversión en CPE's.➤ Instalación de CPE's.➤ Planeación del enlace.➤ Inversión en BS's.➤ Costo de adquisición de la terraza o del sitio para construir la torre.➤ Gestión del enlace.➤ Publicidad y mercadeo.➤ Instalaciones	<ul style="list-style-type: none">➤ Arrendamiento de terrazas o torres.➤ O&M de la BS.➤ O&M del CPE.➤ O&M del enlace.➤ Arrendamiento de los canales de datos.➤ Herramientas complementarias.

4.7.2. Adquisición de equipos.

Después de haber analizado y modelado las características de capacidad, cobertura y rendimiento necesarias para la red, y de haber revisado detenidamente el presupuesto disponible para el proyecto, es momento de realizar las compras de los equipos que ofrezcan la mejor relación costo/beneficio. Existen en el mercado una gran variedad de fabricantes que ofrecen una amplia gama de productos, sin embargo, es necesario mirar

con calma algunos aspectos que pueden ser decisivos para el futuro funcionamiento de la red:

- **Soporte técnico disponible.** Este es quizás uno de los factores más importantes, ya que después de hacer la instalación y de poner en funcionamiento la red, siempre surgirán problemas técnicos, por lo cual es necesario contar con soporte técnico especializado. Se recomienda que antes de elegir un proveedor de equipos, se verifique si cuenta con presencia en el país, puede ser de manera directa, es decir con oficinas o centros de atención, o a través de distribuidores autorizados debidamente certificados por dicho proveedor para vender y dar soporte a los equipos. De esta manera se asegura que ante cualquier eventualidad siempre tendrá a quien recurrir para resolver dudas y problemas.
- **Tiempos de entrega y garantía.** Ya que en Colombia no se fabrican equipos inalámbricos de banda ancha, por lo tanto es necesario contar con un distribuidor que asegure tiempos de entrega mínimos, en caso de que algún equipo falle y se necesite reemplazarlo, el tiempo en que este tarde en llegar puede afectar las operaciones de la red. Por esto, se recomienda hablar directamente con el gerente de la distribuidora de equipos para conocer exactamente cuales son los tiempos de entrega estipulados y sobre todo, para dejar en claro cuales son las políticas de garantía de los equipos, cuales son las cláusulas y procedimientos que deben realizarse para la reposición de estos.

Una recomendación final en este aspecto es revisar cuales son los equipos que empresas similares están utilizando, dado que, muchas veces ellas ya han pasado por problemas y por lo general siempre tienen en funcionamiento a aquellos equipos que les han dado mejores resultados. No se trata de copiar ni de imitar a la competencia, pero muchas veces es mejor seguir las tendencias que realizar innovaciones peligrosas. A manera general se recomienda revisar los productos de las marcas más conocidas y confiables, como *Axxcelera*, *Alvarion*, *Motorola*, *RedLine Communications*, *Aperto*, *Siemens* y *Proxim*.

4.7.3. Capacitación de Personal.

Este también es un factor importante y que debe ser tenido en cuenta en la elección de cada fabricante o de un distribuidor de equipos. Por lo general las mejores marcas

ofrecen entrenamientos y capacitaciones al personal de la empresa que compre sus equipos, sin embargo, dado que estas por lo general no tienen sedes en Colombia, será necesario buscar cuales de sus distribuidores autorizados ofrecen estos servicios en el país. Es realmente importante contar con personal al interior de la empresa, que sea capaz de solucionar los problemas básicos de *networking* y que conozca la filosofía de funcionamiento de los equipos inalámbricos, para así poder tener un primer nivel de soporte inmediato ante cualquier eventualidad, y solo llamar al distribuidor en situaciones que realmente lo ameriten.

4.7.4. Instalación.

A continuación se presentan algunas recomendaciones a ser tenidas en cuenta al momento de realizar la instalación de los CPE's y las BS's.

- **Línea de Vista.** Este es uno de los factores críticos para el funcionamiento de la red. Este ítem debe ser tenido en cuenta tanto en la BS como en los CPE's, es necesario que por una parte la altura de la estación base sea suficiente como para que las señales de radiofrecuencia no encuentren obstrucción inmediata y puedan propagarse de manera uniforme y por otra, que los CPE instalados en las casas de los clientes vean lo más claramente posible a la BS. Aunque WiMAX es una tecnología NLOS (sin línea de vista) gracias a la modulación OFDM y a los sistemas de antenas inteligentes, es mejor tratar de hacer una instalación con una línea de vista lo más limpia posible. Esto se debe especialmente a que en Colombia la gran mayoría de las construcciones están hechas en concreto, granito y hormigón a diferencia de Estados Unidos o Europa donde la madera es el material preferido para la construcción de casas. Por lo tanto, existe una gran diferencia entre el rendimiento de una BS's WiMAX instalada en Estados Unidos y otra instalada en Colombia, pues el material de los edificios presentará un nivel de atenuación adicional. En este sentido, se recomienda instalar CPEs *outdoor* en las premisas de los clientes, puede ser en el techo de las casas o en las azoteas de los edificios.
- **Utilizar Cable de red blindado.** Luego de haber realizado la instalación en el techo o azotea de la casa del usuario, será necesario bajar la señal de datos del CPE al computador o *switch* de la red interna del cliente. Para esto, los equipos inalámbricos

vienen equipados con puertos *ethernet* de diferentes velocidades pero el más común es el 10/100 *Fast Ethernet* cuyo estándar ofrece una velocidad y distancia máxima de 100 Mbps y 100 metros respectivamente. El tipo de cable más utilizado para realizar esta instalación es el denominado CAT5, el cual viene a su vez en diferentes versiones, pero en estas instalaciones se recomienda utilizar cable blindado para exteriores, se debe recordar que el cable estará expuesto a los efectos corrosivos de la intemperie y que los daños asociados a este son la primera causa de fallas de una red.

- **Protección contra subidas de tensión y tierras.** Dado que la antena del cliente va a estar instalada en ambientes exteriores, será necesario instalar también lo que se conoce como *lighting arrester*, para proteger la red interna del cliente. Esta protección es necesaria ya que la antena y el cable de red se convertirían en la primer vía de descarga para la corriente producida por un eventual impacto de rayo. Como se aprecia en la Figura 4-9, este dispositivo va ubicado entre los equipos del cliente y la antena que brinda el servicio. Otro aspecto que debe ser tenido en cuenta es asegurar que en la edificación haya un buen sistema de tierras puesto que de él dependerá el buen funcionamiento del supresor de picos y la seguridad de la red interna. Para esto se recomienda consultar a profesionales en realización de tierras, para asegurar que tanto las tomas internas de corriente como la antena estén bien aterrizadas, esto es más recomendable para instalaciones en edificios de oficinas o en empresas que tengan equipos de gran importancia en su red interna.

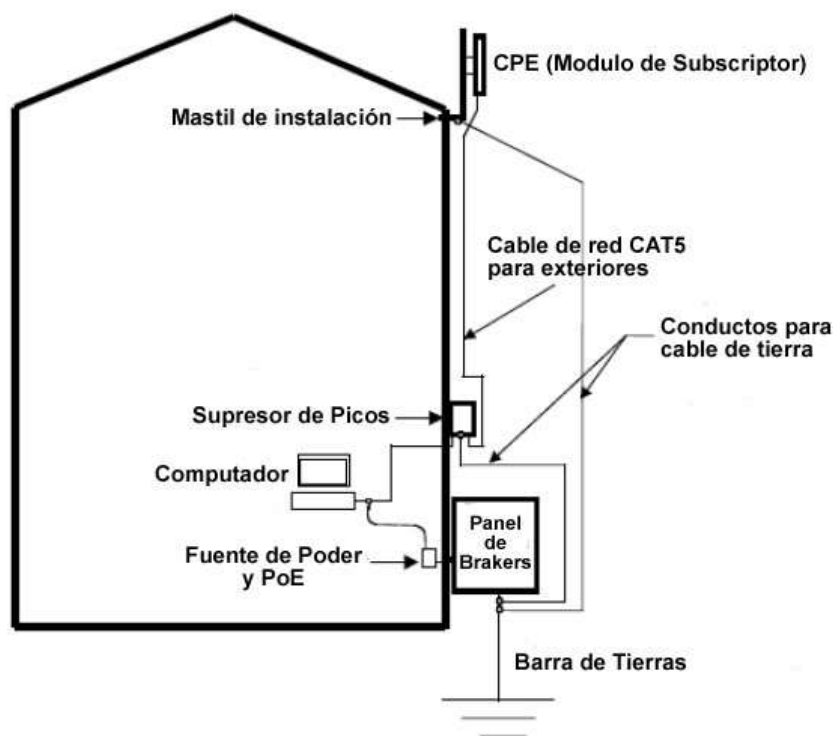


Figura 4-9. Diagrama típico de instalación de un CPE WiMAX *outdoor*.

- Alimentación del CPE.** Dado que este dispositivo es un elemento activo, debe tener una fuente de poder que suministre el voltaje adecuado para su funcionamiento. El problema de esto, es que al tener una instalación *outdoor* en un techo o azotea será difícil encontrar un toma de corriente para realizar esta conexión, además, no es recomendable que esté a la intemperie porque podría presentarse un corto circuito. Por esto, se recomienda la utilización de adaptadores de energía sobre cable *Ethernet* (PoE, *Power Over Ethernet*), que inyectan la señal eléctrica por el mismo cable CAT5 utilizado para los datos, haciendo uso de los dos pares que no son utilizados para envío y recepción de información. La mayoría de sistemas inalámbricos de banda ancha vienen con sus propios adaptadores PoE con el voltaje preciso para alimentar estas unidades, de no ser así, en el mercado es fácil conseguir estos adaptadores para diferentes niveles de voltaje.

4.7.5. Operación de la red.

La red es monitoreada durante esta fase para detectar cualquier problema de desempeño y fallas para proporcionar los datos de entrada a la fase de optimización. Es realmente importante estar atento a cualquier falla que pudiera presentarse en los primeros meses de vida de la red, para efectuar los correctivos necesarios antes de realizar cualquier expansión o incrementar la base de usuarios. En este sentido es realmente útil realizar una instalación temporal para propósitos de prueba con el ánimo de evaluar el desempeño y en consonancia con los resultados obtenidos, verificar si es necesario llevar a cabo ajustes en el diseño para cumplir con las metas propuestas. Algunos problemas típicos de equipos inalámbricos se presentan a continuación con la solución recomendada.

- **Bajo nivel de potencia de señal en todas las estaciones base en ambas direcciones y en todos los CPE.** Causas más comunes:
 - CPE defectuoso.
 - Medidas mal tomadas.
 - Equipo de monitoreo defectuoso.
 - **Solución.** Evaluar el buen funcionamiento de los equipos de monitoreo y los procedimientos. Realice las pruebas en un ambiente controlado para asegurar la precisión de las medidas, una vez las pruebas muestren resultados congruentes, lleve a cabo nuevamente las pruebas.

- **Bajo nivel de potencia de señal en todas las estaciones base en todos los emplazamientos.** Causas más comunes:
 - Dispositivo cliente defectuoso.
 - Baja potencia en el dispositivo cliente no proporciona un balance adecuado en el enlace.
 - **Solución.** Reubicar los CPE y realizar nuevamente las pruebas. Si el problema persiste utilice un CPE de mejor calidad.

- **Bajo nivel de potencia de señal en una sola estación base en ambas direcciones en todos los clientes.** Causas más comunes:
 - Fallas en el sistema de antenas.

- Antena defectuosa.
 - Antena mal direccionada.
 - Inclinación insuficiente de la antena (*downtilt*).
 - Conectores o línea de transmisión defectuosa.
 - Humedad en los conectores debido a un incorrecto sellado.
 - **Solución.** Inspeccionar la línea de transmisión y el sistema de antena de la estación base afectada. Asegúrese de que el haz principal de la antena está apuntado correctamente y que su inclinación es adecuada para el área de cobertura, por lo general se recomienda utilizar un *downtilt* de 25° o superior en antenas sectoriales, sin embargo, esto dependerá del área a cubrir. Reemplace la antena y la línea de transmisión con substitutos que se sabe funcionan bien.
- **Bajo nivel de potencia de señal solo en la dirección de la estación base en todos los clientes.** Causas más comunes:
 - Receptor de la estación base defectuoso.
 - **Solución.** Reemplazar la estación base.
- **Bajo nivel de potencia de señal en una sola estación base solo en la dirección de los clientes.** Causas más comunes:
 - Transmisor de la estación base defectuoso.
 - **Solución.** Reemplazar la estación base.
- **Bajo nivel de potencia de señal en ambas direcciones en ciertos emplazamientos pero bien en otros.** Causas más comunes:
 - Atenuación en el trayecto más grande de lo esperado, en los emplazamientos afectados.
 - **Solución.** Reubicar la estación base o los CPE a una ubicación que tenga mejor cobertura en el área afectada. Adicione más estaciones base en el área con problemas.

4.7.6. Optimización.

La fase de optimización está basada en una administración proactiva de la red la cual identifica y resuelve problemas antes de que se presenten alteraciones en el funcionamiento. La fase de optimización puede llevar a un rediseño de la red si se presentan demasiados problemas debido a errores de diseño o si el desempeño de la red se degrada con el tiempo. En este sentido es importante utilizar la información recolectada durante las primeras pruebas de funcionamiento para efectuar las correcciones y mejoras necesarias.

5. ESTRATEGIAS PARA EL ÉXITO DE IMPLEMENTACIÓN DE REDES INALÁMBRICAS DE BANDA ANCHA EN COLOMBIA

Este capítulo da una visión general de las diferentes estrategias o métodos que pueden utilizarse para lograr que las tecnologías inalámbricas se conviertan en instrumentos eficientes en la masificación de la banda ancha y de los servicios asociados a ésta. Dichas estrategias se han tomado desde el punto de vista de los principales actores dentro de la cadena de valor de las redes inalámbricas para dar una visión más organizada de las ideas que se quieren plantear, y así mismo, ofrecer una revisión concisa de los servicios inalámbricos ofrecidos en Colombia y dar cumplimiento al tercer objetivo específico del proyecto de grado que hace referencia a *Proyectar la escala de penetración e implementación de estas tecnologías en el entorno Colombiano para la implementación de WISP's*.

5.1. SERVICIOS INALÁMBRICOS EN COLOMBIA

Hasta hace tan solo 15 años, el uso de las telecomunicaciones inalámbricas en Colombia era algo casi inexistente o reservado en forma limitada a grandes empresas u operadores en el país. Con el desarrollo vertiginoso del sector, estas tecnologías han venido evolucionando en forma significativa, representando actualmente una de las tendencias más marcadas en el ámbito nacional e internacional. El desarrollo de las redes inalámbricas de telecomunicaciones se enfocó en dos grandes segmentos: *servicios de voz y servicios de datos* [32].

En el caso de la voz inalámbrica, durante la primera mitad de la década de los 90s, fueron estructuradas las condiciones normativas y técnicas que permitieron la existencia de oferta de telefonía móvil celular a partir del año 1994. En paralelo a lo anterior, los operadores de telefonía fija encontraron en las tecnologías inalámbricas una alternativa para ampliar su cobertura en corto tiempo y a costos comparables a las líneas tradicionales de cobre. En cuanto a los servicios de datos inalámbricos, los mismos

fueron utilizados inicialmente por empresas del sector financiero, así como por operadores que construyeron y/o utilizaron canales de microondas, desarrollando de esta forma redes de cubrimiento local y nacional. Así mismo, algunos desarrollos no estandarizados permitieron tener en el mercado las primeras aproximaciones a redes inalámbricas de área local. Durante la coyuntura anteriormente expuesta, las redes destinadas para servicios de voz y de datos fueron claramente diferenciables. Posteriormente, al realizar los operadores de telefonía móvil su transición hacia tecnologías digitales, se tuvo disponible una primera aproximación a la transmisión de datos a través de sus redes, que aunque en principio poseía un ancho de banda limitado, ha venido incrementándose en la medida en que las redes han evolucionado tecnológicamente.

Por otro lado, uno de los hechos más destacables consistió en la estandarización durante los últimos años del protocolo IEEE 802.11, destinado a la comunicación punto - multipunto dentro de redes de área local, así como de otras iniciativas orientadas al intercambio de información entre dispositivos dentro de una red personal. Con base en lo anterior, el contexto actual del desarrollo de tecnologías inalámbricas en Colombia se resume en servicios móviles con ancho de banda limitado disponible, y redes de datos con alta velocidad de acceso, pero con cobertura limitada [33].

De acuerdo con las tendencias previsibles, los operadores de telefonía móvil migrarían hacia 3ª generación, y más adelante incluso hacia la denominada 4ª generación. Así mismo, en cuanto a los servicios de datos, el Gobierno Nacional adjudicó en el año 2005 licencias nacionales para el uso de la tecnología WiMAX, mientras que en diciembre de 2006 adjudicó licencias regionales, según se comentó en la sección 3.2.2. Estas acciones permitirán el uso de un mayor ancho de banda inalámbrico, y al mismo tiempo ampliar las áreas de cobertura.

El desarrollo del mercado antes descrito, da a entender de manera preliminar que aquella visión de contar con todos los servicios de telecomunicaciones disponibles en cualquier sitio para el usuario no es lejana a la situación actual. En efecto, a través de los terminales móviles, cuya penetración es cercana al 70% en Colombia, hoy es posible, además de comunicarse con cualquier suscriptor fijo o móvil en cualquier parte del mundo, conectarse con Internet para realizar diferentes tipos de consultas y transacciones [34]. De igual manera, a través de la cada vez mayor presencia de puntos de conexión

inalámbricos públicos y privados, o *hotspots* WiFi, se hace viable tener comunicaciones de voz a través de plataformas tecnológicas que permiten la comunicación con cualquier parte del mundo.

Aunque el panorama expuesto es favorable, no significa esto que Colombia se encuentre en un nivel avanzado en telecomunicaciones inalámbricas. Desde la perspectiva de la telefonía móvil, aunque la penetración es buena, existen a la fecha municipios de la geografía nacional que todavía no cuentan con acceso a este servicio. Así las cosas, y según el estudio de servicio universal realizado por Regulatel y expuesto en la Figura 5-1[34], es clara la necesidad para los operadores de crecer en cobertura, como también en la modernización de sus redes para la oferta de nuevos servicios en forma eficiente.

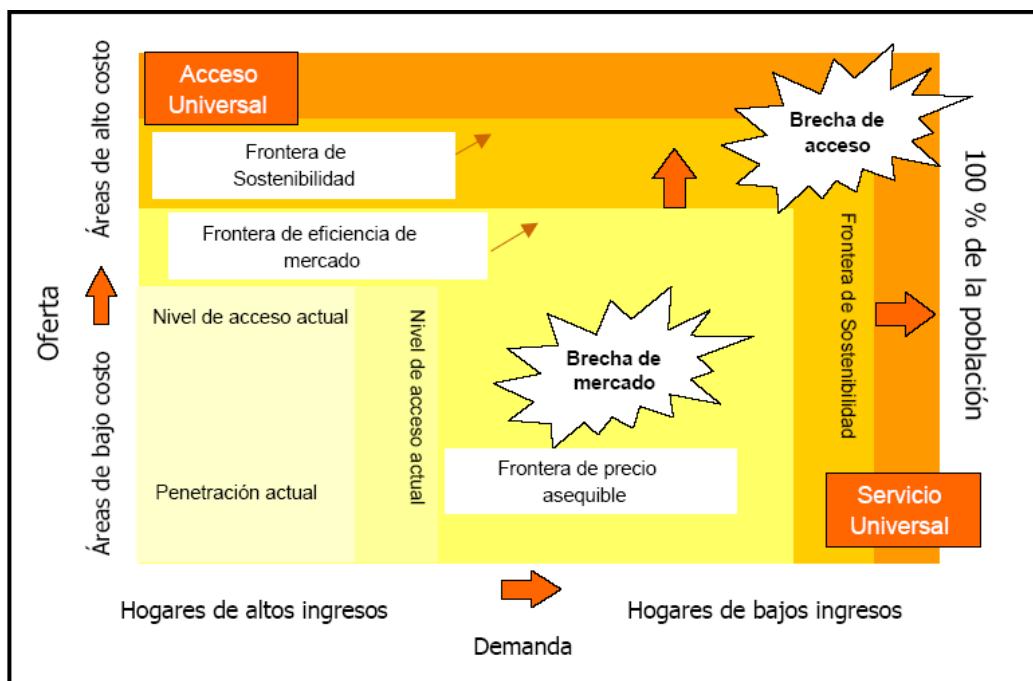


Figura 5-1. Modelo de brechas a ser cubiertas en Latinoamérica.

En este modelo conceptual, desarrollado en forma particular para América Latina, se observa que a pesar de existir un nivel de acceso y una cobertura de los servicios de telecomunicaciones, persisten brechas de mercado y de acceso que son susceptibles de ser subsanadas, en la medida en que los precios se hagan más asequibles para los consumidores, así como también mediante programas, políticas e iniciativas que tiendan a promover el acceso en los sitios alejados del país. Al observar la realidad de Colombia en

el marco del esquema antes expuesto, es claro que la cobertura de servicios, y particularmente en lo referente a datos, es bastante limitada concentrándose en las principales ciudades del país, especialmente en Bogotá. Por lo anterior, se espera que a través de la asignación de las licencias regionales de WiMAX, se aumente la competencia en las principales ciudades del país, en las cuales actualmente se ofrecen accesos de banda ancha, y de otra parte, se expanda la operación hacia las ciudades intermedias y regiones apartadas del territorio nacional, brindando oportunidades de acceso a la sociedad de la información a la población que habita en ellas.

Finalmente, la tendencia hacia el crecimiento de las tecnologías móviles no necesariamente es opuesta al aprovechamiento de la infraestructura fija ya instalada. En tal sentido, se espera que ambas actúen en forma complementaria, ampliando y optimizando las opciones de acceso para los suscriptores, y diversificando el portafolio a ser ofrecido por parte de los operadores.

5.2. PROYECCIONES.

En esta sección se ha querido plasmar los resultados del estudio realizado sobre la penetración de la banda ancha en Colombia y de la participación de las tecnologías inalámbricas en su desarrollo. Como se ha mencionado anteriormente el gobierno colombiano, mediante sus diversas políticas y lineamientos esta firmemente decidido en promover la masificación de los accesos de banda ancha y ha visto en tecnologías como WiFi y WiMAX, verdaderos catalizadores para acelerar este proceso y cubrir brechas y escenarios que las soluciones cableadas no pueden llenar. En la Figura 5-2, se pueden apreciar las proyecciones del mercado colombiano, las cuales fueron realizadas tomando como base información de la CRT [21] [32] [34] [35], *Pyramid Research* [33] [36] y el Barómetro de Cisco [37] para la penetración de la banda ancha en Colombia, así como estimados de las diferentes empresas proveedoras de servicios de banda ancha cableada e inalámbrica [38] [39] [40] [41]. La meta del gobierno colombiano es tener 3'500.000 conexiones de banda ancha en el año 2010, con lo cual se logrará una penetración aproximada del 8%, y dentro de este porcentaje la banda ancha inalámbrica cumple un papel fundamental, teniendo en cuenta las condiciones de inversión y educación acerca de estas tecnologías.

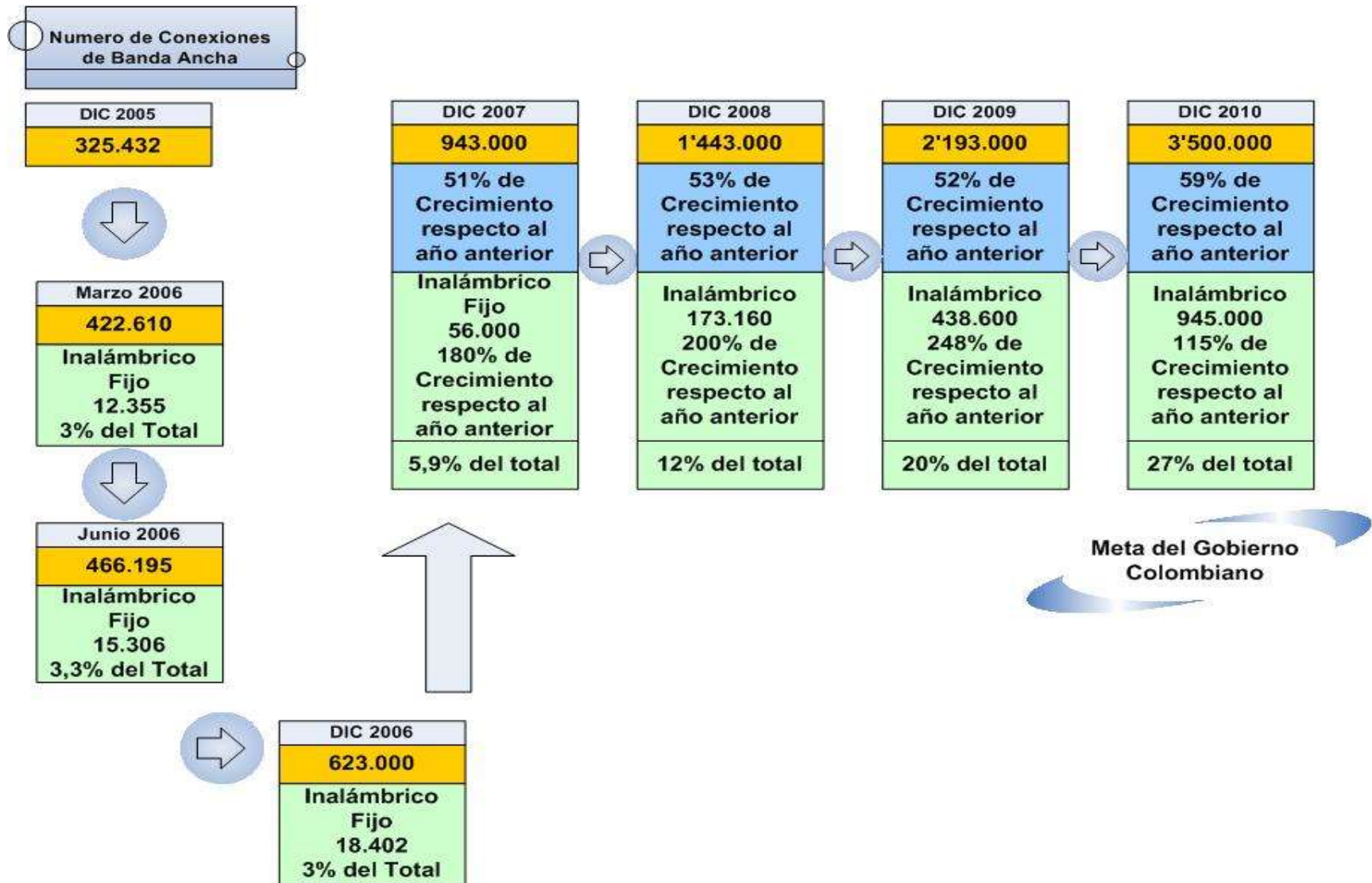


Figura 5-2. Proyecciones de penetración de Banda ancha y Accesos Inalámbricos.

Actualmente existen aproximadamente 623.000 conexiones de banda ancha, de las cuales 18.402 son inalámbricas representando un incipiente 3%. Esto se debe a que en Colombia apenas se está iniciando con la introducción de estas tecnologías y a la fecha UNE-Orbitel es la única empresa que ofrece servicios WiMAX, el resto de accesos son *hotspot* WiFi y redes pre-WiMAX. Sin embargo, esta situación empezará a cambiar radicalmente a partir del año 2008 cuando ya se empiecen los procesos de implementación de las licencias WiMAX departamentales, y comience realmente el proceso de masificación de la banda ancha inalámbrica, logrando un pico de crecimiento en el año 2009 cuando se espera que estas tecnologías ya estén totalmente instaladas y puedan ofrecer servicios de valor agregado (VAS, *Value Added Services*) a los usuarios. La prestación de VAS es sin duda alguna el factor clave para lograr atraer a un gran número de usuarios, ofreciéndoles no solo acceso a Internet de alta velocidad sino también servicios de telefonía IP, IPTV, aplicaciones de comercio en línea y demás aplicaciones multimedia que estas redes estarían en capaz de desplegar.

5.3. ESTRATEGIAS DE ÉXITO

Las estrategias para el éxito de implementación de redes inalámbricas de banda ancha sobre redes WiFi y WiMAX que a continuación se sugieren, están abordadas desde el enfoque tecno-económico, y tienen como pilar de fundamento la continua evolución que ha vivido la industria de las telecomunicaciones, y las experiencias que se han vivido en otros países en los cuales ya se han implementado este tipo de redes, dando como resultado una síntesis que será de gran ayuda para cualquiera que desee implementar un WISP en Colombia. Teniendo en cuenta que la cadena de valor de las redes inalámbricas de banda ancha está conformada por muchas entidades y empresas que desempeñan diferentes roles, las estrategias serán descritas desde el punto de vista de cada uno de los actores, esto con el fin de lograr un mejor entendimiento y una mejor estructuración para los conceptos generados.

5.3.1. Proveedores de Servicio.

Los llamados proveedores de servicio están conformados por diferentes tipos de empresas, entre las que se tienen las compañías de telecomunicaciones tradicionales, *carriers*¹⁴, ISP's, operadores de cable, proveedores de telefonía móvil celular y empresas inalámbricas. Para tener un mejor entendimiento de las características de los actores dentro de este grupo que podrían estar interesados en la utilización de WiFi o WiMAX como soluciones de acceso, se hará una breve descripción de las funciones que realizan:

- **Proveedores de Telefonía Convencional.** Son *carriers* de telecomunicaciones que poseen su propia red de telefonía de cobre convencional dentro de un área geográfica específica. Ofrecen servicio local de telefonía, de larga distancia, llamadas internacionales, acceso a Internet y servicios de banda ancha.
- **Carriers.** Son empresas transportadoras de datos, que por lo general tienen como área de acción todo un país
- **Carriers inalámbricos.** También llamados proveedores de telefonía móvil celular, además de telefonía gracias a las nuevas tecnologías de tercera generación, pueden prestar servicios de acceso a Internet de alta velocidad utilizando la misma infraestructura de telefonía móvil.
- **Proveedores del Servicio de Internet – ISP.** Los ISP's son operadores de red independientes, involucrados en todos los servicios concernientes a Internet. A su vez, también ofrecen servicios de banda ancha, con su propia infraestructura o arrendando bucles de abonado, para ofrecer por ejemplo, DSL a sus usuarios. También pueden ofrecer servicios de telefonía IP a través de la misma infraestructura.
- **Proveedores de Cable.** Son aquellas que ofrecen servicios de banda ancha sobre redes de cable coaxial. Sus principales usuarios son residenciales, a los cuales ofrecen servicios empaquetados de Internet y televisión por el mismo cable.

¹⁴ Operadores de telecomunicaciones que son propietarios de las redes troncales de Internet y responsables del transporte de los datos. Proporcionan una conexión a Internet de alto nivel.

- **Formula para los proveedores de servicio.**

- **Nuevas empresas.** Para aquellas empresas que quieren entrar al mercado, es necesario que sus productos y servicios tengan algún grado de innovación. Es fundamental poder distinguirse en un mercado lleno de opciones y de grandes participantes, como en el de las telecomunicaciones, no necesariamente se trata de entrar con la última tecnología, si no, buscar el mercado adecuado para empezar y ganar credibilidad mediante un buen servicio al cliente, aspecto que muchas veces es descuidado por los operadores antiguos. Por ejemplo, la creación de WISP's en zonas donde no hay ningún otro servicio puede ser un excelente comienzo para posteriormente entrar en un mercado más grande. En Colombia abundan poblaciones que no tienen ningún tipo de oferta de Internet banda ancha, especialmente ciudades medianas y pequeñas que serian un buen punto de partida para un WISP.
- **Operadores ya establecidos.** Estas empresas enfrentan un reto aún mayor, pues su futuro depende en la habilidad de producir continuamente innovaciones que sean apreciadas por sus clientes. En ninguna otra industria como en la de las telecomunicaciones, sostener una trayectoria de innovaciones es crítica, no solo para tener éxito, si no, para sobrevivir. Es un hecho que en la actualidad, un crecimiento sostenible y rentable, depende del descubrimiento y explotación de innovaciones disruptivas, así, la eterna pelea entre la rentabilidad del presente y el crecimiento futuro, puede mirarse como la tensión entre innovaciones conceptuales y disruptivas.
- **Carriers.** El gran incremento en la demanda de soluciones de datos, acceso a Internet, *e-commerce*, tele trabajo y aplicaciones multimedia, están exigiendo cada vez mayor capacidad de las redes de telecomunicaciones. Hasta el momento, los *carriers* han preferido utilizar soluciones cableadas para ofrecer los servicios de banda ancha, generalmente basadas en tecnologías como DSL (*Digital Subscriber Line*), Fibra y RDSI (Red Digital de Servicios Integrados). Como se ha mencionado anteriormente la expansión de este tipo de redes se hace difícil y costosa, por el hecho de tener que invertir en apertura de calles para los tendidos de fibra, y en limitantes de distancia y calidad del cobre que tiene DSL. En este sentido, tecnologías inalámbricas de banda ancha como WiFi y WiMAX representan una gran oportunidad en términos de bajos costos de instalación y eficiencia del servicio.

WiMAX es una gran oportunidad para aquellos operadores que quieren ingresar en el mercado inalámbrico de banda ancha y amplia cobertura, sin la necesidad de invertir en telefonía celular, o como complemento para extender el alcance de su red cableada.

Un aspecto importante a tener en cuenta en un mercado tan competitivo, es la necesidad de ofrecer nuevos servicios que hagan la diferencia de los tradicionales servicios de voz basados en conmutación de circuitos; estos son algunos de los requerimientos de los usuarios actuales:

- Alta disponibilidad de servicios de datos.
- Conservación de los servicios tradicionales de voz.
- Interoperabilidad entre los nuevos y viejos servicios.
- Precios bajos por Mbps y datos transportados.
- Contratos de nivel de servicios específicos y robustos, por los cuales estarían dispuestos a pagar más.
- Capacidad de ajustar los términos del SLA (*Service Level Agreement*) en cuanto a ancho de banda y calidad de servicio a sus necesidades específicas.

Dado que el factor económico es decisivo en la implementación de una red, un operador que decida utilizar tecnologías como WiFi y WiMAX verá reflejados los beneficios en las siguientes áreas:

- Reducción de gastos de capital; a medida que se masifiquen las tecnologías los precios de los CPE bajaran en gran medida.
- Reducción de gastos operativos, sin duda alguna el mantenimiento e instalación es mucho menor que una red cableada.
- Diferenciación del servicio, debido a que los servicios de banda ancha fijos no ofrecen movilidad, los operadores serán capaces de ofrecer, por ejemplo, VoIP junto con datos sobre estas redes.

Otro aspecto importante, es que tanto WiFi como WiMAX pueden ayudar a romper el monopolio del bucle de abonado por los operadores ya establecidos, evitando así la dependencia de su infraestructura y costos de alquiler, produciendo las siguientes mejoras

para aquellos que quieran incursionar en tecnologías inalámbricas como alternativas para la prestación de servicios:

- Periodos de instalación e implementación más cortos
- Capacidad de rápidas actualizaciones
- Plataforma para migración a servicios IP
- Solución para la convergencia de servicios de voz y datos
- Precios competitivos

5.3.2. Servicios de Valor Agregado – La clave para la supervivencia.

Aunque es cierto que los servicios tradicionales de voz todavía conservan una parte importante del mercado, las ganancias producidas por estos servicios se han visto disminuidas debido a la cada vez mayor competencia derivada de los procesos de desagregación y a la introducción de tecnologías inalámbricas confiables y de bajo costo. Es así que, con la infraestructura de red de nueva generación y la creciente demanda por accesos de alta velocidad, el desafío de la banda ancha es ofrecer servicios de valor agregado que impulsen el desarrollo de las tecnologías actuales y emergentes de banda ancha, bien sea a través de xDSL, fibra óptica, WiMAX o incluso WiFi. Los Servicios de Valor Agregado, como su nombre lo indica, añaden valor a los servicios tradicionales ya existentes y debido a su particularidad se relacionan con otros servicios de manera completamente diferente. Las características fundamentales de un VAS son:

- No son un servicio básico, pero añaden valor a la oferta total de servicio
- Funciona por si solo en términos de rentabilidad, y/o estimula la demanda de los servicios básicos
- En algunas ocasiones puede operar por si solo
- No utiliza un servicio básico en su provecho a menos que sea claramente favorable
- Puede adicionarse a un servicio básico, y como tal ser vendido como un servicio preferencial
- Puede proveer interacción operativa o administrativa entre otros servicios

Cada VAS debe demostrar una o más de las características anteriores para ser catalogado como tal y no debe estar en contraste con ninguna de ellas. Otro aspecto importante, es que los servicios de valor agregado poseen una dimensión temporal asociada a ellos, subjetivamente hablando, un VAS hoy puede llegar a ser un servicio básico cuando su demanda y despliegue sea tan amplio que no produzca una diferenciación marcada sobre los demás servicios; actualmente existe una gran variedad de VAS que pueden ofrecerse, en la Figura 5-3 [42] se muestra un ejemplo de estos.

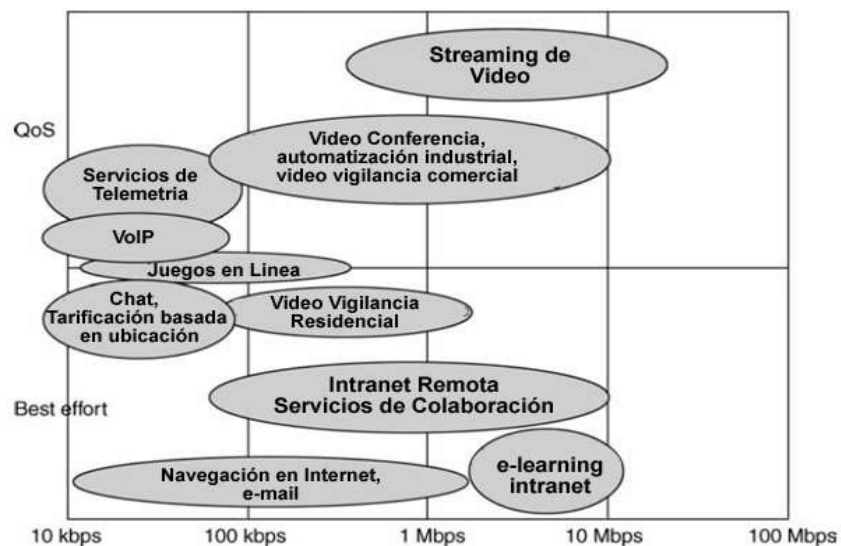


Figura 5-3. Ejemplos de VAS.

En este sentido los operadores de servicios tradicionales, deben moverse rápidamente hacia la provisión de servicios por demanda (*on-demand*) y prepagados (*pay-per-use*) que atraigan nuevos clientes, favorezcan la expansión del mercado, y más importante aún, abran nuevos flujos de ingresos desde los usuarios actuales, manteniendo bajos los costos de inversión para el operador. Los llamados servicios preferenciales también serán de gran importancia para atraer clientes, un ejemplo de estos son:

- Servicios *premium* para el mercado de consumo masivo, como Internet de súper alta velocidad, juegos en línea, *streaming* de audio, entre otros.
- Servicios para usuarios corporativos como video en demanda VoD, VoIP, voz sobre IP inalámbrica (VoWi) y conectividad IP para PBX.

▪ **Recomendaciones**

- Esta claro que basarse en una solución que satisfaga todas las medidas, tamaños del mercado y demanda de los servicios de banda ancha de nueva generación y además, soportar la tecnología que sirva para este propósito, no es económicamente factible. Para darse cuenta del potencial de estos nuevos servicios de banda ancha, los proveedores necesitan evolucionar hacia una estrategia de aprovisionamiento más dinámica, que les permita tomar ventaja tanto de las redes actuales como de las tecnologías de red emergentes que pueda acelerar la salida al mercado de servicios de valor agregado y que pueda adaptarse a los frecuentes cambios de requerimientos de nivel de servicio. WiMAX gracias a su protocolo de asignación de niveles de servicio *request/grant* y a sus mecanismos de control de ancho de banda y calidad del enlace, puede ser la plataforma perfecta para los proveedores que deseen ofrecer servicios de nueva generación, y WiFi puede ser su complemento ideal cuando se requieran soluciones de último kilómetro flexibles y de bajo costo.
- Para los nuevos operadores, WiMAX es una tecnología que puede diferenciarlos en el mercado, por lo cual es recomendable que traten de adoptarla y asimilarla cuanto antes.
- Para los operadores ya establecidos, es recomendable que evalúen tanto la infraestructura existente como los servicios que ofrecen, para adoptar WiMAX dentro de su estrategia de aprovisionamiento, para fortalecer su portafolio y generar nuevos flujos de ingresos.

5.3.3. Estrategia de Éxito: Gobierno y Entidades Reguladoras.

El Gobierno y las entidades reguladoras deben dar una alta prioridad a las políticas de masificación de Internet y en especial al acceso de banda ancha al mayor número de poblaciones posibles, para que éstas puedan disfrutar y obtener el mejor provecho de todos los servicios y oportunidades que se pueden generar a través de ella. A pesar de la poca penetración de la banda ancha en Colombia, las tecnologías inalámbricas tienen un gran potencial de crecimiento y pueden convertirse en un factor fundamental en el desarrollo de estos nuevos mercados.

Teniendo en cuenta todo esto, es necesario que las autoridades demuestren un compromiso fuerte para facilitar la inversión e implementaciones con estas tecnologías, especialmente siendo un poco más flexibles en la asignación del espectro para que haya más entidades que puedan ofrecer el acceso inalámbrico de Internet banda ancha al público. Por su parte, las entidades reguladoras deben tratar de alcanzar tres objetivos principales incrementar la disponibilidad del espectro radioeléctrico que puede ser utilizado para la provisión de servicios de banda ancha, permitir la máxima flexibilidad técnica para empresas que busquen ofrecer estos servicios, y facilitar el desarrollo de infraestructura inalámbrica de banda ancha proporcionando mayor certidumbre a nivel regulatorio y removiendo aquellos aranceles que desmotivan la inversión.

- **El Gobierno puede producir un impacto positivo.** Las tecnologías de acceso inalámbrico de banda ancha y sus aplicaciones están aún en sus primeras etapas de desarrollo, pero su potencial económico y los beneficios sociales a futuro se vislumbran de gran magnitud. Estas iniciativas pueden verse como disruptivas y muchas veces pueden ir en contra de conceptos ya establecidos y regulaciones antiguas, lo cual puede generar una falta de entendimiento de su verdadero potencial, pero con un soporte e incentivos apropiados por parte del gobierno, se puede acelerar su implementación exitosa a bajo costo, generando beneficios significativos para las comunidades y la población en general. Cada país presenta características y condiciones únicas respecto a estas implementaciones, las cuales pueden ser geográficas, sociales, económicas y regulatorias, sin embargo, existen varios factores que las autoridades competentes deben tener presentes cuando definen sus políticas y lineamientos. A continuación se discutirán algunos de los aspectos claves que tienen una incidencia directa en el éxito de estas tecnologías, así como en el balance económico que las rodea.

- **Promover la demanda de servicios de banda ancha.** Uno de los factores más importantes en el éxito de un WISP, es la demanda inicial de conexiones, lo cual permitirá una recuperación rápida de los gastos operativos. Esto puede lograrse capturando clientes del sector público, como por ejemplo escuelas, universidades, clínicas, hospitales y oficinas gubernamentales, los clientes corporativos del sector agrícola y privados, inevitablemente se interesarán por el servicio una vez este listo.

- **Promover las tecnologías.** Identificar, promover y establecer acuerdos generales sobre el potencial de las tecnologías inalámbricas en las comunidades. El éxito de cualquier iniciativa tecnológica pública, depende en gran medida del soporte general del ambiente que la rodea; para que estas condiciones se den, es necesario que los sectores públicos y privados, así como los medios de comunicación estén al tanto y tengan conocimiento preciso acerca de los beneficios y aspectos relevantes de la tecnología en cuestión. Identificar las aplicaciones principales, que lideraran o incentivarán el uso inicial del acceso inalámbrico a Internet banda ancha, es de gran importancia para capturar una buena cantidad de clientes iniciales y fomentar la utilización de estos servicios.

- **Crear un ambiente de colaboración.** Es un hecho que las tecnologías inalámbricas y sus aplicaciones continuarán evolucionando rápidamente, por lo cual es importante tanto para el gobierno como sectores privados que estén al tanto y aprendan de las experiencias de otros países a nivel regulatorio, y de mejores prácticas de ingeniería e innovaciones. El gobierno colombiano debe promover la divulgación del conocimiento tecnológico entre todas las entidades relacionadas con este tema; esto puede ser muy productivo, especialmente en el área de la educación en línea, aplicaciones del sector salud y gubernamentales que hagan uso de las tecnologías de información para su mejora y perfeccionamiento. Algunas de las entidades (personas o empresas) que pueden estar interesados en fomentar la cooperación son:
 - Operadores y propietarios de redes de fibra óptica incluidos el gobierno, redes privadas y compañías de telecomunicaciones.
 - Integradores de sistemas con las capacidades técnicas para instalar y mantener equipos inalámbricos como torres, cableado, antenas, módems inalámbricos, sistemas de control y gestión de red, enrutadores, cables, *racks*, etc.
 - Sector financiero y empresas interesadas en empezar en el negocio de WISP.

Tabla 5-1. Recomendaciones Gobierno y Entes Reguladores.

<p>Objetivos Generales Entidades Reguladoras</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tener un fuerte compromiso para facilitar la inversión e implementaciones con estas tecnologías, especialmente siendo un poco más flexibles en la asignación del espectro para que haya más empresas que puedan ofrecer el acceso inalámbrico a Internet banda ancha al público ➤ Incrementar la disponibilidad del espectro radioeléctrico que puede ser utilizado para la provisión de servicios de banda ancha. ➤ Permitir la máxima flexibilidad técnica para empresas que busquen ofrecer estos servicios ➤ Facilitar el desarrollo de infraestructura inalámbrica de banda ancha proporcionando mayor certidumbre a nivel regulatorio y removiendo aquellos aranceles que desmotivan la inversión.
<p>Iniciativas</p>	
<p>Reducir antiguos métodos de regulación</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Las entidades reguladoras deben adoptar políticas que establezcan un modelo des-regulatorio o de desagregación para las redes inalámbricas de banda ancha que sigan estos principios fundamentales: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Minimizar las barreras regulatorias a nivel gubernamental mediante la filosofía de la desregulación para incentivar el desarrollo de la banda ancha inalámbrica. Esto permitirá incentivar el mercado a que invierta en infraestructura y en rápidas innovaciones e implementaciones, en la medida de lo posible, se debe asegurar que todos los tipos de banda ancha inalámbrica (móvil, portable y fija) se regulen de la misma manera. ▪ Dada la rápida evolución y naturaleza innovadora de los servicios de banda ancha, por lo general los entes reguladores deben dejar que el mercado dirija el desarrollo de los servicios sobre las tecnologías inalámbricas en lugar de entorpecer su crecimiento con regulaciones innecesarias. ▪ Adoptar una filosofía proactiva en cuanto a competencia e innovación basada en el mercado. Igualmente importante, las entidades reguladoras no deben atentar influenciar los adelantos tecnológicos y cambios en las preferencias del usuario con sus reglas, en cambio deben permitir que el mercado determine el desarrollo y las implementaciones resultantes de los servicios de banda ancha. ▪ Crear condiciones para una economía competitiva. Los últimos 20 años han mostrado convincentemente el poder de los mercados para crear servicios y buenas rentas en la industria de las telecomunicaciones, por lo tanto es esencial que el mercado no sea ignorado.
<p>En las bandas sin licencia</p>	
<p>Promover la armonía y cooperación</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ El ente regulador puede adoptar políticas que fomenten significativamente el crecimiento en la provisión de servicios inalámbricos de banda ancha utilizando bandas sin licencia ➤ Es necesario promover servicios más innovadores en tales bandas de frecuencia, esto puede lograrse fijando reglas técnicas flexibles para la operación de los dispositivos que operen en estos rangos, así como otorgando espectro adicional para ofrecer mejores servicios.
<p>Dejar fluir el mercado</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ El continuo crecimiento en la utilización de dispositivos inalámbricos en bandas sin licencia, se debe a que las barreras de entrada al mercado son casi nulas.

Tabla 5-2. Recomendaciones Gobierno y Entes Reguladores.

En las bandas licenciadas	
Estimular esfuerzos voluntarios para la coordinación en la utilización del espectro.	<ul style="list-style-type: none"> ➤ A medida que el espectro de radio es utilizado más intensamente, la mitigación de la interferencia entre los diferentes usuarios de las bandas sin licencias es aspecto importante que debe ser tenido en cuenta por las entidades reguladoras. ➤ Por lo tanto, un gran beneficio de fomentar la coordinación será la posibilidad de que más operadores puedan compartir el espectro, permitiendo una mayor confiabilidad en la prestación de sus servicios.
Mejorar el acceso al espectro licenciado.	<ul style="list-style-type: none"> ➤ los entes reguladores deben explorar nuevos caminos para dinamizar el proceso de asignación del espectro radioeléctrico. ➤ uno de los puntos en contra es el tedioso y lento proceso para lograr la adjudicación de una porción de este tipo de bandas. ➤ Está claro que frente a los rápidos cambios de la tecnología y a la creciente demanda de nuevos servicios, el gobierno debe preocuparse por disminuir el tiempo que tarda el espectro en ser asignado para que pueda ser explotado adecuadamente a medida que el mercado lo exige. ➤ En casos en donde diferentes interesados no estén de acuerdo con la asignación de una porción del espectro a un determinado servicio, el ente regulador puede considerar resolver la disputa técnica mediante subastas, mediante licitaciones competitivas para determinar cuál es el plan más altamente valorado por los futuros concesionarios y entonces proceder a la asignación de esa porción del espectro basado en la mejor propuesta.
Incrementar la flexibilidad en la asignación	
Modelo de gestión dirigido por el mercado	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bajo este modelo de gestión, las empresas pueden implementar las tecnologías o servicios que mejor se adapten a sus planes de negocio y satisfagan las demandas de sus clientes, siempre y cuando cumplan con los requerimientos técnicos de la licencia y no ocasionen interferencia con bandas adyacentes.
Alternativas	<ul style="list-style-type: none"> ➤ el ente regulador puede considerar varios métodos de subastas basados en las fuerzas del mercado, que pueden ser utilizadas para proporcionar mayor elasticidad a las empresas interesadas. ➤ Emplear mecanismos por medio de los cuales las porciones del espectro previamente asignadas a concesionarios, se hagan disponibles mediante subastas a otros interesados, obviamente con diferentes derechos, y que puedan ser combinados con otras bandas incluyendo aquellas no asignadas. ➤ Proponer subastas en las cuales los concesionarios intercambien sus licencias por créditos y beneficios en cuanto a impuestos o regalías. ➤ Llevar a cabo una subasta que permita a los concesionarios participar no solo como compradores potenciales, sino también como vendedores de las licencias que actualmente poseen, guardándose el derecho de establecer el precio de reserva por debajo del cual no se realizara la venta.

CONCLUSIONES

Colombia es un país en el cual la industria de las telecomunicaciones ha tenido una gran evolución en los últimos años y el mercado de las redes inalámbricas de banda ancha promete ser una de las áreas de mayor dinamismo en la próxima década. En este sentido tanto WiMAX como WiFi pueden producir un impacto positivo en el objetivo de masificar los accesos a Internet banda ancha en el país.

Es claro que no hay una fórmula mágica que determine con precisión cual tecnología es la mejor para cada situación, existen un gran número de variables además de los aspectos técnicos que deben ser tenidos en cuenta en el momento de realizar la implementación de una red de este tipo. Se debería que tener en cuenta la situación económica de la empresa que desea ofrecer el servicio, de los usuarios a los que desea llegar, de la ciudad donde viven y hasta el ambiente político y cultural que los rodean, pues como tal una infraestructura de este tipo trasciende el aspecto tecnológico para convertirse en un fenómeno social con la capacidad de cambiar la forma y el nivel de vida de las personas, mediante los servicios que se pueden ofrecer a través de ella.

Si bien existen un gran número de combinaciones, formas y estilos en los que estas tecnologías pueden utilizarse, un correcto proceso de diseño y planeación puede llevar a encontrar la solución que mejor se adapte a las condiciones particulares de terreno y usuarios a las que se esté enfrentando. Por estas razones, en este trabajo se han querido generar un conjunto de criterios generales con el objetivo de conformar un proceso estructurado que facilite de algún modo la realización de dichas actividades por parte de cualquiera que desee implementar un WISP haciendo uso de estas tecnologías.

Desde el punto de vista las tecnologías se tienen las siguientes conclusiones:

- En los últimos años el estándar IEEE 802.16-2004 ha creado grandes expectativas en la industria de las telecomunicaciones y de las redes inalámbricas de banda

ancha, pues gracias a sus múltiples características se perfila como la tecnología de facto para las redes de área metropolitana. Sin embargo, las tan renombradas características de velocidades de 70 Mbps y celdas de más de diez kilómetros en ambientes sin línea de vista, con las que fue publicitada esta tecnología están lejos de ser realidad. De manera errónea algunas fuentes aseguran que todas estas características existen al mismo tiempo en un solo sistema, creando falsas expectativas al público, es posible que en condiciones ideales dichos niveles puedan alcanzarse individualmente, pero será necesario realizar una compensación entre la cobertura, capacidad y costos.

- Desde el punto de vista de capacidad sin duda alguna WiMAX ofrece un excelente soporte para servicios de datos y de VoIP, como se pudo ver en los cálculos la adición de tráfico de voz a la red de datos no produjo ningún incremento significativo en los requerimientos de infraestructura de estaciones base, lo cual está en consonancia con las expectativas que al respecto se tenían con esta tecnología.
- Por su parte, WiFi es una tecnología que aún sigue vigente y ha demostrado que su flexibilidad, bajos costos y buen rendimiento hacen que sean la escogencia predilecta para redes de área local inalámbrica, y un complemento perfecto para una red metropolitana basada en WiMAX. Las aplicaciones que cubre esta tecnología son innumerables se puede utilizar para ampliar la cobertura de una red cableada, para un *hotspot* en un establecimiento, empresa o simplemente para la red interna de una residencia.

En cuanto a cobertura y capacidad se obtuvieron los siguientes resultados:

- El tamaño del canal influye en gran medida en la cobertura del sistema. WiMAX define para la banda de 3.5 GHz canales de 3.5 MHz y de 7 MHz tanto para sistemas FDD como TDD, y en la banda de 5.8 GHz canales de 10 MHz. Entre mayor sea el tamaño del canal menor será la distancia de cobertura pero mayor será la velocidad. Esto se debe a que a medida que aumenta la distancia es más difícil transmitir si el ancho de banda del canal es muy amplio, pues se necesita mayor potencia. De los resultados obtenidos en el Anexo B, podemos ver que para la ciudad de Cali en la banda de 3.5 GHz y haciendo uso de CPE's *outdoor*, se tiene

que para un tamaño de canal de 7 MHz se requieren 10 BS mientras que con canales de 3.5 MHz se necesitan 7 BS. Esto se debe a que el radio de cobertura con canales de 3.5 MHz es de 2.493 Km mientras que con canales de 7 MHz es de 2.025 Km.

- Desde el punto de vista de cobertura la utilización de canales de 3.5 MHz es ciertamente más eficiente pues proporciona celdas con radios de cobertura más grandes, pero desde el punto de vista de capacidad la utilización de canales de 7 MHz es mucho mejor pues la velocidad neta de cada sector será mayor por lo cual podrá soportar un número superior de usuarios. La capacidad de un sector (teniendo en cuenta las configuraciones utilizadas en los ejemplos) con canal de 7 MHz es de 13.04 Mbps mientras que con canales de 3.5 MHz es de tan solo 6.52 Mbps. Por lo tanto se concluye que la utilización de canales de 7 MHz es más eficiente pues aunque se requerirán más estaciones base, este hecho permitirá al sistema soportar una mayor cantidad de usuarios en el futuro, suponiendo que la demanda del servicio y la penetración aumentarán con el tiempo.
- La frecuencia de operación influye en gran medida en la cobertura de las celdas. Como se pudo apreciar en el Anexo B cuando se realizó el ejemplo para la ciudad de Cali haciendo uso de la banda de 5.8 GHz y tamaño de canal de 10 MHz, el radio de cada celda fue de 0.906 Km lo cual sin duda alguna incrementa enormemente el número de estaciones base, los resultados arrojaron que se necesitarían 51 BS. Allí que anotar que esto también se debe al tamaño del canal que utiliza esta banda de frecuencia, como se mencionó anteriormente entre mayor sea el tamaño del canal menor será la cobertura, pues se necesita una mayor sensibilidad en recepción para demodular los bits por símbolo correspondientes a cada nivel de modulación. Sin embargo, la velocidad del sector con este tamaño de canal es de 17.93 Mbps, por lo tanto permitirá al sistema soportar una mayor cantidad de usuarios.
- Como se puede apreciar se debe hacer un intercambio entre velocidad y cobertura para obtener un correcto balance. Se recomienda al operador realizar un análisis minucioso de su modelo de negocio, para determinar que configuración es la más favorable para su red. En general, para la banda de 3.5 GHz se recomienda utilizar canales de 7 MHz pues ofrecen casi el doble de velocidad que los de 3.5 MHz y la

cobertura no disminuye en gran medida con respecto al otro. En Colombia, este espaciamiento de canal será el que muy seguramente utilizarán los proveedores WiMAX con duplexación FDD que además permite un mayor ancho de banda, pues se utiliza una frecuencia para transmisión y otra para recepción.

- Otra decisión importante que deberá ser realizada por parte del proveedor es la utilización de CPE's *outdoor* o *indoor*. Como se vio en los ejemplos desarrollados en el Anexo B, la utilización de dispositivos clientes *indoor* requiere de un gran número de estaciones base lo cual implica una fuerte inversión en infraestructura de red, no solo en instalaciones de BS si no en los sistemas que se utilizarán para su interconexión. Esto puede afectar enormemente los plazos de retorno de inversión estimados, por lo cual este tema deberá ser tenido en cuenta como un factor de gran importancia en el diseño de la red. A esto hay que añadirle que la geografía colombiana dificulta la utilización de estos dispositivos pues a diferencia de Estados Unidos y países Europeos, donde los materiales predominantes para la construcción de viviendas es la madera y el *drywall* (materiales prefabricados), aquí se utiliza ladrillo, concreto y vigas de acero para los mismos propósitos. Este tipo de materiales constituyen una barrera que provoca una gran atenuación en las señales de RF por lo tanto la conectividad y los niveles de sensibilidad requeridos para el funcionamiento de los dispositivos a las velocidades esperadas no están garantizados. Por lo tanto, se recomienda la utilización de CPE's *outdoor* pues disminuye el número de estaciones base necesarias y además el buen desempeño de los dispositivos está más garantizado.
- Las ciudades colombianas, principalmente ciudades pequeñas, no tienen un orden específico en sus directivas de planeación, se combinan diferentes tipos de edificaciones, de diferentes alturas y para diversos propósitos; lo que si es una constante son los materiales utilizados para la construcción, el concreto y el ladrillo predominan en la mayoría de ellas, lo cual hace que las ondas electromagnéticas vean en este tipo de edificios obstáculos rígidos que obstruyen parte o toda la zona de fresnel. Debido a lo anterior, el funcionamiento de tecnologías NLOS (Sin línea de vista) se hace complicado y se prefiere optar por realizar instalaciones de Subscriber o CPE que conserven la línea de vista con la radio base. Sin embargo, el tener línea de vista no garantiza encontrarse ante un modelo de propagación

basado únicamente en las pérdidas por espacio libre. Los obstáculos que se presentan en el ambiente urbano afectan parte de la zona de fresnel de manera inversamente proporcional a la distancia, esto quiere decir que un suscriptor instalado a menor distancia puede tener un obstáculo que obstruya hasta el 50% de su zona de fresnel, mientras que para un suscriptor ubicado a mayor distancia esta afectación será menor.

- Los modelos de propagación utilizados mostraron un comportamiento cercano a la realidad sin embargo se notaron algunas diferencias. El modelo ECC-33 ofrece una excelente aproximación a la propagación que se obtendría en una ciudad grande, con gran densidad de edificios, vegetación y obstáculos artificiales, y en especial a ciudades con topografías variables como las ciudades colombianas. Sin embargo, para ciudades medianas y pequeñas el modelo Erceg B presento mejor comportamiento y consonancia con la realidad de la geografía colombiana, que es muy diferente a lo que puede encontrarse en Europa y Estados Unidos.
- Los procedimientos y ejemplos aquí realizados pretenden dar un buena aproximación a como se realizaría el diseño y planeación de una red inalámbrica de área metropolitana, teniendo en cuenta los aspectos más relevantes que un nuevo operador debería tener en cuenta para la prestación de servicios de banda ancha. Obviamente la implementación de una red de este tipo no solo debe contemplar los aspectos técnicos si no también los económicos, pues muchas veces el mejor diseño puede sobrepasar las expectativas de inversión y por lo tanto será necesario adaptarlo para lograr las metas de negocio. Una recomendación final sería que una vez obtenido el diseño, antes de poner en funcionamiento el sistema en su totalidad, se realice una instalación temporal para propósitos de prueba; esta es una práctica conveniente pues permitirá realizar un análisis del desempeño de los equipos y en consonancia con los resultados obtenidos, verificar si es necesario llevar a cabo ajustes en el diseño para cumplir con las metas propuestas.

BIBLIOGRAFÍA

[1] D. Pareek, "The Business of WiMAX", Ed. Chichester: John Wiley & Sons. 2006. ISBN: 10-0470-02691

[2] R. Olexa, "Implementing 802.11, 802.16, and 802.20 Wireless Networks Planning, troubleshooting and operations", Ed. Newnes: Elsevier, 2005. ISBN: 0-7506-7808-9.

[3] J. Andrews, A. Ghosh, M. Rias, "Fundamentals of WiMAX – Understanding Broadband Wireless Networking", Ed. Prentice Hall, 2007. ISBN: 0-13-222552-2.

[4] SR Telecom Inc, "WiMAX Capacity", 2006. Documento PDF disponible en: <http://www.srtelecom.com/en/products/whitepapers/WiMAX-Capacity.pdf> (Visitado el 4-05-07)

[5] IEEE 802.16 Task Group. "Part 16: Air interface for fixed broadband wireless access systems", 2001. Documento PDF disponible en: www.coe.montana.edu/ee/rwolff/EE548/EE548-S06/WiMAX/802.16.pdf (Visitado el 3-02-07)

[6] Ministerios de Comunicaciones, "RESOLUCIÓN NÚMERO 2064 DE SEPTIEMBRE 15 DE 2005". Documento PDF disponible en: www.mincomunicaciones.gov.co/mincom/src/user_docs/Archivos/normatividad/2005/Resolucion/R2064de2005.pdf (Visitado el 2-03-07).

[7] A. Galvis, C.G Santamaría, "Modelos de canal inalámbricos y su aplicación al diseño de redes WiMAX", 2006. Documento PDF disponible en: http://dspace.icesi.edu.co/dspace/bitstream/item/1006/1/modelos_canal_inalmabrico_wimax.PDF

[8] IEEE 802.16 Task Group. "Channel Models for Fixed wireless Applications", 2001. Documento PDF disponible en:

http://wirelessman.org/tg3/contrib/802163c-01_29r4.pdf (Visitado el 26-10-06)

[9] V. Erceg, "Channel Models for Fixed Wireless Systems", 2004. Documento PDF disponible en:

<http://wireless.stanford.edu/meetingHandouts/vinko2.pdf> (Visitado el 23-05-07)

[10] M. Cheffena, L. Erling, T. Tjelta, "Time dynamic channel model for broadband fixed wireless access systems", 2007. Documento PDF disponible en:

www.telenor.no/broadwan/BROADWAN_CD/Presentations/Cheffena_ISTmobilewireless_summit2006.pdf (Visitado el 27-04-03).

[11] I.J. Wassell, D. Crosby, M.P Sellars, "Comparison of Empirical Propagation Path Loss Models for Fixed Wireless Access Systems", 2005. Documento PDF disponible en:

www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/publications/public/vsa23/VTC05_Empirical.pdf (Visitado el 23-03-07)

[12] R. Bustamante, R. Hincapié, "Análisis, Modelamiento y Simulación de Redes Enmalladas basadas en el Estándar 802.16-2004", 2005. Documento PDF disponible en:

<http://www.icesi.edu.co/esn/contenido/pdfs/Analisismodelsimulacionredes.pdf> (visitado el 10-10-06)

[13] Intel Technology Journal, "IEEE 802.16 Medium Access Control and Service Provisioning", Volumen 3, Agosto 2004. ISSN: 1535-864X.

[ftp://download.intel.com/technology/itj/2004/volume08issue03/art04_ieee80216mac/vol8_art04.pdf](http://download.intel.com/technology/itj/2004/volume08issue03/art04_ieee80216mac/vol8_art04.pdf) (Visitado el 17-03-07)

[14] M. Gast, "802.11 Wireless Networks – The Definitive Guide", Ed. O'Reilly, 2002. ISBN: 0-596-00183-5.

[15] D. Sweeney, "WiMAX Operator's Manual – Building 802.16 Wireless Networks", Ed. Apress, 2006. ISBN: 1-59059-574-2.

[16] Mapas Estadísticos de Colombia. DANE. Pagina Web disponible en:
http://200.21.49.233/productos/consultas/inicio_col.htm (visitado el 13-04-2007)

[17] Municipio de Santiago de Cali, "Plan de Ordenamiento Territorial Santiago de Cali", 1998.

[18] Concejo Municipal de Palmira, "Acuerdo No. 058 – Ajuste al Acuerdo 109: Adopción del Plan de Ordenamiento Territorial", 2003.

[19] Alcaldía de Popayán, "Plan de Ordenamiento Territorial 2002 - 2011", 2003.

[20] Alcaldía de Tuluá, "Anuario Estadístico de Tuluá 2005 - Versión 1.0", 2006.

[21] Latintel, "El control del Espectro Radioeléctrico frente a las actuales concentraciones", Año 1, Número 5 Enero 2006. ISSN: 1815 – 7017.
www.regulatel.org/publica/Revista/Latintel_vol_1_no_5_enero_06.pdf (Visitado el 7-04-07)

[22] Ministerio de Comunicaciones, "RESOLUCIÓN NÚMERO 689 DE JUNIO DE 2007". Documento PDF disponible en:
www.mincomunicaciones.gov.co/mincom/src/user_docs/DDS/Res1689de2007.pdf
(Visitado el 2-03-07).

[23] Ministerio de Comunicaciones, "Decreto 1972 de 2003". Pagina Web disponible en:
www.superservicios.gov.co/basedoc/docs/decretos/d1972003.html (visitado el 2-03-2007)

[24] Ministerio de Comunicaciones, "Resolución 1449 de 2006". Documento PDF disponible en:
www.mincomunicaciones.gov.co/mincom/src/user_docs/Archivos/normatividad/2006/Resolucion/R1449de2006.pdf (visitado el 2-03-2007)

[25] Ministerio de Comunicaciones, “Cuadro de Ganadores Licencias WiMAX Departamentales” 2006. Documento PDF disponible en:

http://www.mincomunicaciones.gov.co/mincom/src/usr_docs/Noticias/audiencia1.pdf

(Visitado el 3-04-07)

[26] T. Samura, “Techno-economic analysis of IEEE 802.16a-based fixed wireless access networks”, 2004. Documento PDF disponible en:

http://netlab.hut.fi/u/tsmura/publications/smura_thesis.pdf (Visitado el 23-05-07)

[27] WiMAX Forum, “Business Case Models for Fixed Broadband Wireless Access based on WiMAX Technology and the 802.16 Standard”, 2004. Documento PDF disponible en:

www.wimaxforum.org/technology/downloads/WiMAX-The_Business_Case-Rev3.pdf

(Visitado el 4-02-07)

[28] Proxim, “Proxim MeshMAX Family Series”. Pagina Web disponible en:

www.proxim.com/products/meshmax/index.html (visitado el 16-05-2007)

[29] J. Jun, M. Sichitiu, “The Nominal Capacity of Wireless Mesh Networks”, 2004. Documento PDF disponible en:

<http://networking.ncsu.edu/capacityWCM.pdf> (visitado el 23-04-2007)

[30] Axxcelera, “Axxcelera ExcelAir 70 Base Station”. Documento PDF disponible en:

http://www.axxcelera.com/pdfs/excel_air70_basestation_datasheet_v05.pdf (visitado el 12-04-2007)

[31] Ministerio de Comunicaciones, “Propuesta de Atribución, Asignación y Valoración de la Banda de 3.5 Ghz”, 2005. Documento PDF disponible en:

http://www.mincomunicaciones.gov.co/mincom/src/user_docs/Archivos/Sectorial/doctec3_5GHz.pdf (visitado el 12-04-2007)

[32] Promoción y Masificación de la Banda Ancha en Colombia. CRT. Documento PDF disponible en:

<http://www.crt.gov.co/Documentos/ActividadRegulatoria/MasificacionBandaAncha/LineamientosPoliticaBandaAnchall.pdf> (visitado el 8 - 09 - 06)

[33] Pyramid Research – CINTEL, “Análisis del Mercado de Servicios de Banda Ancha en Colombia”, 2004. Documento PDF disponible en:

http://www.crt.gov.co/documentos/biblioteca/ResumenEjecutivo_BandaAncha.pdf

(visitado el 10-02-2007)

[34] Informe Sectorial de Telecomunicaciones Número 6, CRT. Documento PDF disponible en:

http://www.crt.gov.co/Documentos/ActividadRegulatoria/MasificacionBandaAncha/Informe_sectorial_6.pdf (visitado el 8 - 09 - 06)

[35] EL TIEMPO, “Poco a poco, Colombia está entrando en la onda inalámbrica”. Pagina Web disponible en:

http://www.eltiempo.com/tiempoimpreso/especialeseltiempo/publicacion2/ARTICULO-WEB-NOTA_INTERIOR-9540.html (visitado el 22-04-2007)

[36] M. Cárdenas, M. Garcia, S. Sales, “La regulación en el desarrollo de la banda ancha: La experiencia Internacional y la Evolución en Colombia”, 2005. Documento PDF disponible en:

<http://www.uexternado.edu.co/facecono/facultad/Obs.%20colombiano%20de%20energ%C3%ADa/PDF/MARIO%20GARCIA.pdf> (visitado el 10-02-2007)

[37] Asociación Colombiana de Usuarios de Internet, “Aumento acelerado de la Banda Ancha en Colombia”. Documento PDF disponible en:

http://www.acui.org/images/docs/Barometro_Cisco.pdf (visitado el 22-04-2007)

[38] Ministerio de Educación Nacional, “Colombia asesora en Cobertura de Banda Ancha”. Pagina Web disponible en:

<http://www.mineducacion.gov.co/cvn/1665/fo-article-101611.pdf> (visitado el 13-04-2007)

[39] LatinWiMAX, "Orbitel en Colombia comenta sus planes con WiMAX ". Pagina Web disponible en:

<http://www.latinwimax.com/?p=407> (visitado el 13-04-2007)

[40] Frecuencia Online, "Colombia: EPM busca tener 50 mil usuarios WiMAX". Pagina Web disponible en:

<http://www.frecuenciaonline.com/espanol/mostrar.php?id=43> (visitado el 16-04-2007)

[41] Eric Meyer, "WiMax vs WiFi", 2005. Pagina Web disponible en:

http://www.techwarelabs.com/articles/other/wimax_wifi (visitado el 2-06-06)

[42] Latintel, "Retos de los Servicios Sobre Protocolos IP", Año 1, Número 4 Diciembre 2005. ISSN: 1815-7017. Documento PDF disponible en:

www.regulatel.org/publica/Revista/Latintel_vol_1_no_4_diciembre_05.pdf (Visitado el 4-04-07)