

**CRITERIOS PARA INTERCONEXION DE SITIOS REMOTOS BAJO LOS
ESTANDARES IEEE 802.11 Y 802.16**



**ANTONIO ANDRES MONTOYA LEON
JHENNY MILENA ORTEGA SOLARTE**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
GRUPO I+D EN NUEVAS TECNOLOGIAS EN TELECOMUNICACIONES
POPAYAN
2.005**

**CRITERIOS PARA INTERCONEXION DE SITIOS REMOTOS BAJO LOS
ESTANDARES IEEE 802.11 Y 802.16**



**ANTONIO ANDRES MONTOYA LEON
JHENNY MILENA ORTEGA SOLARTE**

Trabajo de Grado

Director

Esp. Guefry Agredo Méndez

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
GRUPO I+D EN NUEVAS TECNOLOGIAS EN TELECOMUNICACIONES
POPAYAN
2.005**

A Dios por darme la oportunidad de vivir.
A mi madre, el por qué de todo lo que hago.
A mi padre por estar a mi lado durante estos años.
A toda mi familia por compartir conmigo la alegría que significa este triunfo.
A mis amigos por sus consejos y apoyo en el momento indicado.

Antonio Andrés

Llegar a la meta
después de cuántos esfuerzos, renunciaciones, dificultades y tropiezos,
es comprender que la vida no es algo que se nos da hecho,
sino que tenemos que fabricar las oportunidades para alcanzar el éxito.
Éxito que con amor y orgullo dedico a mi Madre, a mi Padre y a mis Hermanos.

Jhenny Milena

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones y su cuerpo de profesores por su labor académica y formativa.

A quienes brindaron su colaboración durante el desarrollo de este Trabajo de Grado:

Esp. Guefry Leyder Agredo Méndez

Esp. Victor Manuel Quintero Florez

Esp. Alejandro Toledo Tovar

Grupo Proyecto EHAS-Silvia

Facultad de Ingeniería Civil

Ing. Miguel Latorre

Mag. Edgard Castillo Erassour

Ing. Alvaro Pachón, Universidad ICESI

Ing. Nelson Henríquez, Latcom S.A.

Ing. Yolanda Paredes, Colombia Telecomunicaciones S.A.

Ing. Luis Mario Lenis, Comcel.

Ing. Juan Carlos González Díaz

Ing. Marinella Ramírez Bravo

Y a las personas que de una u otra manera aportaron en la consecución de este sueño.

A todos, Muchas Gracias!!!

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	18
1. FUNDAMENTOS SOBRE WMAN	19
1.1 INTRODUCCION AL ESTANDAR IEEE 802.16	20
1.1.1 Fases de desarrollo del Estándar	21
1.1.2 Capa de Acceso al Medio	22
1.1.3 Capa PHY	24
1.1.4 WiMAX	27
1.2 INTRODUCCION AL ESTANDAR 802.11	28
1.3 ARQUITECTURA GENERAL DE UNA WMAN	30
1.3.1 Arquitectura Extremo a Extremo del 802.16	33
1.3.2 Arquitectura de Referencia del 802.16	34
1.4 LOS Y NLOS	37
1.4.1 LOS	37
1.4.2 NLOS	38
1.4.3 Técnicas empleadas por WiMAX para operación NLOS	38
1.5 RUIDO E INTERFERENCIA EN EL AMBIENTE RADIO	42
1.6 MODELOS DE PROPAGACION NLOS	43
1.6.1 Modelo AT&T	44
1.6.2 Modelos SUI	44
1.6.3 Probabilidad de Predicción de Cobertura	45
1.7 NORMATIVIDAD Y REGULACION	45
2. ANALISIS COMPARATIVO DE LAS NORMAS IEEE 802.16 Y 802.11	51
2.1 ANALISIS COMPARATIVO WiMAX Vs. Wi-Fi	52
2.1.1 Visión general del mercado	52
2.1.2 Tecnología Radio	52
2.1.3 Protocolo MAC/QoS	57

2.1.4 Mercados para Wi-Fi y WiMAX	63
2.2 COEXISTENCIA	65
2.2.1 Interferencia hacia la EB	66
2.2.2 Interferencia hacia la ES	68
2.2.3 Manejo de la Interferencia en sistemas BWA	69
3. CRITERIOS PARA LA PLANEACION Y DISEÑO DE INTERCONEXION INALAMBRICA DE SITIOS REMOTOS CON LAS NORMAS IEEE 802.16 E IEEE 802.11	73
3.1 VARIABLES QUE DEFINEN EL ESCENARIO DE OPERACION	73
3.1.1 Demográficas	74
3.1.2 Bandas de frecuencia	74
3.1.3 Servicios	75
3.1.4 Velocidad de adopción del mercado	79
3.1.5 Costos	80
3.2 ESCENARIOS DE OPERACION	80
3.3 PLANEACION	80
3.3.1 Identificación del Modelo de Negocio	83
3.3.2 Planeación del espectro	85
3.3.3 Planeación de los servicios	87
3.3.4 Análisis de aspectos complementarios	88
3.4 DISEÑO	90
3.4.1 Configuración del Enlace	91
3.4.2 Levantamiento de Sitio	92
3.4.3 Selección de Equipos	95
4. DISEÑO DE LA RED DE INTERCONEXION INALAMBRICA PARA LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA BAJO LAS NORMAS IEEE 802.11 Y 802.16	99
4.1 DEFINICION DE PARAMETROS METODOLOGICOS	99
4.1.1 Formulación de objetivos	99
4.1.2 Establecimiento de premisas	100
4.1.3 Determinación de alternativas	103
4.1.4 Evaluación de alternativas	104

4.1.5 Selección de una vía	107
4.2 PARAMETROS TECNICOS	109
4.2.1 Identificación del modelo de negocio	109
4.2.2 Planeación del espectro	110
4.2.3 Planeación de los servicios	111
4.2.4 Análisis de aspectos complementarios	112
4.3 CONFIGURACION DEL ENLACE	114
4.3.1 Definición de la topología del sistema	114
4.3.2 Determinación del Perfil del Trayecto	115
4.4 LEVANTAMIENTO DE SITIO	122
4.4.1 Determinación de LOS y Cálculos de Fresnel	123
4.4.2 Análisis de RF	138
4.4.3 Presupuesto del enlace	138
4.5 SELECCION DE EQUIPOS	141
4.5.1 Estimación de presupuesto operativo y de capital	142
4.6 VISUALIZACION DEL ALCANCE Y EFECTIVIDAD SOCIAL DE LA SOLUCION DE INTERCONEXION INALAMBRICA	144
CONCLUSIONES	146
RECOMENDACIONES	150
BIBLIOGRAFIA	151
ANEXOS	

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1-1. Características generales del 802.11(a, b y g)	28
Tabla 1-2. Técnicas de Modulación empleadas en WLAN	29
Tabla 1-3. Revisiones del Estándar 802.11	29
Tabla 1-4. Algunas Fuentes de Ruido e Interferencia y sus Soluciones	43
Tabla 2-1. Interfaces del Enlace Radio WLAN de IEEE 802.11	53
Tabla 2-2. Opciones de modulación del 802.16	56
Tabla 2-3. Resumen de características de radioenlaces 802.16	57
Tabla 2-4. Comparación de las tecnologías WiMAX y Wi-Fi	62
Tabla 2-5. “Prácticas Recomendadas” por el IEEE 802.16 para Coexistencia	72
Tabla 3-1. Características de las bandas de frecuencia y su relación con las tecnologías 802.16 y 802.11	75
Tabla 3-2. Modelos de Negocio para enlaces de interconexión basados en WiMAX/ Wi-Fi	81
Tabla 3-3. Algunos rubros para el Presupuesto Operativo y de Capital	96
Tabla 3-4. Resumen comparativo de Criterios de Planeación y Diseño para Interconexión Inalámbrica de Sitios Remotos empleando WiMAX y Wi-Fi	98
Tabla 4-1. Algunos proveedores con soluciones factibles para el diseño de interconexión WiMAX	108
Tabla 4-2. Características de las sedes a interconectar con la Red de Datos de la Universidad del Cauca	112
Tabla 4-3. Información del lugar de ubicación de la EB WiMAX	116
Tabla 4-4. Información del lugar de ubicación de la ES WiMAX en la Facultad de Ciencias Agropecuarias	118
Tabla 4-5. Información del lugar de ubicación de la ES WiMAX en Silvia	118
Tabla 4-6. Información del lugar de ubicación de la ES WiMAX en Santander de Quilichao	122

Tabla 4-7. Información sobre el obstáculo en el enlace “FIET- Las Guacas”	124
Tabla 4-8. Análisis de RF para los sitios de emplazamiento de los enlaces de interconexión WiMAX	139
Tabla 4-9. Resumen del presupuesto de los enlaces de interconexión WiMAX	140
Tabla 4-10. Resumen de los equipos seleccionados para la interconexión WiMAX	142
Tabla 4-11. Resumen presupuesto operativo y de capital para la interconexión WiMAX Unicauca	142

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1-1. Familia de Estándares Inalámbricos	20
Figura 1-2. Escenarios de aplicación según las fases de evolución del 802.16	22
Figura 1-3. Arquitectura general de una WMAN	30
Figura 1-4. Evolución de la Arquitectura del 802.16	33
Figura 1-5. Arquitectura de Referencia 802.16	34
Figura 1-6. LOS Visual e Inalámbrica	38
Figura 1-7. Máquina de estados del transmisor ARQ	41
Figura 1-8. Uso mundial de la banda de 2.4 Ghz para WLAN (802.11b y g)	46
Figura 1-9. Comparación Bandas HiperLAN con NII y Bandas no licenciadas de 2.4 GHz	46
Figura 1-10. Uso de la banda de 5 GHz en América	47
Figura 1-11. Uso de la banda de 5 GHz en la región Pacífica de Asia	47
Figura 1-12. Uso de la banda de 5 GHz en la Comunidad Europea	48
Figura 1-13. Bandas asignadas en Colombia mediante “Res. 689/2004” y su Utilización	49
Figura 2-1. 802.11 y 802.16 en la Familia de Estándares IEEE	51
Figura 2-2. Fuentes de Interferencia para una EB de BWA fijo	66
Figura 2-3. Fuentes de Interferencia para la ES	68
Figura 3-1. Definición del marco de operación para WiMAX y Wi-Fi	73
Figura 3-2. Velocidad de adopción del mercado para WiMAX	79
Figura 3-3. Constitución de la Etapa de Planeación	81
Figura 3-4. Constitución de la Etapa de Diseño	90
Figura 4-1. Alternativas para los sitios de emplazamiento	106
Figura 4-2. Interconexión PTM entre sedes Unicauca	109
Figura 4-3. Enlaces de Interconexión WiMAX en Topología PTM	115
Figura 4-4. Lugar de ubicación de la EB WiMAX en la FIET	116

Figura 4-5. Lugar de ubicación de la ES WiMAX en la Facultad de Ciencias Agropecuarias	117
Figura 4-6. Lugar de ubicación de la ES WiMAX en Silvia y del enlace Wi-Fi actual	119
Figura 4-7. Lugar de ubicación de la ES WiMAX en Santander de Quilichao	121
Figura 4-8. Enlaces y distancias para la interconexión WiMAX Unicauca	123
Figura 4-9. Inspección visual de LOS para el enlace “FIET – Las Guacas”	124
Figura 4-10. Enlace “FIET-Las Guacas” representado sobre el mapa de “Radio Mobile”	125
Figura 4-11. Perfil del enlace “FIET - Las Guacas” según “Radio Mobile”	126
Figura 4-12. Relación de alturas para el enlace “FIET – Las Guacas”	129
Figura 4-13. Enlace “FIET-Silvia” representado sobre el mapa de “Radio Mobile”	131
Figura 4-14. Perfil del enlace “FIET - Silvia” según “Radio Mobile”	132
Figura 4-15. Enlace “FIET-Santander de Quilichao” representado sobre los mapas de “Radio Mobile”	134
Figura 4-16. Perfil del salto “FIET – Cerro Munchique” según “Radio Mobile”	135
Figura 4-17. Perfil del salto “Cerro Munchique – Cerro La Chapa” según “Radio Mobile”	136
Figura 4-18. Perfil del salto “Cerro La Chapa – Santander de Quilichao” según “Radio Mobile”	137
Figura 4-19. Perfil del enlace “FIET – Santander de Quilichao” según “Radio Mobile”	137

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. CAPA MAC DEL ESTANDAR IEEE 802.16

ANEXO B. CAPA PHY DEL ESTANDAR IEEE 802.16

ANEXO C. GUIA PARA LA UTILIZACION DE LA HERRAMIENTA "RADIO MOBILE"

ANEXO D. PLANTILLAS DE LEVANTAMIENTO DE SITIO PARA EL DISEÑO DE INTERCONEXION INALAMBRICA ENTRE SEDES DISTANTES DE LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA Y SU RED DE DATOS

LISTA DE ACRONIMOS

- AAA:** Authentication, Authorization and Accounting (Autenticación, Autorización y Conteo)
- AAS:** Advanced Antenna Systems (Sistemas de Antena Avanzados)
- ACK:** Acknowledgment (Acuse de Recibo)
- AES:** Advanced Encryption Standard (Estándar de Encriptación Avanzada)
- AI:** Area de Interferencia
- AOM:** Administración, Operación y Mantenimiento
- AP:** Access Point (Punto de Acceso)
- APC:** Access Point Control (Control del Punto de Acceso)
- APT:** Access Point Transceiver (Transceptor del Punto de Acceso)
- ARQ:** Automatic Repeat Request (Solicitud de Repetición Automática)
- ASP:** Application Service Provider (Proveedor de Servicio de Aplicaciones)
- ATM:** Asynchronous Transfer Mode (Modo de Transferencia Asíncrono)
- BER:** Bit Error Rate (Tasa de Errores de Bits)
- BPSK:** Binary Phase Shift Keying (Modulación de Cambio de Fase Binaria)
- BWA:** Broadband Wireless Access (Acceso Inalámbrico de Banda Ancha)
- CCK:** Complementary Code Keying (Modulación de Código Complementario)
- CDMA:** Code Division Multiple Access (Acceso Múltiple por División de Código)
- CPE:** Customer Premise Equipment (Equipo de la Premisa del Consumidor)
- CRC:** Cyclic Redundancy Code (Código de Redundancia Cíclica)
- CS:** Convergence Sublayer (Subcapa de Convergencia)
- CSMA/CA:** Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evaluación de Colisión)
- CSMA/CD:** Carrier Sense Multiple Access with Collision Detect (Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Detección de Colisión)
- CRM:** Customer Relationship Management (Gestión de las Relaciones con los Clientes)
- CRT:** Comisión de Regulación de Telecomunicaciones
- DAMA:** Demand Assignment Multiple Access (Acceso Múltiple de Asignación por Demanda)

DBPSK: Differential Binary Phase Shift Keying (Modulación de Cambio de Fase Binaria Diferencial)

DCF: Distributed Coordination Function (Función de Coordinación Distribuida)

DES: Data Encryption Standard (Estándar de Encriptación de Datos)

DFS: Dynamic Frequency Selection (Selección Dinámica de Frecuencia)

DL: DownLink (Enlace de Bajada)

DNS: Domain Name Server (Servidor de Nombre de Dominio)

DQPSK: Differential Quadrature Phase Shift Keying (Modulación de Cambio de Fase en Cuadratura Diferencial)

DSL: Digital Subscriber Line (Línea Digital de Abonado)

DSSS: Direct Sequence Spread Spectrum (Espectro Ensanchado por Secuencia Directa)

EAP: Extensible Authentication Protocol (Protocolo de Autenticación Extensible)

EB: Estación Base

EDCA: Enhanced Distributed Control Access (Acceso de Control Distribuido Mejorado)

EIRP: Effective Isotropic Radiated Power (Potencia Radiada Isotrópica Efectiva PIRE)

ES: Estación Suscriptora

ESM: Estación Suscriptora Móvil

ETSI: European Telecommunication Standards Institute (Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones)

FCC: Federal Communications Commission (Comisión Federal de Comunicaciones)

FDD: Frequency Division Duplex (Duplexación por División de Frecuencia)

FEC: Forward Error Correction (Corrección de Errores Hacia Adelante)

FFT: Fast Fourier Transformation (Transformada Rápida de Fourier)

FHSS: Frequency Hopping Spread Spectrum (Espectro Ensanchado por Salto de Frecuencia)

GPS: Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global)

HiperLAN: High Performance Radio Local Area Network (Red Radio de Area Local de Alto Desempeño)

HiperMAN: High Performance Radio Metropolitan Area Network (Red Radio de Area Metropolitana de Alto Desempeño)

HISWANA: High Speed Wireless Access Network Type a (Red de Acceso Inalámbrico de Alta Velocidad Tipo a)

HR/DSSS: High Rate Direct Sequence Spread Spectrum (Espectro Ensanchado por Secuencia Directa de Alta Velocidad)

I-CNx: Interface Core Network x (Interfaz con la Red x)

I-MSSAP: Interface Mobile Subscriber Station Access Point (Interfaz entre la Estación Suscriptora Móvil y el Punto de Acceso)

I-RNSN: Interface Radio Network Service Node (Interfaz entre Nodos de Servicio de la Red Radio)

I-RNSNAP: Interface Radio Network Service Node Access Point (Interfaz entre Nodos de Servicio de la Red Radio y el Punto de Acceso)

I-SSAP: Interface Subscriber Station Access Point (Interfaz entre la Estación Suscriptora y el Punto de Acceso)

IAPP: Inter Access Point Protocol (Protocolo entre Puntos de Acceso)

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos)

IP: Internet Protocol (Protocolo de Internet)

ISM: Industrial, Scientific and Medical (Industrial, Científico y Médico)

ISP: Internet Service Provider (Proveedor de Servicios de Internet)

ITU: International Telecommunications Union (Unión Internacional de Telecomunicaciones)

LOS: Line of Sight (Línea de Vista)

MAC: Medium Access Control (Control de Acceso al Medio)

MMDS: Multichannel Multipoint Distribution Service (Servicio de Distribución Multicanal Multipunto)

MTBF: Mean Time between Failures (Tiempo Medio Entre Fallas)

MTTR: Mean Time To Recovery (Tiempo Medio para Recuperación de Fallas)

NLOS: Non Line of Sight (Sin línea de Vista)

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal)

OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access (Acceso al Medio por División de Frecuencia Ortogonal)

OSI: Open Systems Interconnection (Interconexión de Sistemas Abiertos)

OSS: Operations Support System (Sistema de Soporte de Operaciones)

PCF: Point Coordination Function (Función de Coordinación Puntual)

PDU: Protocol Data Unit (Unidad de Datos de Protocolo)

PHY: Physical (Capa Física)

PMD: Physical Medium Dependent (Dependiente del Medio Físico)

PSK: Phase Shift Keying (Modulación de Cambio de Fase)

PTM: Point to Multipoint (Punto a Multipunto)

PTP: Point to Point (Punto a Punto)

QAM: Quadrature Amplitude Modulation (Modulación de Amplitud en Cuadratura)

QoS: Quality of Service (Calidad de Servicio)

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying (Modulación de Cambio de Fase en Cuadratura)

RAN: Radio Access Network (Red de Acceso Radio)

RC4: Rivest Cypher Version 4 (Cifrado de Rivest de la versión de 1.994)

RF: Radio Frequency (Radiofrecuencia)

RLC: Radio Link Control (Control del Enlace Radio)

RTPC: Red Telefónica Pública Conmutada

RUIM: Removable User Identity Module (Módulo Removible de Identidad de Usuario)

RNSN: Radio Network Service Node (Nodo de Servicio de la Red Radio)

ROI: Return of Investment (Retorno de la Inversión)

RRM: Radio Resource Management (Gestión de Recursos de Radio)

RSSI: Received Signal Strength Indicator (Indicador de Intensidad de Señal Recibida)

RTTT: Road Transport and Traffic Telemetric (Transporte Terrestre y Tráfico Telemétrico)

SA: Secure Associations (Asociaciones Seguras)

SAP: Service Access Point (Punto de Acceso al Servicio)

SIM: Subscriber Identity Module (Módulo de Identidad de Suscriptor)

SLA: Service Level Agreement (Acuerdo de Nivel de Servicio)

SNR: Signal to Noise Ratio (Relación Señal a Ruido)

SOM: System Operative Margin (Margen Operativo del Sistema)

STC: Space Time Coding (Codificación Espacio Tiempo)

SUI: Stanford University Interim (Universidad Interina de Stanford)

TCP: Transmission Control Protocol (Protocolo de Control de Transmisión)

TDD: Time Division Duplex (Duplexación por División de Tiempo)

TDMA: Time Division Multiple Access (Acceso Múltiple por División de Tiempo)

TE: Terminal Equipment (Equipo Terminal)

TFTP: Trivial File Transfer Protocol (Protocolo Trivial de Transferencia de Archivos)

TIC: Tecnologías de la Información y Comunicación

TKIP: Temporal Key Integrity Protocol (Protocolo de Integridad de Clave Temporal)

TPC: Transmission Power Control (Control de Potencia de Transmisión)

UDP: User Datagram Protocol (Protocolo de Datagramas de Usuario)

UL: Up Link (Enlace de Subida)

UNII: Unlicensed National Information Infrastructure (Infraestructura de Información Nacional Sin Licencia)

USIM: Universal Subscriber Identity Module (Módulo Universal de Identidad de Suscriptor)

VoIP: Voice over Internet Protocol (Voz sobre el Protocolo de Internet)

VPN: Virtual Private Network (Red Privada Virtual)

WEP: Wired Equivalent Privacy (Privacidad Equivalente Cableada)

Wi-Fi: Wireless Fidelity Alliance (Alianza de Fidelidad Inalámbrica)

WiMAX: Worldwide Interoperability Microwave Access (Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas)

WISP: Wireless Internet Service Provider (Proveedor de Servicio de Internet Inalámbrico)

WLAN: Wireless Local Area Network (Red de Area Local Inalámbrica)

WMAN: Wireless Metropolitan Area Network (Red de Area Metropolitana Inalámbrica)

WME: Wi-Fi Multimedia Extensions (Extensiones Multimedia de Wi-Fi)

WPA: Wi-Fi Protect Access (Acceso Protegido de Wi-Fi)

WSM: Wi-Fi Schedule Multimedia (Multimedia Programada de Wi-Fi)

INTRODUCCION

Hoy, la tendencia de buscar soluciones eficientes de acceso a la información está revolucionando el uso de las tecnologías de la información y el mercado de las telecomunicaciones. Entre ellas, las redes inalámbricas para interconexión de sitios remotos hasta ahora sólo han entregado soluciones independientes unas de otras, debido a que se han generado tecnologías y estándares por separado, como las basadas en las normas IEEE 802.11 e IEEE 802.16 del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE¹). El gran potencial que posee la tecnología inalámbrica en aplicaciones de interconexión entre distancias largas beneficia a sectores como Educación, Banca, Atención sanitaria, Hotelería e Industria, entre otros, sin embargo, se está adoptando a ritmo diferente e integrando en la vida diaria de las personas en una variedad de maneras, como consecuencia de las condiciones económica, social, regulatoria y tecnológica que existen en segmentos diferentes de la población mundial.

Frente a la carencia de soluciones de interconexión integrales se genera este Trabajo de Grado, que al ir en consonancia con la evolución tecnológica y los procesos de estandarización, adquiere gran significancia porque ofrece un conjunto de criterios comparativos para la planeación y diseño de interconexión inalámbrica de sitios remotos con las normas IEEE 802.11 y 802.16, permitiendo identificar cuándo emplear convenientemente equipos basados en ellas, ayudando a comprender el alcance de ambas tecnologías en aplicaciones que implican interconexión entre sitios alejados, contribuyendo con la apropiación, asimilación, actualización y aumento de la base de conocimiento concerniente a las tecnologías emergentes para interconexión inalámbrica, y aplicando los resultados al entorno específico de la Universidad del Cauca.

¹ El IEEE es una organización internacional que agrupa a los ingenieros eléctricos y electrónicos; entre sus actividades desarrolla estándares internacionales en las tecnologías eléctricas y electrónicas; en particular, el subgrupo de estándares 802 desarrolla los estándares para redes de área local y área metropolitana.

1. FUNDAMENTOS SOBRE WMAN.

Actualmente es posible diseñar y construir redes inalámbricas con características que no se disponían en el pasado, como capacidad de banda ancha o *broadband*², cobertura de áreas extensas y operación de licencia libre, entre otras, ofreciendo conectividad inalámbrica sobre áreas extensas, como ciudades y áreas rurales. En ese sentido, el presente capítulo entrega una descripción básica de conceptos generales relacionados con las Redes de Area Metropolitana Inalámbricas (Wireless Metropolitan Area Networks, WMAN), especialmente cuando la aplicación de estas redes es la interconexión de edificios entre sí, abordando el estándar 802.16 del IEEE, y en menor detalle el 802.11, por cuanto la reciente aparición del primero y la madurez y amplia difusión alcanzada por el segundo (tanto respecto a soluciones comerciales, como a estudios disponibles³) hacen imperioso se desarrolle el análisis de tal manera.

Alrededor de este ambiente, como se ilustra en la Figura 1-1, existe una familia de estándares para redes de área local y metropolitana, cada uno con características importantes que los diferencian, entre los cuales el IEEE 802.11 e IEEE 802.16 proporcionan conectividad inalámbrica y especifican la capa de Control de Acceso al Medio (Medium Access Control, MAC) y la capa Física (Physical, PHY); que se comparan con modelos del Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones (European Telecommunication Standards Institute, ETSI), como son la Red Radio de Area Local y la Red Radio de Area Metropolitana, ambas, de Alto Desempeño (High Performance Radio Local Area Network o HiperLAN y High Performance Radio Metropolitan Area Network o HiperMAN, respectivamente).

² El término *broadband* generalmente se emplea para dar a entender la capacidad de ofrecer ancho de banda significativo a cada usuario, mucho mayor que los módems de voz de banda estrecha; en la terminología de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (International Telecommunications Union, ITU), significa tasas de transmisión mayores que 1,5 Mbps

³ Entre ellos, BRAVO, Hernán y VERA, Martha. Análisis y Diseño de una Red Inalámbrica bajo las Normas IEEE 802.11(x) para el Campus de Ingenierías - Sector Tulcán. Popayán: Universidad del Cauca, 2004 157 p.

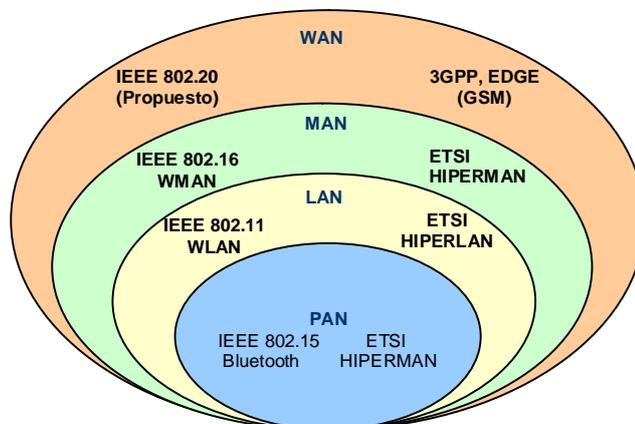


Figura 1-1. Familia de Estándares Inalámbricos.

1.1 INTRODUCCION AL ESTANDAR IEEE 802.16

Una cantidad de estándares de la industria gobiernan el diseño y desempeño de los equipos inalámbricos *broadband*, entre ellos el más reciente es el IEEE 802.16, que tienen por objetivo la estandarización de niveles de desempeño aceptables y el logro de la interoperabilidad total entre productos de fabricantes que cumplen con ellos.

El 802.16 es una norma emergente para acceso inalámbrico de banda ancha global, con capacidad, robustez y desempeño altos para dar soporte a tecnologías fijas, portables y móviles, sobre coberturas extensas; trabaja en bandas licenciadas como no licenciadas y tiene la posibilidad de desenvolverse en escenarios que no reúnen condiciones de línea de vista.

Este estándar especifica una capa MAC pero presenta diferentes capas PHY debido a las regiones de espectro diferentes que cubre, que se extienden en las microondas milimétricas desde los 2 GHz hasta los 66 GHz. A diferencia de los estándares que gobiernan las Redes de Área Local Inalámbricas (Wireless Local Area Networks, WLAN) tales como el IEEE 802.11 y sus derivados (802.11a, 802.11b y 802.11g), el 802.16 no

exhibe tasas de rendimiento fijas para usuarios individuales sino que presenta en promedio un máximo de 70 Mbps para un ancho de banda de canal de 20 MHz.

1.1.1 Fases de desarrollo del Estándar. El estándar 802.16 original creado por el Grupo de Trabajo 802.16 del IEEE en el año 2.001 se orientó a operación fija en la banda entre 10 GHz y 66 GHz; luego se generó la versión 802.16c en el año de 2.002, con mejoras de interoperabilidad facilitando la coexistencia entre sistemas; posteriormente se incluyó la operación entre 2 GHz y 11 GHz, cuyos resultados consolidaron la versión 802.16a en el año 2.003; la última versión se ratificó en octubre de 2.004, aprobada como IEEE 802.16-2004 (denominada inicialmente 802.16d como reemplazo del 802.16a), aplica para el espectro entre 2 GHz y 66 GHz, complementa las ratificaciones anteriores y entre sus modificaciones principales se encuentra la asociada con el consumo de potencia de los sistemas, especialmente respecto a su antecesora (la versión *a*); finalmente se espera para el año 2.006 la versión 802.16e, que incorporará el concepto de movilidad (parcial y total) para el soporte de usuarios nómadas y con velocidad vehicular.

Según la evolución en el proceso de estandarización, el 802.16 se desarrollará en tres fases, iniciando desde el acceso fijo y dirigiéndose hacia la portabilidad y movilidad, con mejoras en el desempeño de los sistemas de telecomunicaciones, como operación con Línea de Vista (Line of Sight, LOS) y sin Línea de Vista (Non Line of Sight, NLOS), robustez, QoS y niveles de seguridad altos, entre otros.

La primera y segunda fase, emplearán la especificación 802.16-2.004, orientada respectivamente a ambientes exteriores para suscriptores fijos y con antenas para interiores para *carriers*⁴ que busquen instalaciones de usuario final simplificadas; la tercera fase, basada en el 802.16e y hardware certificado por el Foro WiMAX para aplicaciones portables y móviles, se concentrará tanto en usuarios que deseen moverse dentro de zonas de servicio, disponiendo de conectividad similar a la ofrecida por el Wi-Fi actual,

⁴ *Carrier*: término empleado para referirse a un operador de telecomunicaciones que proporciona conexión a Internet a alto nivel.

como en aquellos que deseen velocidad vehicular. La Figura 1-2 ilustra dichos escenarios de aplicación.

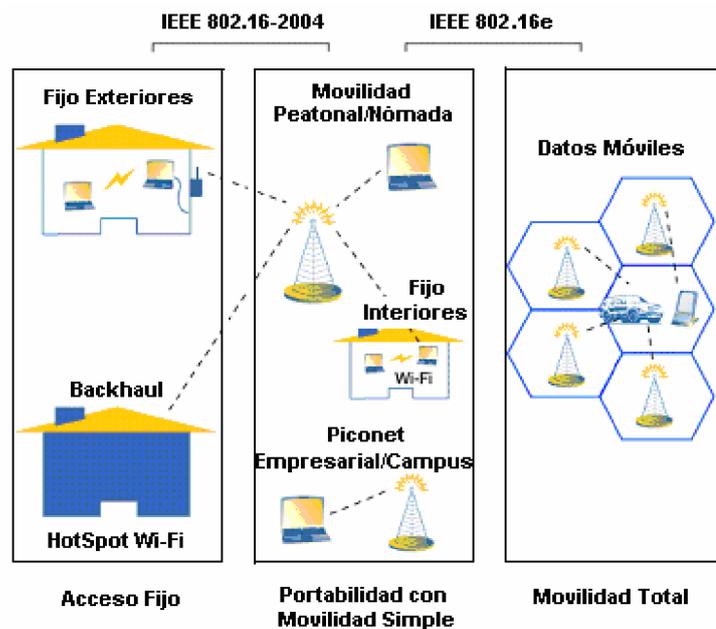


Figura 1-2. Escenarios de aplicación según las fases de evolución del 802.16.

Estas mejoras, tanto en la interfaz radio como en la infraestructura de red, deben estandarizarse antes de ofrecer los servicios interoperables que demandan proveedores, operadores y usuarios finales. Por tanto, el desarrollo del 802.16 tiene la tarea y el desafío de adaptar diferentes escenarios de redes inalámbricas, especialmente en entornos metropolitanos, y a la vez, soportar componentes estandarizados e interfaces para interoperabilidad entre proveedores.

1.1.2 Capa de Acceso al Medio. Se refiere a la capa de red adyacente superior a la PHY y determina el modo en que los suscriptores acceden a la red y cómo los recursos de la red se asignan a ellos. Está diseñada principalmente para soportar topologías de red Punto a Multipunto (Point to Multipoint, PTM), aunque también soporta topologías Punto a Punto (Point to Point, PTP) y Malla, esta última en las frecuencias inferiores, por

consiguiente maneja tasas de transferencia altas tanto en el enlace de subida (Up Link, UL) como en el enlace de bajada (Down Link, DL).

Continuando con la presentación de la MAC, su desempeño y el de los algoritmos que emplea para asignación de acceso y ancho de banda deben estar preparados para soportar cientos de terminales por canal en los que se pueden encontrar múltiples usuarios que desean compartir los recursos de la red, por lo cual esta capa maneja tráfico continuo y periódico, en ráfagas y soporte adicional de QoS asociado con los diferentes tipos de servicio requeridos por los usuarios finales, que entre sus matices incluyen voz, datos y en general lo que tiene que ver con conectividad IP y servicios de valor agregado (VoIP y *Streaming*, entre otros). Pese a que el protocolo MAC está optimizado para tráfico IP, también se orienta a conexión soportando así una variedad de requerimientos de *backhaul*⁵, incluyendo tanto los del Modo de Transferencia Asíncrono (Asynchronous Transfer Mode, ATM) como los basados en paquetes.

Dentro de la capa MAC se encuentran tres subcapas para manejos específicos. La **Subcapa de Convergencia** se encarga del tratamiento de protocolos de capas superiores y se utiliza para mapear tráfico específico de la capa de transporte hacia la MAC y a través de características como supresión de cabeceras, empaquetado y fragmentación de tramas esta subcapa y la MAC proveen eficiencia en el transporte de tráfico. La **Subcapa de Parte Común** se localiza en la parte central, maneja los canales de acceso, el establecimiento y mantenimiento de la conexión y QoS y se encarga de funciones de adaptación del enlace y Solicitud de Repetición Automática (Automatic Repeat Request, ARQ) para mantener las Tasas de Errores de Bits (Bit Error Rate, BER) dentro de los niveles fijados mientras maximiza el rendimiento en la transmisión de la información, especialmente en el trabajo en bandas de 2-11 GHz en topologías algo más complejas que las PTP y PTM, como lo son las Malla. La **Subcapa de Seguridad** provee autenticación, intercambio de claves seguras y encriptación.

⁵ *Backhaul*: parte de una red de comunicaciones que conecta a otras redes y que transporta tráfico pesado.

La eficiencia en el manejo del tráfico se conduce desde las subcapas MAC hacia la interfaz con la PHY, gracias a la incorporación de esquemas de modulación y codificación que pueden adaptarse para cada suscriptor en la red y que se especifican en el *perfil de flujo*. De esta manera la MAC puede hacer uso eficiente del ancho de banda por perfil, aumentando la confiabilidad y la eficiencia.

Por su parte, el mecanismo de solicitud/entrega de recursos implementado en esta capa se diseñó para ser escalable, eficiente y auto gestionable, de manera que el sistema de acceso no pierda desempeño cuando se presenten múltiples conexiones por terminal, múltiples niveles de QoS y un gran número de usuarios permanentes multiplexados, lo cual representa una ventaja importante frente a los mecanismos basados en contención.

Por otro lado, características como la programación y gestión de reserva de recursos no se especifican en el estándar y se dejan a los fabricantes de dispositivos con el fin de estimular la diferenciación entre productos.

En el Anexo A se realiza una descripción detallada de la MAC, cubriendo sus aspectos más importantes.

1.1.3 Capa PHY. Existen dos especificaciones para la capa física sujetas a las características de propagación de las regiones inferior y superior del espectro en que trabaja el estándar (2–11 GHz y 10–66 GHz) y que respectivamente determinan condiciones de operación NLOS y LOS.

Las señales de frecuencias inferiores pueden atravesar muros sin que ocurra pérdida total de señal y viajar sobre distancias considerables, superiores a 48 kilómetros, con antenas altamente direccionales; estos rangos también se prestan para técnicas complejas como Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) y Acceso Múltiple por División de Código (Code Division Multiple

Access, CDMA) de banda ancha, lo cual conduce a niveles robustos y espectralmente eficientes que se traducen en un número mayor de usuarios por ancho de banda disponible. En la mayoría de los casos, las transmisiones en frecuencias superiores deben cumplir requerimientos de LOS y generalmente se restringen a distancias de pocos kilómetros (por debajo de 20 Km), aunque la ventaja particular en estos rangos es la abundancia de ancho de banda.

Cada capa PHY definida para cada rango de frecuencia cuenta con dos subcapas, una de **Convergencia de Transmisión** y una **Dependiente del Medio Físico (Physical Medium Dependent, PMD)**. A su vez, cada subcapa PMD puede necesitar la definición de una única subcapa de convergencia de transmisión. Además una capa física puede acompañarse de una *entidad de gestión* cuyas funciones no se especifican en el estándar, pero que en general, es responsable de funciones como recoger el estado de la capa dependiente y de la interacción con la gestión del sistema general. Entre las funciones de gestión de la capa PHY se incluyen ajuste de frecuencia, gestión de potencia y compensación del retardo de propagación; la información de gestión específica para esta capa se representa como una *Base de Información de Gestión (Management Information Base, MIB)* y el modelo genérico de gestión de dispositivo es que cualquiera lea o ponga el valor de un parámetro en la MIB.

La capa PHY puede considerarse como provisión de servicios para la MAC, los cuales se acceden a través de un Punto de Acceso al Servicio (Service Access Point, SAP) de la PHY, así la comunicación entre una y otra capa se describe empleando un conjunto de primitivas de servicio que son de tres tipos: para *transferencia de datos*, para *funciones de gestión* y primitivas que tienen importancia local y soportan interacciones subcapa a subcapa relacionadas con el control de la capa.

§ **Capa PHY para 10-66 GHz.** Trabaja en las bandas licenciadas y se conoce como *WirelessMAN-SC* por cuanto al asumir operación en condiciones de LOS opta por emplear modulación por portadora simple, sin embargo, presenta diferentes retos más

allá del método de modulación y que tienen que ver por ejemplo con el método de acceso al medio físico en topologías PTM, el cual se basa generalmente en señales multiplexadas en el tiempo (Time Division Multiple, TDM) transmitidas desde la Estación Base (EB) hacia las Estaciones Suscriptoras (ES) a quienes se les asigna ranuras (intervalos) serialmente, en tanto que en la dirección UL el acceso se basa en una combinación de Acceso Múltiple por División de Tiempo (Time Division Multiple Access, TDMA) y Acceso Múltiple de Asignación por Demanda (Demand Assignment Multiple Access, DAMA).

De otra parte, respecto a sistemas de duplexación soporta tanto Duplexación por División de Tiempo (Time Division Duplex, TDD) como Duplexación por División de Frecuencia (Frequency Division Duplex, FDD), ambos con perfiles de flujo adaptivos en los que la modulación y la codificación se seleccionan dinámicamente sobre un flujo básico; en FDD admite ESs *full-duplex* como también *half-duplex*, aún cuando ello incrementa un poco la complejidad.

§ **Capa PHY para 2-11 GHz.** Recurre tanto al espectro licenciado como no licenciado y al estar provista para operación en condiciones NLOS se ajusta a ambientes en donde el desvanecimiento y la propagación por multitrayectoria son bastante significantes⁶. Esta capa consta de tres especificaciones, cada una provista para interoperabilidad, ellas son:

- **WirelessMAN-SC2**, que utiliza el formato de modulación por portadora simple.
- **WirelessMAN-OFDM**, que utiliza multiplexación por división de frecuencia ortogonal implementando la Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transformation, FFT) de 256 puntos, o lo que es lo mismo, con 256 subportadoras y acceso TDMA y es obligatoria para bandas no licenciadas.
- **WirelessMAN-OFDMA**, que utiliza Acceso al Medio por División de Frecuencia Ortogonal (Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access, OFDMA) con

⁶ Los mecanismos utilizados por el 802.16 para operación NLOS se describen en la sección 1.5.3 de este capítulo.

2.048 subportadoras el cual es provisto por subconjuntos de portadoras para receptores individuales.

En el Anexo B se realiza una descripción profunda de la PHY, abarcando sus características técnicas más sobresalientes.

1.1.4 WiMAX. Conscientes de la importancia de lograr la conformidad con los estándares, algunos promotores del 802.16 formaron la organización de Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas (Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX). El Foro WiMAX es una organización de la industria sin ánimo de lucro fundada en abril de 2.002 en anticipo de la publicación de las especificaciones iniciales del estándar, cubriendo las bandas de 2 a 66 GHz para WMAN; esta organización está formada por proveedores líderes de componentes y equipos inalámbricos, como también operadores de red e integradores de sistemas. La misión del Foro es abogar por la estandarización y aceptación del nuevo protocolo WMAN a través de la conformación de estándares uniformes que permitan la compatibilidad e interoperabilidad de componentes y sistemas de Acceso Inalámbrico de Banda Ancha (Broadband Wireless Access, BWA).

Actualmente WiMAX está preparando las bases para desarrollar planes de pruebas de conformidad, seleccionando etiquetas de certificación acreditada y planeando las primeras conferencias que caracterizan los equipos interoperables basados en estándares. Esta etiqueta de Certificado WiMAX servirá como sello de aprobación final de equipos de proveedores que han sido probados exitosamente y se considera cumplen completamente, son compatibles e interoperables con sistemas de interconexión del 802.16 de acuerdo a la exigencia de estándares de excelencia del Foro.

El Foro WiMAX también promueve el desarrollo de *perfiles de sistemas*, que son implementaciones específicas, selecciones de opciones dentro del estándar para formar conjuntos particulares de ofertas de servicio y grupos de suscriptores. Por lo tanto WiMAX es para 802.16 como la Alianza de Fidelidad Inalámbrica (Wireless Fidelity

Alliance, Wi-Fi) es para 802.11. Cabe aclarar que el término WiMAX se ha convertido en sinónimo del Estándar IEEE 802.16, por lo que en adelante se empleará indistintamente cualquiera de ellos para referirse a la tecnología, mientras que a la Organización se hará alusión como Foro WiMAX.

1.2 INTRODUCCION AL ESTANDAR 802.11

El estándar IEEE 802.11 se basa en el mismo marco de estándares que Ethernet, garantizando un nivel de interoperatividad excelente y asegurando una implantación sencilla de las funciones y dispositivos de interconexión Ethernet/WLAN. El estándar 802.11 y sus derivados (tales como 802.11a, 802.11b, 802.11g) se han desarrollado ampliamente en escenarios de LAN comerciales, gubernamentales y residenciales y en algunas aplicaciones en redes de servicio público, principalmente *HotSpots*⁷, proporcionando cobertura del rango de cientos de metros; las características generales de estos se indican en la Tabla 1-1. Se prevé que se intentarán soluciones 802.11 de precio bajo en redes predominantemente metropolitanas atendidas mejor por equipo basado en WiMAX.

Tabla 1-1. Características generales del 802.11(a, b y g).

Estándar	802.11^a	802.11b	802.11g
Año de aprobación	1.999	1.999	2.003
Frecuencia	5 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz
Velocidad de transmisión	<54 Mbps	<11 Mbps	<54 Mbps
Compatibilidad	802.11 ^a	802.11b	Hacia atrás con 802.11b
Canales sin traslape	12 de 13	3 de 11	3 de 11

La Tabla 1-2 resume las principales técnicas de modulación utilizadas en WLAN y las relaciona con las velocidades alcanzadas; Igualmente, otras revisiones a la tecnología 802.11 con algunas características principales se muestran en la Tabla 1-3.

⁷ Un *HotSpot* es un punto de acceso inalámbrico público donde los usuarios pueden conectarse a Internet; se puede encontrar de forma gratuita o pagando una tarifa por el acceso.

Tabla 1-2. Técnicas de Modulación empleadas en WLAN.

ESTANDAR WLAN	MODULACIÓN	VELOCIDAD ALCANZADA (Mbps)
802.11	Modulación de Cambio de Fase Binaria Diferencial (Differential Binary Phase Shift Keying, DBPSK)	≤ 1
	Modulación de Cambio de Fase en Cuadratura Diferencial (Differential Quadrature Phase Shift keying, DQPSK)	≤ 2
	Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS)	≤ 2
	Espectro Ensanchado por Salto de Frecuencia (Frequency Hopped Spread Spectrum, FHSS)	≤ 2
802.11^a	Modulación de Cambio de Fase Binaria (Binary Phase Shift Keying, BPSK)	6 – 9
	Modulación de Cambio de Fase en Cuadratura (Quadrature Phase Shift keying, QPSK)	12 – 18
	Modulación por Amplitud en Cuadratura de 16 pasos (16-Quadrature Amplitude Modulation, 16-QAM)	24 – 36
	Modulación por Amplitud en Cuadratura de 64 pasos (64-QAM)	48 – 54
802.11b	Modulación de Código Complementario (Complementary Code Keying, CCK)	≤ 2
	Espectro Ensanchado por Secuencia Directa de Alta Velocidad (High Rate Direct Sequence Spread Spectrum, HR/DSSS)	≤ 11
802.11g	CCK	≤ 11
	OFDM	≤ 54

Tabla 1-3. Revisiones del Estándar 802.11.

REVISIÓN AL ESTANDAR	DESCRIPCIÓN
802.11d	Especificación para diferentes dominios de regulación.
802.11e	Proporciona QoS y permite velocidades de hasta 54Mbps entre 2 y 5 GHz.
802.11f	Comunicación entre Puntos de Acceso (Access Point, AP) gracias al Protocolo entre APs (IAPP).
802.11h	Incorporación de Selección Dinámica de Canal (Dynamic Channel Selection, DCS) y Control de Potencia de Transmisión (Transmission Power Control, TPC).
802.11i	Mejoras en Seguridad basadas en autenticación y encriptación.
802.11j	Coexistencia entre IEEE, ETSI, HyperLAN2, la Asociación de Industrias y Negocios de Radio y la Red de Acceso Inalámbrico de Alta Velocidad Tipo a (High Speed Wireless Access Network Type a, HISWANA).
802.11m	Correcciones y clarificaciones para mantenimiento de redes inalámbricas

1.3 ARQUITECTURA GENERAL DE UNA WMAN

Como se ilustra en la Figura 1-3, en general, la arquitectura de una WMAN cuenta con tres entidades lógicas: el **núcleo de red**, la **red de acceso** y la **red cliente**.

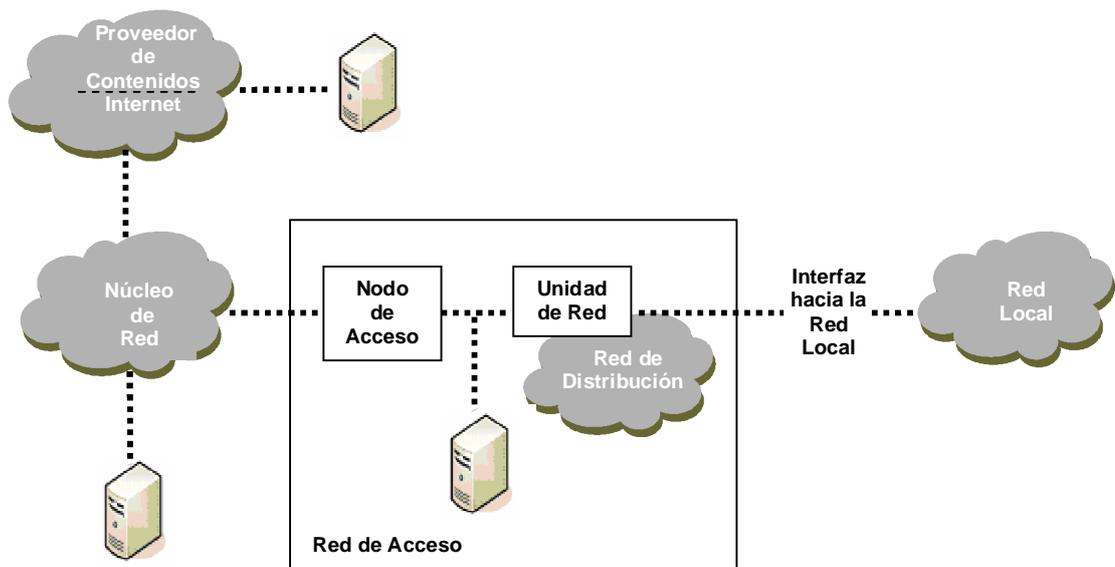


Figura 1-3. Arquitectura general de una WMAN.

El **núcleo de red** provee desempeño alto para transportar información entre proveedores de contenido y la red de acceso. Aquí, factores como la velocidad y la manejabilidad son críticos. Algunas de sus funciones principales son:

- Conmutación, enrutamiento y transmisión.
- Concentración de tráfico para los diferentes clientes.
- Manejo del registro de servicio para múltiples usuarios.
- Multiplexación y conmutación para redes de acceso diversas.
- Mejoramiento de la QoS.

La **red de acceso** es la parte del *carrier* de la red que alcanza el equipo del cliente, por lo tanto aquí se hace referencia al último kilómetro de la red. Sus principales funciones se realizan conjuntamente con el núcleo de red y con la red del cliente, lo que supone y exige, cantidad y calidad de interfaces entre cada elemento; estas son:

- Transmitir, conmutar, enrutar y multiplexar tráfico desde el cliente hasta el núcleo de red.
- Clasificar tráfico para suscriptores que requieren QoS, permitiendo que la capa de acceso diferencie entre tráfico que requiere ancho de banda garantizado y el que no.
- Implementar QoS.
- Permitir el tunelaje y/o la encapsulación de paquetes.
- Implementar protocolos de la subcapa MAC.
- Implementar filtrado de paquetes.
- Autenticar usuarios.

La **red del cliente** consta del equipo de usuario (Customer Premise Equipment, CPE) que permite su acceso a las capacidades que le ofrece el núcleo de red a través de la red de acceso. En la interconexión, se distinguen el medio de distribución (cableado o inalámbrico), como elemento principal, y el Equipo Terminal (Terminal Equipment, TE), que interactúa directamente con el usuario.

Para enlaces de interconexión de gran distancia la arquitectura que propone el 802.16 es la de una red *extremo a extremo*, en la que cada nodo puede comunicarse entre sí, de igual a igual, con las características siguientes:

- **Aplicabilidad:** en el desarrollo tanto en bandas licenciadas, como no licenciadas.
- **Categorías del proveedor de servicio:** posibilidad de adopción de la Red de Acceso Radio (Radio Access Network, RAN) por diversos tipos de operadores.

- **Interworking⁸**: a través de una arquitectura que permita la integración con operadores de núcleo de red del Protocolo de Internet (Internet Protocol, IP), como por ejemplo Línea Digital de Abonado (Digital Subscriber Line, DSL), cable y 3G, por medio de interfaces estandarizadas basadas en IP.
- **Provisionamiento y Administración**: flexibilidad para adaptarse a una variedad de clientes y esquemas de registro y gestión, basados en el desarrollo de la industria de la estandarización.
- **Conectividad IP**: soporte a redes mixtas IPv4 e IPv6 que interconecten puntos finales de la red y sus respectivos esquemas de gestión.
- **Servicios IP**: soporte a aplicaciones del Protocolo de Control de Transmisión (Transmission Control Protocol, TCP) y del Protocolo de Datagramas de Usuario (User Datagram Protocol, UDP) en tiempo real o no.
- **Seguridad**: soporte para autorización de ESs, autenticación bilateral de usuario basada en una variedad amplia de mecanismos como *username/password*, certificados X.509, Módulo de Identidad de Suscriptor (Subscriber Identity Module, SIM), SIM Universal (Universal SIM, USIM), Módulo Removible de Identidad de Usuario (Removable User Identity Module, RUIM), y soporte de servicios como integridad de datos, mecanismos de protección y confidencialidad

Por lo tanto, el marco de arquitectura propuesto por el 802.16 se basa en puntos específicos como:

- Uso extensivo de enrutamiento IP, protocolos de QoS e ingeniería de tráfico en la RAN, como también integración con los Proveedores de Servicio de Internet (Internet Service Provider, ISP), habilitando la interoperabilidad multivendedor.
- Arquitectura RAN independiente de cualquier otra red interconectada.
- Acoplamiento bajo con redes 3G y Wi-Fi.
- Esquema de seguridad extremo a extremo compatible con Wi-Fi.

⁸ Capacidad de un sistema o componentes, posiblemente de diferentes orígenes, para trabajar juntos ejecutando alguna tarea y que depende de estándares que definan las interfaces entre ellos.

1.3.1 Arquitectura Extremo a Extremo del 802.16. Un desarrollo típico basado en el estándar 802.16 se consolida a través de una relación entre la ES y un AP (o EB), como se ilustra en la Figura 1-4. La RAN comprende el conjunto de APs y enrutadores o *switches* de interconexión, que se interconecta a través de un operador IP con una o más redes externas; por su parte el Servidor de Nombre de Dominio (Domain Name Server, DNS) media entre los paquetes de datos IP y los enlaza con la Red Telefónica Pública Conmutada (RTPC), redes 2.5G, 3G, Wi-Fi y servicios de Red Privada Virtual (Virtual Private Network, VPN).

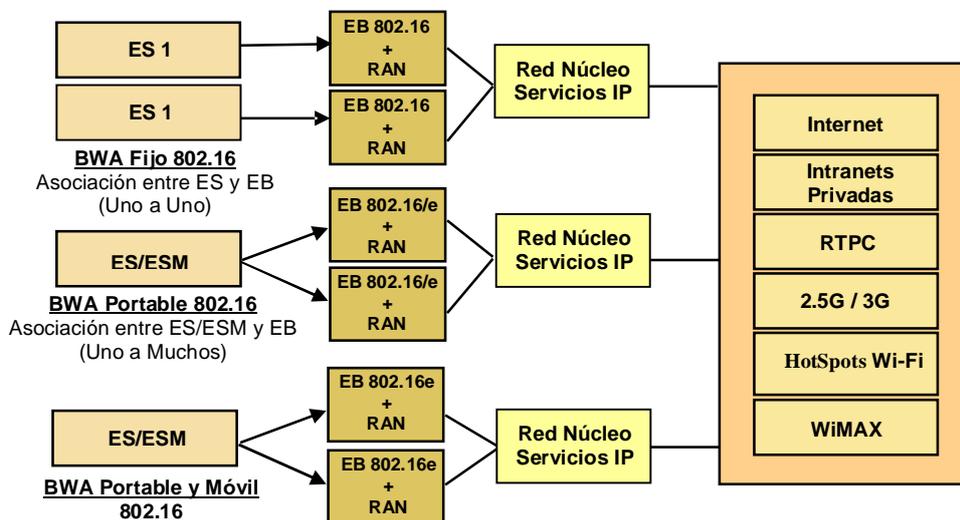


Figura 1-4. Evolución de la Arquitectura del 802.16.

En esta arquitectura otro aspecto muy importante es la consideración de QoS. Modelos de acceso fijo y portables requieren únicamente soporte de QoS para escenarios particulares; por ejemplo la portabilidad introduce el concepto de transferir el Acuerdo de Nivel de Servicio (Service Level Agreement, SLA) entre los APs, obviando la necesidad de QoS, a diferencia de los esquemas de movilidad completa. La RAN requiere entregar ancho de banda y/o QoS por demanda en sus modos de operación como soporte para diversos servicios, generalmente en tiempo real; además necesita manejar tolerancia al

retardo en aplicaciones como VoIP y juegos. Finalmente, el desacople de la RAN con cualquier otro operador permite facilitar la migración al 802.16e.

1.3.2 Arquitectura de Referencia del 802.16. En ella se identifican varias entidades funcionales e interfaces interoperables, como se indica en la Figura 1-5. La red se compone esencialmente de tres agregaciones funcionales superiores: la Estación Suscriptora Móvil o Fija (ESM/ES), la RAN 802.16e y la Interconexión con operadores IP. La capa IP maneja los recursos solicitados por la RAN y además provee servicios de núcleo de red como administración de direcciones, autenticación, servicios de autorización y provisión para las ESM/ES 802.16. La interconectividad en la RAN, especialmente con respecto a redes IP remotas, se basa en el empleo extensivo de conjuntos de protocolos IP nativos, que a su vez pueden desplegar economías de escala. Dentro de la RAN se pueden describir tres entidades lógicas: Nodo de Servicio de la Red Radio (Radio Network Service Node, RNSN), EB y ESM/ES.

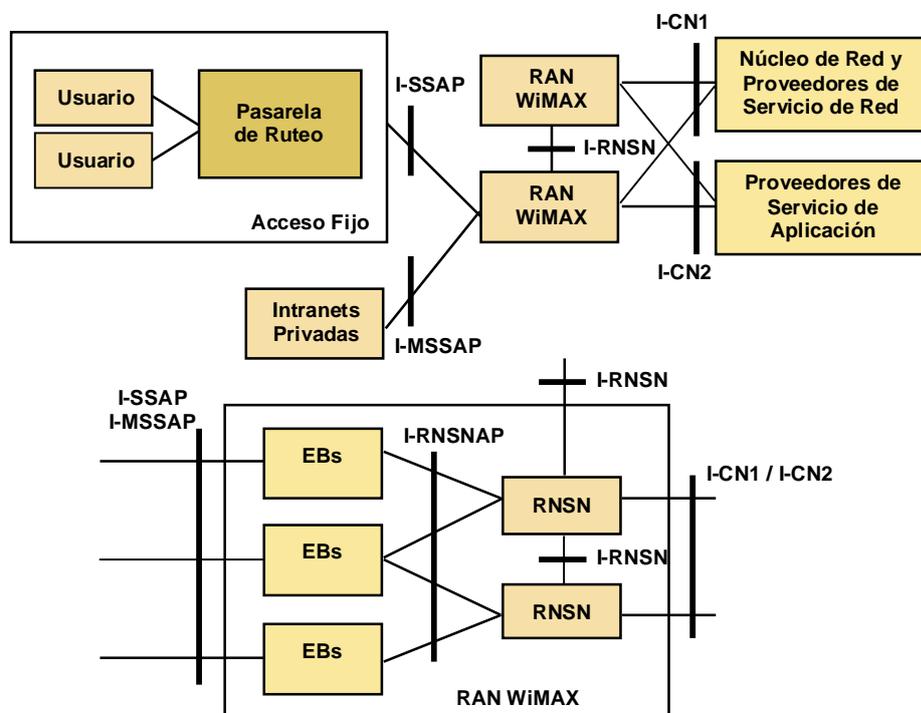


Figura 1-5. Arquitectura de Referencia 802.16.

- § **RNSN (Radio Network Service Node).** Entidad de red lógica que sirve de interfaz entre la RAN y el operador de red IP, algún Proveedor de Servicio de Aplicación (Application Service Provider, ASP) o red de servicios como la RTPC, Internet, Intranet empresariales, entre otros. Cada instancia del RNSN gestiona un conjunto de EBs a través de un *backhaul* híbrido cableado/inalámbrico y es responsable de la Gestión de Recursos de Radio (Radio Resource Management, RRM). Funciones como QoS, movilidad y seguridad se gestionan cooperativamente como una red administrada por las EBs. Un RNSN también puede hospedar funciones centralizadas específicas de la RAN, como paginación de grupos y agentes macros de movilidad; igualmente puede suministrar una infraestructura de red conveniente, por ejemplo, para Pasarelas de Paquetes de Datos en redes de Tercera Generación (3 Generation Partnership Project, 3GPP) o Nodos de Servicios de Paquetes en una red 3GPP2.
- § **EB (Estación Base).** Entidad lógica que provee funcionalidades sobre el enlace según lo establecido en la estandarización, incluyendo control de admisión de ES y la programación RRM del UL y del DL; suele llamarse AP por su analogía con éste. Una EB puede estar en el límite de una subred haciendo las veces de un *Router*⁹ y puede implementarse como una entidad integrada por subcapas MAC/PHY, o tomarse sobre una arquitectura distribuida que involucre un Control AP (AP Control, APC) y un Transceptor AP (AP Transceiver, APT) que pueda soportar grupos de células. Una combinación de un APC con uno o más APTs puede ofrecer celdas multisector. Cuando múltiples APT se gestionan por un APC, el APC hospeda instancias comunes MAC a través de los APT, o puede tener una instancia MAC por cada uno.
- § **ESM/ES (Estación Suscriptora Móvil/Fija).** La estación suscriptora móvil o fija es la tercera agregación funcional más importante en una arquitectura extremo a extremo, la cual permite la recepción de información en el lado cliente y la transmisión desde este hacia la EB.

⁹ Los *Routers* y Pasarelas poseen capacidad de enrutamiento (niveles 3 y 4 OSI) de los paquetes de información que los atraviesan, además realizan mayor procesamiento de la información y tienen funcionalidades avanzadas en *networking* y seguridad; las pasarelas pueden configurarse como EB, repetidores e incluso como *bridges*.

Con respecto a las interfaces interoperables, se distinguen las siguientes:

§ **I-SSAP e I-MSSAP**: interfaces del plano de control, datos, gestión y servicio entre la ES móvil o fija y el AP. Incluye las funciones siguientes:

- Control de admisión y capacidades de conectividad de la ESM/ES.
- Seguridad extremo a extremo sobre el enlace.
- Gestión de Movilidad.
- Gestión de Dispositivos.
- Intercambio de datos de subida y bajada.
- Autorización y tunelaje para servicios IP especializados.
- Señalización de la capa de aplicación extremo a extremo.
- Funciones avanzadas como gestión de potencia, compresión y confiabilidad de datos.

§ **I-CN1 e I-CN2**: interfaces entre los planos de control, datos y gestión entre la RAN 802.16 y el núcleo de red del operador (con interfaces que cambian de una red remota a otra). I-CN2 representa la misma interfaz, pero colindante con las redes de ASP. Las dos interfaces se ubican en la RNSN y conforman una interfaz IP consistente para diversos núcleos de red. Las funciones modeladas sobre esta interfaz pueden proveerse por un conjunto de servidores (como DHCP¹⁰, DNS¹¹, MEDIA GATEWAY), y entre las principales están:

- Asignación de parámetros de Ingeniería de Tráfico para aprovisionamiento de QoS tanto para el tráfico del plano de datos como de control.
- Autenticación de usuarios vía intermediarios de Autenticación, Autorización y Contabilidad (Authentication, Authorization, and Accounting, AAA) y servidores.

¹⁰ Protocolo de Configuración Dinámica de Host (Dynamic Host Configuration Protocol, DHCP).

¹¹ Servidor de Nombre de Dominio (Domain Name Server, DNS).

- Servicios de autorización, control de acceso y carga.
- Conectividad, gestión y seguridad IP.
- Resolución de problemas en la red de acceso, problemas específicos de aplicación y eventos en el manejo de la RAN.
- Gestión de movilidad macro y tráfico de datos.

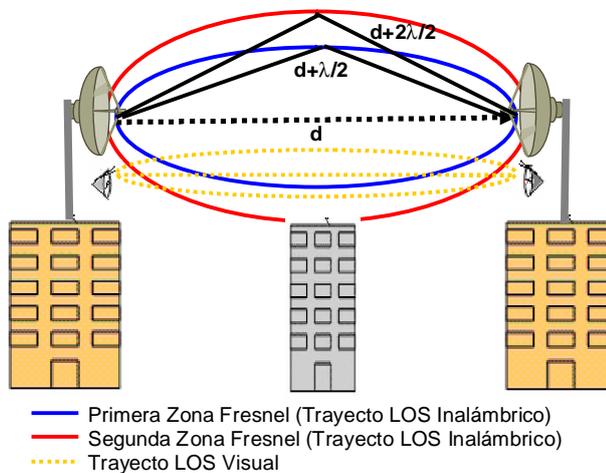
§ ***I-RNSN e I-RNSNAP:*** *I-RNSN* es la interfaz del plano de control, gestión y datos entre dos RNSN que lógicamente pueden demarcarse por dos nubes RAN; generalmente maneja el control de gestión de movilidad inter RAN y el tráfico en los planos de datos. La *I-RNSNAP* representa la misma interfaz, pero entre diferentes APs (o EBs); esta demarca los dos puntos extremos de la RAN a través de los cuales se despliegan las funciones de micro y macro movilidad.

1.4 LOS Y NLOS

Cuando una señal inalámbrica encuentra una obstrucción, esta se atenúa y a menudo se refleja o difracta. Con MAN inalámbricas exteriores generalmente la atenuación es tan grande que no se mantiene suficiente señal para detectarse al otro extremo del enlace, de allí la importancia de un buen diseño que logre una trayectoria de LOS inalámbrica.

1.4.1 LOS. Esta es una trayectoria que no tiene obstrucciones que bloqueen, difracten, absorban o atenúen significativamente la señal inalámbrica; requiere típicamente un trayecto de LOS visual más un trayecto despejado adicional para la propagación de la señal inalámbrica. Al respecto, el concepto de Zona de Fresnel¹² provee un método para calcular la distancia libre que una señal inalámbrica necesita desde un obstáculo para asegurar que este no atenúa la señal. Esto se indica en la Figura 1-6.

¹² Zona Fresnel: consiste en una serie de círculos concéntricos alrededor de un punto central de transmisión, en que cada círculo se define por la relación de fase entre el haz principal y dos lóbulos laterales dominantes. Las fluctuaciones de fase entre una zona y otra, hacen que las reflexiones del lóbulo lateral lleguen en fase o no con el lóbulo principal en recepción. Por lo menos el 60% de dicha zona debe liberarse para que la señal inalámbrica sufra menor atenuación.



La Zona de Fresnel libre se pierde con la curvatura de la Tierra y la LOS óptica es mínima en el horizonte

Figura 1-6. LOS Visual e Inalámbrica.

1.4.2 NLOS. Este término se aplica a una cantidad de tecnologías distintas, de capacidades y grados de madurez diferentes, que a pesar de esto presentan un desempeño uniforme en lo que a configuraciones NLOS se refiere. En general, NLOS engloba cualquier técnica tendiente a reducir, más no eliminar por completo, los efectos de obstrucciones físicas. El éxito de la técnica simplemente se mide directamente en términos de mayor o menor intensidad de la señal en el extremo del frente de radio, donde inicia la demodulación de la señal. Actualmente, entre los fabricantes de equipos se piensa que una red trabajará mejor en la región baja de las microondas si dispone de equipos NLOS.

1.4.3. Técnicas empleadas por WiMAX para operación NLOS. El estándar IEEE 802.16, gracias a técnicas de modulación, métodos de acceso al medio y en general mejoras en la capa MAC y artificios complejos en la capa PHY permite el trabajo en la banda de 2 GHz a 11 GHz sin exigir una trayectoria LOS inalámbrica, es decir, trabaja con NLOS. Algunas de estas técnicas se describen a continuación:

- § **Desempeño Básico de Radio.** Incrementando la sensibilidad de los equipos y la selectividad del canal mientras se proveen capacidades altas de sobrecarga y se manejan muy bajos niveles de ruido en el receptor, por lo cual es posible mejorar las habilidades para trabajar con señales débiles; en otras palabras, ingeniería de RF e implementación de circuitos de alta calidad.
- § **Técnica de Multiplexación.** OFDM es la única técnica de multiplexación avanzada especificada en el estándar WiMAX, presentando inmunidad alta a la multitrayectoria, siendo capaz de operar con retardos de propagación grandes y permitiendo que los equipos operen con señales más débiles que con otras técnicas de multiplexación, por lo cual admite la recuperación de una señal utilizable en escenarios marginales; sin embargo el funcionamiento en condiciones NLOS no se garantiza al 100%, aunque en condiciones cercanas a NLOS es la solución más apropiada.
- § **Modulación Adaptiva.** La clave de esta técnica es que incrementa el rango en que esquemas robustos de modulación pueden utilizarse, conforme mayor sea la calidad del enlace, ajustando dicho esquema sobre la Relación Señal a Ruido (Signal Noise Ratio, SNR), otorgando así mayor capacidad al sistema y flexibilidad sobre condiciones de desvanecimiento reales.
- § **Sistemas de Antena Avanzados (AAS).** Se basan en tecnologías que utilizan más de un elemento de antena, proporcionando capacidades y rangos mejorados al sistema. En proporción al número de elementos de antena utilizados se incrementan la eficiencia espectral, la SNR (por combinación coherente de múltiples señales), la cobertura hacia usuarios simultáneos (por reutilización de frecuencias entre celdas), como también se disminuye o rechaza la interferencia co-canal. Con estos sistemas la diversidad puede aprovecharse en las dimensiones espacial (antena), temporal (tiempo) o espectral (frecuencia).

Los diseños básicos para reducir el desvanecimiento y aumentar la ganancia son:

- **Antenas en sistemas de Diversidad:** son el tipo más simple que se conoce y uno de los más aplicados, aquí se despliegan dos o más antenas, de las cuales la circuitería radio selecciona la que posee mejor señal de multitrayectoria entre muestras diferentes de la misma. Requieren tomar cada antena e independizar las características de cada canal, recurriendo a polarizaciones diferentes. Complementando este diseño con *coherencia en tiempo*¹³ se logra un desempeño óptimo.
 - **Arreglos en Fase:** son un poco más sofisticados que los anteriores, aquí las salidas o entradas de los diferentes elementos interactúan constructiva o destructivamente para formar haces de casi cualquier forma deseada, dirigiendo la energía hacia los lados requeridos; esto puede hacerse tanto en el transmisor como en el receptor (por el Teorema de Reciprocidad).
 - **Antenas Inteligentes:** se han desarrollado esencialmente en dos tipos de antenas de arreglo adaptivo, las de *haz conmutado* (combinan los lóbulos de diferentes elementos de antena en un número finito de yuxtaposiciones) y las de *haz dirigido* (cuyo haz es infinitamente variable y mucho más flexible), que requieren mucha más capacidad de procesamiento, pero reducen la necesidad de sectorización porque también pueden incrementar la reutilización de frecuencia.
- § **ARQ.** Es una opción de la capa MAC provista para conexiones unidireccionales, que puede habilitarse sobre una conexión básica durante la inicialización o cuando se presenta algún cambio en la configuración; sin embargo, en una conexión no pueden mezclarse tráfico con ARQ y sin ARQ. La información de confirmación de ARQ puede enviarse como un mensaje MAC a través de la conexión existente y no puede fragmentarse; el receptor por su parte, se limita a generar un reconocimiento positivo o negativo.

¹³ Período sobre el cual la onda propagada mantiene una fase relativamente constante.

La secuencia de estados para transmitir un fragmento ARQ se muestra en la Figura 1-7. Cualquier fragmento ARQ inicia como *no enviado*, una vez enviado pasa al estado *señalado* por un período de tiempo llamado *intervalo de reintento*, mientras se encuentre en dicho estado se reconoce y entonces puede *descartarse*, o cambiar a estado *esperando por retransmisión* si el reconocimiento ha sido negativo o si el intervalo ha expirado; un fragmento ARQ también puede cambiar del estado *esperando por retransmisión* a *descartado* si se recibe un reconocimiento positivo o si expira otro intervalo.

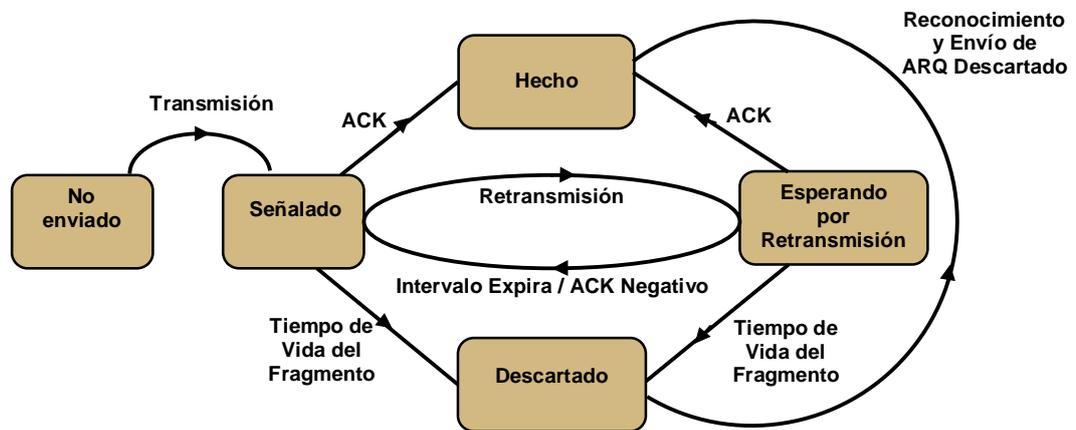


Figura 1-7. Máquina de estados del transmisor ARQ.

- § **Selección Dinámica de Frecuencia (Dynamic Frequency Selection, DFS).** Es una técnica que le permite al sistema moverse de una banda a otra, cuando se desea evitar canales ocupados por otros, o cuando se tiene un Indicador de Intensidad de Señal Recibida (Received Signal Strength Indicator, RSSI) bajo, o cuando se presenta interferencia de otros sistemas; generalmente se basa en una comparación de un umbral de la Relación Portadora a Ruido (C/I) frente al tiempo libre de las medidas de RSSI, es particularmente efectiva para combatir la interferencia desde y hacia sistemas terrestres, e inefectiva para enfrentar la interferencia desde y hacia sistemas aerotransportados; se requiere especialmente para evitar interferencia con servicios primarios que utilizan espectro no licenciado.

§ **Control de Potencia de Transmisión (Transmission Power Control, TPC).** Es una técnica que permite ajustar adaptivamente la potencia de un transmisor para mantener el nivel de señal recibido en un rango deseado. Los algoritmos de TPC se implementan en la EB, que envía a las ESs la información relacionada para regular el nivel de potencia de transmisión (en recepción éste es un valor predeterminado), reduciendo así todos los consumos de potencia en la ES y la interferencia con otras EBs. Con control de potencia, la Potencia Radiada Isotrópica Efectiva (Equivalent Isotropic Radiated Power, EIRP) se reduce de acuerdo al margen del enlace (niveles de potencia transmitida proporcionales a los rangos de distancia del enlace). Sin embargo, como el control de potencia también se afecta por los niveles de C/I, se recomienda emplearla, en donde sea posible, junto con DFS, pues tiende a ser la técnica más efectiva de mitigación de interferencia.

1.5 RUIDO E INTERFERENCIA EN EL AMBIENTE RADIO

Diferentes aspectos afectan el camino de la señal de radio entre uno y otro punto de la red, interfiriendo en el desempeño correcto de los enlaces y en general perjudicando tópicos importantes como cobertura, capacidad y disponibilidad, entre otros. Algunos de los aspectos más relevantes en lo que a generación de interferencia se refiere son: atenuación de la señal radio al propagarse, diseños de antena que afectan en gran medida la energía transmitida y recibida, el desvanecimiento y retardo provocados por la dispersión y la multitrayectoria, equipos de redes próximas trabajando en canales cercanos e incluso en los mismos y otras fuentes de ruido e interferencia sin control del operador de la red o de los fabricantes de equipos.

Para enfrentar y superar los efectos de las fuentes de interferencia se debe recurrir a técnicas diferentes con el fin de maximizar el nivel de la señal y minimizar la presencia de señales perjudiciales para la transmisión. Técnicamente, se busca que la señal que llegue al receptor esté por encima del nivel umbral de recepción definido por la sensibilidad del dispositivo, procurando además que el nivel de ruido en la entrada sea

menor que el de la señal de información. A continuación, en la Tabla 1-4 se dan a conocer las principales fuentes de ruido e interferencia en los enlaces y se proponen algunas soluciones.

Tabla 1-4. Algunas Fuentes de Ruido e Interferencia y sus Soluciones.

FUENTE DE RUIDO	CONSECUENCIA	SOLUCIÓN (antes de puesta en marcha)	SOLUCIÓN (después de puesta en marcha)
Desconocimiento del patrón de radiación de antena.	Disminución del desempeño por ruido introducido desde direcciones diferentes.	Informarse y seleccionar una antena más directiva que cubra solo el área deseada.	Investigar, diseñar e instalar un nuevo sistema de antena.
Transmisores cercanos, dentro o fuera de la banda de operación.	Reducción del desempeño por ruido introducido de equipos cercanos.	Levantamiento de Sitio con apoyo de un analizador de espectro.	Desactivar temporalmente la red y utilizar un analizador para reubicar el nodo o reconfigurar el sistema de antena. Utilizar un filtro pasa banda entre antena y radio para mejorar el desempeño.
Interferencia de otros transmisores (como APs) en la misma red.	Reducción general del desempeño en todos los transmisores.	Elaboración de un plan de frecuencias y diseño de red que aseguren aislamiento entre sistemas de antena en las mismas frecuencias.	Desactivar temporalmente la red e incluir técnicas de aislamiento entre sistemas de antena.
Colisiones de paquetes en los enlaces.	Reducción del desempeño para tráfico liviano y pesado.	Elegir equipo capaz de seleccionar usuarios y que utilice técnicas para evitar colisiones.	Actualizar el SW de los nodos con capacidad de selección de usuarios, o instalar un gestor de ancho de banda que limite la capacidad de cada canal según el estado del enlace.
Multitrayectoria.	Altas tasas de error y consecuente deterioro del desempeño.	Evitar sitios propensos a reflexiones. Emplear polarización circular.	Reubicar los nodos en áreas menos reflectivas. Sustituir los sistemas de antena por otros con polarización cruzada.

1.6 MODELOS DE PROPAGACION NLOS

Varios modelos han intentado caracterizar el ambiente RF NLOS y predecir la intensidad de sus señales, basándose en medidas empíricas, utilizando predicciones de gran cobertura para sistemas de radio comunicaciones y aplicaciones celulares,

proporcionando estimativos a cerca de las pérdidas en el trayecto, considerando la distancia entre el transmisor y el receptor, factores del terreno, altura de las antenas en los extremos y frecuencias celulares; desafortunadamente ninguna de estas opciones se dirige adecuadamente a las necesidades de acceso fijo de *broadband*.¹⁴

1.6.1 Modelo AT&T. AT&T Inalámbrica recolecta datos en algunas áreas de los Estados Unidos para evaluar con mayor precisión el ambiente RF inalámbrico fijo. El modelo de AT&T desarrollado a partir de los datos recopilados se ha validado en sistemas inalámbricos fijos y ha generado resultados buenos. Este modelo es la base del aceptado en la industria y es el utilizado por cuerpos de estandarización como IEEE 802.16¹⁵. El modelo de pérdidas de trayecto de AT&T incluye parámetros como altura de antenas, frecuencia de portadora y tipos de terreno.

1.6.2 Modelos SUI. El modelo de la Universidad Interina de Stanford (Stanford University Interim, SUI) es la extensión más reciente del modelo de AT&T Inalámbrico, es un modelo estadístico y establece las siguientes categorías de terreno:

- **Categoría A.** Densidad de vegetación Alta/Moderadamente más Alta.
- **Categoría B.** Densidad de vegetación Pareja/Moderadamente Alta.
- **Categoría C.** Densidad de vegetación Pareja/Suave.

Estas categorías proveen un método simple que ofrece más precisión al estimar las pérdidas en el trayecto del canal RF en una situación NLOS. El modelo puede representar las pérdidas experimentadas en el trayecto dentro de un enlace RF real, por lo que se seleccionó para el diseño, desarrollo y pruebas de tecnología WiMAX (en seis escenarios diferentes, SUI 1 a SUI 6), prediciendo con mayor precisión la probabilidad de

¹⁴ Otros modelos para LOS son: *de propagación* (a gran escala y de pequeña escala) y *de pérdida de trayectoria* (OKURA, HATA, PCS Extensión del modelo HATA); disponibles en www.iitk.ac.in/mladgp/Thesis_Presentation_Draft.pdf

¹⁵ La adopción del modelo por parte del IEEE se referencia en 802.16.3c-01/29r4 "Modelos de Canal para Aplicaciones Fijas Inalámbricas".

cobertura en el sector de una EB, sin embargo, no reemplaza el planeamiento detallado de sitio, pero provee cálculos previos al iniciar una planeación real, lo cual es importante para establecer actividades que consideren factores específicos del ambiente, interferencia co-canal y efectos del terreno.

1.6.3 Probabilidad en la Predicción de Cobertura. En condiciones de LOS, los rangos de cobertura generalmente dependen de la línea de vista asegurada al librar la zona de Fresnel. En condiciones NLOS se maneja el concepto de disponibilidad de cobertura, la cual se expresa como un porcentaje y representa la probabilidad estadística de cobertura instalada para clientes potenciales. Por ejemplo, un 90% de probabilidad de cobertura significa que un 90% de clientes potenciales bajo un área definida de cobertura tendrá la suficiente calidad de señal que asegure una instalación exitosa. En otras palabras, si existen 100 clientes potenciales en un área de cobertura apropiada, el 90% de la capacidad podrá ser instalada aún en presencia de obstrucciones entre EB y ES. El proceso de estandarización del radio enlace WiMAX permite disponer de herramientas de planeación RF para el desarrollo de aplicaciones NLOS específicas, puesto que la planeación RF y las predicciones de cobertura requieren una integración estrecha con la tecnología NLOS, asegurando precisión en el conocimiento de cada cliente a instalar.

1.7 NORMATIVIDAD Y REGULACION

Las redes inalámbricas solo pueden operar en el espectro asignado por los reguladores y deben seguir reglas que gobiernan la forma en que este puede emplearse, por ello tanto fabricantes como usuarios de las tecnologías WLAN y WMAN dependen de las decisiones de los reguladores sobre la distribución del espectro y las reglas de su uso. Uno de los principales organismos de regulación es la ITU, que entre sus actividades gestiona el espectro de frecuencias radioeléctricas para que los sistemas de radiocomunicación funcionen sin interrupción y proporcionen servicios inalámbricos fiables. Actualmente está en curso la relación entre ITU, IEEE y ETSI para incorporar los estándares IEEE 802.16 y ETSI BRAN BWA en las Recomendaciones de la ITU.

WiMAX está habilitado para trabajar tanto en espectro *licenciado* como *no licenciado* y aunque muchos países tienen asignaciones del tipo licenciado, generalmente para operadores alternos, aún queda gran parte del espectro sin determinar, especialmente en los países en desarrollo, en donde no se hace mención a la asignación de espectro para la tecnología WiMAX. En este sentido, Colombia ha iniciado un proceso de evolución en su regulación para incluir la utilización de tecnologías BWA como un factor que impulse el desarrollo del País, lo cual se aborda posteriormente en esta sección. Las bandas asignadas y su utilización a nivel mundial se indican de la Figura 1-8 a la Figura 1-12.

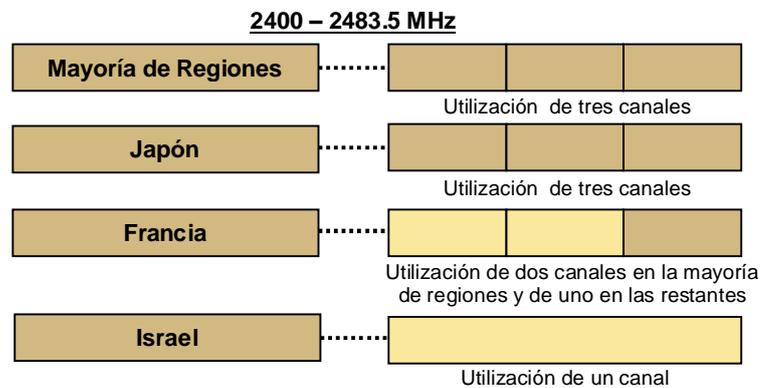


Figura 1-8. Uso mundial de la banda de 2.4 GHz para WLAN (802.11b y g).

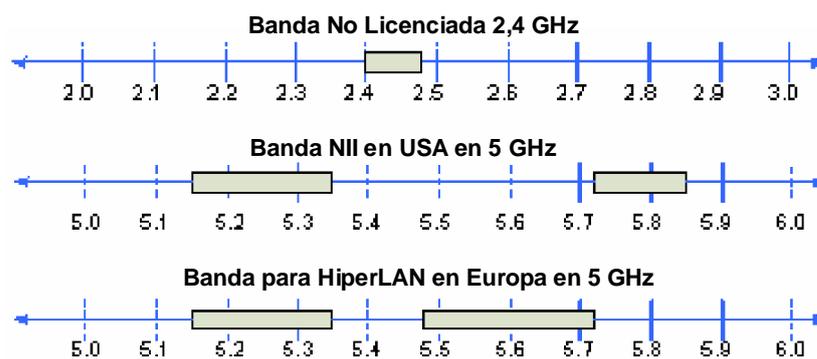


Figura 1-9. Comparación Bandas HiperLAN con NII¹⁶ y Bandas no licenciadas de 2,4 GHz.

¹⁶ Infraestructura de Información Nacional (National Information Infrastructure, NII).

Espectro en GHz Ancho de Banda	5.15 – 5.25	5.25 – 5.35	5.470 – 5.725	5.725 – 5.825/5.850
	200 MHz			100 – 125 MHz
USA	Interior	Interior y Exterior		Interior y Exterior
Canada	Interior	Interior y Exterior		Interior y Exterior
Argentina		Interior y Exterior		Interior y Exterior
Brasil				Interior y Exterior
Colombia	Interior	Interior y Exterior		Interior y Exterior
México	Interior	Interior		Interior y Exterior

Figura 1-10. Uso de la banda de 5 GHz en América.

Espectro en GHz Ancho de Banda	5.03 – 5.09	5.15 – 5.25	5.25 – 5.35	5.470 – 5.725	5.725 – 5.825/5.850
	60 MHz	100 MHz	100 MHz	255 MHz	100 – 125 MHz
Australia		Interior			Interior y Exterior
China					Interior y Exterior
Hong Kong		Interior			Interior y Exterior
Japón	Interior y Exterior	Interior			
Corea					Interior y Exterior
Nueva Zelanda		Interior			Interior y Exterior
Singapur		Interior y Exterior			Interior y Exterior
Taiwan			Interior		Interior y Exterior

Figura 1-11. Uso de la banda de 5 GHz en la región Pacífica de Asia.

Espectro en GHz	5.15 – 5.25	5.25 – 5.35	5.470 – 5.725
Ancho de Banda	200 MHz		255 MHz
Reino Unido	Interior		Interior/Exterior
Francia	Interior		
Alemania	Interior		Interior/Exterior
Dinamarca	Interior		Interior/Exterior
Finlandia	Interior		Interior/Exterior
Italia	Interior		Interior/Exterior
Irlanda	Interior		Interior/Exterior
Holanda	Interior		Interior/Exterior
Noruega	Interior		Interior/Exterior
Portugal	Interior		Interior/Exterior
Suecia	Interior		Interior/Exterior
Austria	Interior		
Bélgica	Interior		
Suiza	Interior		

Figura 1-12. Uso de la banda de 5 GHz en la Comunidad Europea.

Es observable entonces que, soluciones WLAN basadas en 802.11 (a, b y g) pueden operar en todo el mundo empleando el espectro de 2.4 GHz y 5 GHz asignado actualmente y aunque aún se espera mayor armonización en la banda de 5 GHz, es posible proporcionar soluciones *broadband* inalámbricas tanto urbanas como rurales.

En el ámbito nacional, el Ministerio de Comunicaciones de Colombia expidió la reglamentación (*Resolución 689 del 21 de abril de 2004*, disponible en <http://www.crt.gov.co>) mediante la cual se regula la operación de los sistemas de acceso inalámbrico y WLAN en el País, con lo que se pretende que Colombia esté acorde con los desarrollos tecnológicos de vanguardia. La Resolución atribuye unas bandas de frecuencias radioeléctricas de libre utilización para sistemas inalámbricos que empleen

tecnologías de espectro ensanchado y modulación digital, de *broadband* y baja potencia, para operación sobre una base de no-interferencia y no protección contra interferencia. La utilización del espectro radioeléctrico en estas bandas no requiere licencia, pero para prestar el servicio a terceros los operadores deben tener una concesión respectiva. La Figura 1-13 da indica la aplicación de las bandas expedidas y los valores de potencia máximos permitidos en cada una, según la Resolución.

Más recientemente, el Ministerio de Comunicaciones, en conjunto con la Comisión de Regulación de Telecomunicaciones (CRT), “han puesto en consideración una propuesta para el desarrollo de *broadband* en el país, incluyendo el fomento del uso de nuevas tecnologías y sus consideraciones normativas y regulatorias, entre las cuales destaca a WiMAX como una opción atractiva para sustituir o complementar la infraestructura existente en el sector de las telecomunicaciones; con ello, se busca facilitar el acceso de los ciudadanos a la *sociedad de la información*, redundando en beneficios como mayor productividad de los trabajadores, mejor nivel de educación, surgimiento de prácticas comerciales nuevas, incremento del nivel de vida de la población y crecimiento de la economía nacional”¹⁷.

Espectro en GHz	902 - 928	2.400 – 2483.5	5.150 – 5.250	5.250 – 5.350	5.470 – 5.725	5.725 – 5.850
Ancho de Banda	26 MHz	83.5 MHz	100 MHz	100 MHz	255 MHz	125 MHz
FHSS	Interior y Exterior 0,25-1 W	Interior y Exterior 0,125-1 W				Interior y Exterior 1 W
Modulación Digital	Interior y Exterior 1 W	Interior y Exterior 1 W	Interior UNII* 0,05 W	Interior y Exterior-UNII 0,25 W	Interior y Exterior-UNII 0,25 W	Interior y Exterior-UNII 1 W

* Infraestructura de Información Nacional Sin Licencia (Unlicensed National Information Infrastructure, UNII).

Figura 1-13. Bandas asignadas en Colombia mediante “Res. 689/2004” y su utilización.

¹⁷ Ministerio de Comunicaciones de Colombia y Comisión de Regulación de Telecomunicaciones de Colombia. “Promoción y Masificación de los servicios de Banda Ancha en Colombia”, Nov 2.004; disponible en <http://www.crt.gov.co/documentos/LineamientosPoliticaBA.pdf>

En lo que tiene que ver con el espectro WLAN en Colombia (especialmente 2.400 MHz a 2.483,5 MHz), se puede afirmar que actualmente presenta un incremento rápido en su porcentaje de utilización, no solo debido a que los dispositivos más difundidos trabajan en esa banda, sino al interés inusitado y afortunado que el gobierno ha prestado a este tipo de tecnologías. Adicionalmente el conglomerado empresarial local ha encontrado en las tecnologías inalámbricas una respuesta rápida y costo-efectiva a sus problemas de conectividad y acceso a información, lo que ha redundado en la proliferación de compañías interesadas en promover soluciones diferentes a las cableadas, presionando la generación de respuestas efectivas por parte de la administración pública.

Este primer capítulo ha tenido en cuenta todo un conjunto importante de conceptos fundamentales referentes a las tecnologías inalámbricas para entornos metropolitanos, particularizando en aspectos relevantes de las tecnologías 802.11 y 802.16, como una inducción al siguiente capítulo, en el que se realiza una comparación entre ellas, desde puntos de vista diferentes.

2. ANALISIS COMPARATIVO DE LAS NORMAS IEEE 802.16 Y 802.11

Como se planteó en el capítulo anterior, los estándares IEEE 802.11 y 802.16 son parte de una familia de normas para redes de área local y metropolitana, los cuales se relacionan con los niveles 1 (Físico) y 2 (Enlace de Datos) del Modelo de Referencia de Interconexión de Sistemas Abiertos (Open Systems Interconnection, OSI); la relación entre estos y otros miembros de la familia se indica en la Figura 2-1.

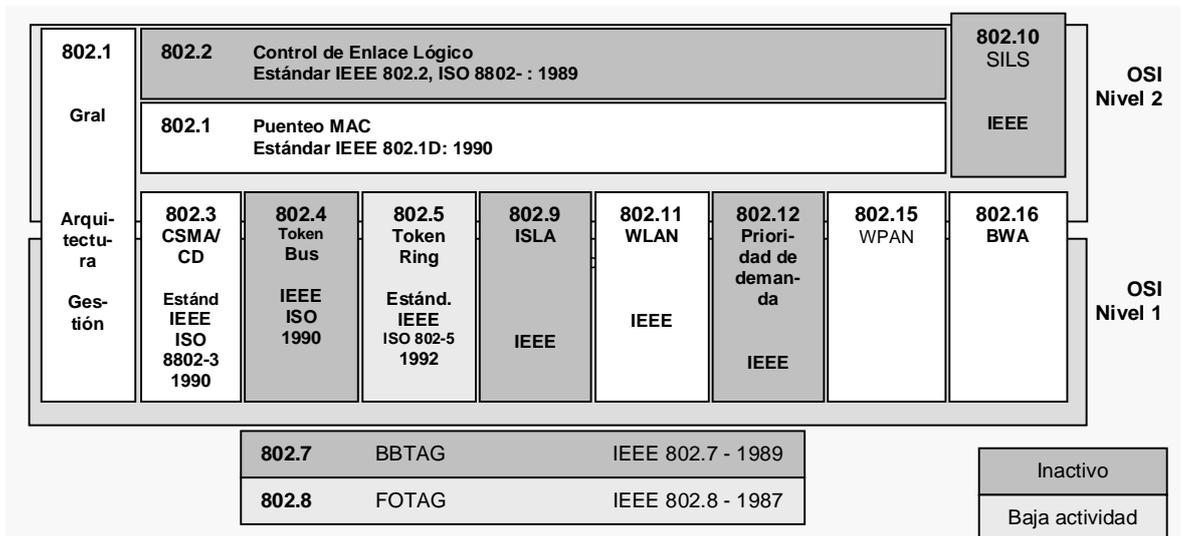


Figura 2-1. 802.11 y 802.16 en la Familia de Estándares IEEE.

Esta sección se dedica directamente a la comparación de los aspectos más sobresalientes de las tecnologías WiMAX y Wi-Fi, basándose en el estudio previo de ambas; análisis que cobra gran importancia pues representa las consideraciones a tener en cuenta para generar criterios de elección entre las dos tecnologías según un ambiente particular, el cual no solamente es el objetivo del siguiente Capítulo, sino también el objetivo general del presente Trabajo de Grado. Adicionalmente, en este capítulo se incluye una sección enfocada a la *Coexistencia* entre WiMAX y otros sistemas.

2.1 ANALISIS COMPARATIVO WiMAX Vs. Wi-Fi

Para comenzar, ambas tecnologías comparten algunas características técnicas fundamentales, pero se acercan al ambiente inalámbrico desde perspectivas completamente diferentes, como se describe a continuación.

2.1.1 Visión general del mercado. Las dos tecnologías se diseñaron para aplicaciones totalmente diferentes.

§ Wi-Fi es una tecnología de Red Local diseñada para agregar movilidad a LANs cableadas privadas, que se enfoca al usuario final.

§ WiMAX se ideó como base de un servicio portador. Se diseñó para ofrecer servicio BWA de área metro en ubicaciones fijas para competir con módems de cable y DSL. Su visión de mercado se ha confundido por el rango de aplicaciones para el que se propuso, en donde se anticipan tres fases importantes en su despliegue: Servicio de Línea Privada en una ubicación fija (*backhaul* de *HotSpot*), BWA/DSL inalámbrico y Usuarios Móviles/Nómadas.

2.1.2 Tecnología Radio. Junto a la diferencia obvia en el rango de transmisión existen una cantidad de mejoras en la tecnología de RF que distinguen a WiMAX de Wi-Fi.

§ IEEE 802.11 describe cuatro interfaces de radioenlace que operan en las bandas no licenciadas de 2.4 GHz y 5 GHz, como se indican en la Tabla 2-1.

§ Los estándares WiMAX incluyen un rango mucho mayor de implementaciones potenciales para manejar las necesidades de los *carriers* de todo el mundo. La versión del 2004 se enfoca sobre dos regiones de frecuencia, la comprendida entre 10 GHz y 66 GHz que requiere LOS con la EB, lo cual incrementa el costo y limita la base del consumidor, requiriendo además la realineación de antenas del lado suscriptor cuando se agrega una nueva celda a la red. La otra, se ha establecido

entre 2 GHz y 11 GHz en la que se soportan condiciones NLOS, eliminando la necesidad de alinear la unidad del consumidor con la EB.

Tabla 2-1. Interfaces del Enlace Radio WLAN de IEEE 802.11.

Estándar	Tasa Bit máx	Tasa de velocidad dinámica	Canales provistos	Banda de frecuencia	Tecnología radio
802.11	2 Mbps	1 Mbps	3	2.4 GHz	FHSS/DSSS
802.11b	11 Mbps	5.5 Mbps 2 Mbps 1 Mbps	3	2.4 GHz	DSSS
802.11a	54 Mbps	48 Mbps 36 Mbps 24 Mbps 18 Mbps 12 Mbps 9 Mbps 6 Mbps	12	5 GHz	OFDM
802.11g	54 Mbps	Igual que 802.11a	3	2.4 GHz	OFDM

§ **Bandas de frecuencia.** Donde las implementaciones Wi-Fi emplean bandas no licenciadas, WiMAX puede operar en espectro licenciado o no licenciado. En el rango de 2-11 GHz del 802.16, cuatro bandas son atractivas:

- Ø **MMDS licenciada de 2.5 GHz.** En Estados Unidos la Comisión Federal de Comunicaciones (Federal Communications Commission, FCC) asignó 200 MHz entre 2,5-2,7 GHz para Servicio de Distribución Multicanal Multipunto.
- Ø **Banda licenciada de 3,5 GHz.** En el rango de 3,4-3,7 GHz en la mayor parte del mundo para MMDS.
- Ø **Banda no licenciada de 3,5 GHz.** La FCC en U.S.A. abrió 50 MHz adicionales en la banda de 3,65-3,70 GHz para servicios inalámbricos fijos.
- Ø **Banda de Infraestructura de Información Nacional Sin Licencia (Unlicensed National Information Infrastructure, UNII) de 5 GHz.** En U.S.A. se han asignado 555 MHz en las bandas U-NII (5,150-5,350 GHz y 5,430-5,825 GHz), la misma banda empleada por WLANs 802.11a. La asignación se incrementó de 300 a 555 MHz por una orden de la FCC en Noviembre de 2.003.

§ **DFS.** Los *carriers* deben ser cuidadosos al entregar un servicio empleando una banda no licenciada, en este sentido WiMAX y WLAN (802.11h) incorporan la característica DFS donde el radio automáticamente busca un canal sin utilización. En áreas remotas la probabilidad de ocurrencia de interferencia debe ser mínima.

§ **Operaciones FDD y TDD.**

∅ Los sistemas WiMAX poseen opciones FDD/TDD; pueden configurarse para operación FDD de canal dual (UL/DL) o TDD de canal simple. En operación TDD se asignan ranuras de tiempo separados para transmisiones UL y DL, así, el canal es esencialmente *half-duplex*, de manera que la tasa de transmisión se reduce a más del 50%. Los sistemas TDD emplean la mitad del ancho de banda que los sistemas FDD. Adicionalmente, los estándares WiMAX también definen una configuración Malla opcional.

∅ Wi-Fi es *half-duplex*, de Medio compartido. Todas las redes Wi-Fi son sistemas TDD basados en contención, donde el AP y todas las estaciones móviles compiten por el uso del canal; debido a la operación de medio compartido todas las redes son *half-duplex*. Existen proveedores de equipos que comercian configuraciones Malla Wi-Fi, pero esas implementaciones incorporan tecnologías que no están definidas en los estándares.

§ **Sistema de Modulación.**

Los sistemas Wi-Fi emplean dos técnicas principales de transmisión radio:

∅ **802.11b (≤11 Mbps):** utiliza una técnica de Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS) llamada Modulación de Código Complementario (Complementary Code Keying, CCK), que procesa el flujo de bits convirtiéndolo en símbolos código de 8 bits que luego se modulan empleando Modulación de Cambio de Fase en Cuadratura (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK).

Ø **802.11a y g (≤54 Mbps):** En estos sistemas, la banda disponible se divide en subcanales y algunos de los bits se envían sobre ellos. El transmisor codifica los flujos de bits en las 64 subportadoras empleando Modulación de Cambio de Fase Binaria (Binary Phase Shift Keying, BPSK), QPSK o uno de los dos niveles de Modulación de Amplitud en Cuadratura (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) (16 o 64 QAM). Parte de la información transmitida es redundante, así que el receptor no tiene que recibir todas las subportadoras para reconstruir la información. Por otro lado, la técnica de multiplexación utilizada es OFDM de 64 canales.

802.16 define tres opciones principales para el enlace radio:

Ø **SC-A:** canal de portadora simple.

Ø **OFDM:** de 256 subportadoras. Se empleará en los primeros productos para ingresar al mercado. El Foro WiMAX está desarrollando pruebas para esta opción.

Ø **Acceso basado en OFDM (OFDMA):** de 2.048 subportadoras

§ **Ancho de banda del canal.** Wi-Fi define un ancho de banda fijo de 25 MHz para redes 802.11b y 20 MHz para redes 802.11a u 802.11g. En WiMAX los anchos de banda del canal varían desde 1,25 MHz hasta 20 MHz, lo cual será muy importante para *carriers* operando en el espectro licenciado. La tasa de transmisión del canal se determinará por la modulación de señal empleada.

§ **Eficiencia del ancho de banda.** Existe una confusión considerable respecto a la tasa de transmisión actual de un canal WiMAX (entre 70 Mbps y 100 Mbps), esta tasa dependerá del ancho de banda del canal asignado y de cómo pueda emplearse eficientemente. El problema básico es la eficiencia del ancho de banda; esta se mide por la cantidad de *bps* que pueden portarse en un ciclo del ancho de banda (*bps/Hz*). La tasa de transmisión se determina al multiplicar la eficiencia del ancho de banda por

el ancho de banda del canal que ocupará la señal. En la medida en que el número de bits a codificar aumente, la señal será más susceptible a ruido e interferencia.

§ **Modulación adaptiva.** Tanto Wi-Fi como WiMAX la emplean y varían los niveles de corrección de error para optimizar la tasa de transmisión y desempeño de error. En tanto la señal radio pierda potencia o encuentre interferencia, la tasa de error incrementará. Modulación adaptiva significa que en condiciones adversas, el transmisor automáticamente cambiará a un esquema de modulación inferior que le permita trabajar adecuadamente, aunque la velocidad de transmisión deba disminuirse. El radioenlace WiMAX incorpora perfiles de flujo adaptivos que ajustan la potencia de transmisión, la modulación de la señal y la Corrección de Error Hacia Adelante (Forward Error Correction, FEC) para ajustarse a una amplia gama de condiciones radio. La Tabla 2-2 indica las opciones de modulación del 802.16 definidas por OFDM y que producen niveles diferentes de eficiencia del ancho de banda.

Tabla 2-2. Opciones de modulación del 802.16.

Modulación	UL	DL	Codificación FEC	Bits/Símbolo con FEC
BPSK	Obligatorio	Opcional	1/2, 3/4	1/2, 3/4
QPSK	Obligatorio	Obligatorio	1/2, 2/3, 3/4, 5/6 y 7/8	1, 4/3, 3/2, 5/3, 7/4
16 QAM	Obligatorio	Obligatorio	1/2, 3/4	2,3
64 QAM	Opcional	Obligatorio	2/3, 5/6	4,5
256 QAM	Opcional	Opcional	3/4, 7/8	6,7

§ **FEC.** Cuando se emplea una modulación de señal de orden superior, la probabilidad de errores se incrementa, por lo que se hace necesario incluir alguna forma de FEC, con lo cual se adicionan bits redundantes en la transmisión que permitirán al receptor detectar y corregir un cierto porcentaje de los errores encontrados. 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 Wi-Fi 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.

§ **Eficiencia.** 802.11b ofrece eficiencia de ancho de banda entre 0,04 y 0,44 bps/Hz, dada la tasa de datos soportada en su canal de 25 MHz (1 Mbps a 11 Mbps). En un canal de 20 MHz, la tasa de transmisión de 6 Mbps a 54 Mbps de 802.11a o g proporciona una eficiencia entre 0,3 y 2,7 bps/Hz. En WiMAX la combinación de los esquemas de modulación y codificación producen una eficiencia superior a 5 bps/Hz, que entregaría una tasa de transmisión de 100 Mbps sobre un canal de 20 MHz; la eficiencia disminuirá con el aumento del rango de transmisión, así un máximo de 3,5 bps/Hz o 70 Mbps sobre un canal de 20 MHz podría ser más práctico.

§ **Otras características del radioenlace WiMAX.** Para mejorar el rango y desempeño general, la opción de emplear Codificación Espacio Tiempo (SpaceTime Coding, STC)¹⁸ permite el uso de dos antenas en la EB y una en la ES capaz de combinar ambas señales. Se prevé el uso de sistemas de Entrada Múltiple/Salida Múltiple (Multiple Input/Multiple Output, MIMO) para mejorar el rango y las tasas de transmisión. La Tabla 2-3 resume estas características. empareja

Tabla 2-3. Resumen de características de radio enlaces 802.16.

CARACTERÍSTICA	802.16 (Micoondas Altas)	802.16 (Microondas Bajas)	802.16e
Espectro	10 GHz - 66 GHz	2GHz - 11 GHz	<6 GHz
Configuración	LOS	NLOS	NLOS
Tasa de bit	32 a 134 Mbps (Canal de 28 MHz)	≤70 o 100 Mbps (Canal de 20 MHz)	Por encima de 15 Mbps
Modulación	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	OFDM de 256 subportadoras, con QPSK, 16 QAM, 64 QAM, 256 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM
Movilidad	Fija	Fija	≤120 Km/H
Ancho de banda del canal	20, 25, 28 MHz	De 1,25 a 20 MHz	5 MHz (planeado)
Radio típico de celda	1,6 – 4,8 Km	4,8 – 8 Km	1,6 – 4,8 Km

2.1.3 Protocolo MAC/QoS. Mientras existen una cantidad de similitudes entre los enlaces radio de Wi-Fi y WiMAX, los protocolos de acceso son completamente diferentes. El estándar WiMAX describe un protocolo MAC sofisticado que puede compartir el canal

¹⁸ El esquema de diversidad de transmisión STC empareja lógicamente bloques de datos separados por el retardo de propagación de los intervalos de guarda, para procesarlos en el transmisor y en el receptor.

de radio entre cientos de usuarios proporcionando QoS. A diferencia del protocolo MAC basado en contención empleado en las WLAN 802.11, WiMAX utiliza un mecanismo de acceso Request/Grant similar a los sistemas modems de cable, que elimina colisiones dentro de banda y soporta retardo de voz y servicios de datos de retardo variable.

- § **Acceso al Medio por Detección de Portadora con Evasión de Colisión (Carrier Sense Medium Access /Collision Avoidance, CSMA/CA).** Protocolo de control de acceso al medio que emplean las WLAN 802.11. Este nombre es similar al Acceso al Medio por Detección de Portadora con Detección de Colisión (Carrier Sense Medium Access / Collision Detect, CSMA/CD) de Ethernet, pero el concepto de operación es totalmente diferente. En las WLAN en configuración *half-duplex* de medio compartido, todas las estaciones transmiten y reciben en el mismo canal, pero una estación no puede “escuchar” mientras envía, por lo que es imposible detectar una colisión.
- § **Función de Control Distribuido (Distributed Control Function, DCF).** Surgió debido a lo anterior; la idea básica es definir un sistema de intervalos de espera y *timers* para ayudar a reducir, más no eliminar, la posibilidad de colisiones. Una estación Wi-Fi transmitirá solamente si piensa que el canal está libre. Todas las transmisiones se reconocen, así que si una estación no recibe un ACK, asume que ocurrió una colisión y reintenta después de un intervalo de espera aleatorio. La incidencia de colisiones incrementará tanto como el tráfico aumente, o en situaciones donde las estaciones móviles no puedan escuchar a otras (problema del nodo oculto).
- § **WiMAX es full-duplex.** El protocolo Request/Grant de WiMAX se diseñó para que las redes empleen canales separados, en tiempo (TDD) o frecuencia (FDD), para transmisiones dentro y fuera de banda.
- § **Canal de acceso WiMAX.** El acceso al canal UL se controla por la EB; los usuarios que desean transmitir dentro de la banda primero deben enviar solicitudes en un canal de acceso basado en contención; el permiso para usar el canal de tráfico se asigna

por la EB empleando un sistema de concesión de transmisión; como solo a una estación se le da el permiso de enviar al tiempo, no existen colisiones.

§ **Capacidad de QoS de Request/Grant.** El mayor beneficio del protocolo *Request/Grant* de WiMAX es que soporta QoS. Como el acceso *inbound* se controla por la EB, el mecanismo de acceso puede soportar cuatro tipos de servicio principales. Esos tipos de conexión pueden disponerse dinámicamente:

- ∅ **Sin solicitud de entrega en Tiempo Real.** Servicio de retardo consistente (isócrono) para voz y video de tiempo real, donde a una estación se asigna capacidad de transmisión sobre una base programada.
- ∅ **Polling de Tiempo Real.** Otro servicio de tiempo real que opera como la Función de Coordinación Puntual (Point Coordination Function, PCF) de 802.11, donde la EB elige cada dispositivo de usuario a su turno.
- ∅ **Tasa de bit variable sin Tiempo Real.** Servicio de datos de retardo variable con garantías de capacidad semejantes al esquema de Tasa de Información Entregada de Frame Relay para usuarios comerciales de prioridad alta.
- ∅ **Tasa de bit variable Best Effort.** Un servicio de datos *best effort* como IP para usuarios de Internet residencial.

El mecanismo de concesión especifica que la capacidad completa del canal entrante puede asignarse a un usuario para un conjunto de períodos de tiempo. También existe un mecanismo de asignación único para canales OFDM donde múltiples transmisiones simultáneas de usuarios (por encima de 16) pueden soportarse al asignar subcanales diferentes a usuarios diferentes.

§ **QoS de Wi-Fi.** Existen planes para incorporar capacidades de QoS en Wi-Fi mediante la adopción del estándar 802.11e, el cual incluirá dos modos de operación, cada uno puede emplearse para mejorar el servicio de voz.

- Ø **Extensiones Multimedia de Wi-Fi (Wi-Fi Multimedia Extensions, WME).** Es obligatorio. Emplea un protocolo llamado Acceso de Control Distribuido Mejorado (Enhanced Distributed Control Access, EDCA) que es una versión mejorada del DCF definido en la MAC del 802.11 original. La parte mejorada es que EDCA definirá ocho niveles de prioridad de acceso para el canal inalámbrico compartido. Como el DCF original, el acceso EDCA es un protocolo basado en contención que emplea un conjunto de intervalos de espera y *timers* diseñados para evitar colisiones. Con DCF todas las estaciones emplean los mismos valores y por tanto la misma prioridad para transmitir en el canal. Con EDCA cada una de las prioridades de acceso diferentes se asigna a un rango de intervalos de espera y *timers* diferente; las transmisiones con prioridad de acceso mayor se asignan a intervalos más cortos. El estándar también incluye un modo de rebosamiento de paquete que permite a un AP o a una estación móvil reservar el canal y enviar de tres a cinco paquetes en secuencia.
- Ø **Multimedia Programada de Wi-Fi (Wi-Fi Scheduled Multimedia, WSM).** Es opcional. Como EDCA aún opera sobre una base de contención, no incluye un mecanismo para entregar servicio de retardo real, simplemente asegura que las transmisiones de voz esperarán menos que las de datos. Estos servicios de retardo pueden proporcionarse con WSM opcional, que opera como la PCF definida con el MAC 802.11 original. En WSM el AP periódicamente emite un mensaje de control que obliga a todas las estaciones a tratar el canal como ocupado y no intentan transmitir; durante ese período el AP elige cada estación definida para servicio sensible al tiempo; para emplear WSM los dispositivos primero envían un perfil de tráfico describiendo requerimientos de ancho de banda, latencia y *jitter*¹⁹, si el AP no tiene suficientes recursos para el perfil de tráfico retornará una “señal de ocupado”. La razón para que WSM se incluya como una característica opcional es que todos los AP deben ser capaces de retornar una respuesta “servicio no disponible” a las solicitudes de perfil de las estaciones.

¹⁹ Generalmente es cualquier distorsión de una señal causada por la desincronización entre redes. La Rec.G.701 del ITU-T define al *jitter* o fluctuación de fase como “variaciones de corta duración y no acumulativas de los instantes significativos de una señal digital con relación a las posiciones que teóricamente debieran ocupar en el tiempo”.

- § **Seguridad Wi-Fi.** Otra diferencia principal entre Wi-Fi y WiMAX es la privacidad. La seguridad ha sido una de las principales deficiencias en Wi-Fi, no obstante actualmente se dispone de sistemas con mejor encriptación, cuyo empleo es opcional. Así, se han definido tres técnicas de encriptación diferentes:
- Ø **Privacidad Equivalente Cableada (Wired Equivalent Privacy, WEP).** Se basa en proteger los datos transmitidos en el medio RF empleando una clave estática de 128 bits y un algoritmo de Cifrado de Rivest de la versión de 1.994 (Rivest Cypher Version 4, RC4).
 - Ø **Acceso Wi-Fi Protegido (Wi-Fi Protected Access, WPA).** Un nuevo estándar de la Alianza Wi-Fi que emplea la clave WEP de 40 o 104 bits, pero cambia la clave en cada paquete para contrarrestar las claves de *crackers*. Ese cambio de funcionalidad de clave se llama Protocolo de Integridad de Clave Temporal (Temporal Key Integrity Protocol, TKIP).
 - Ø **IEEE 802.11i/WPA2.** Estándar que está finalizándose y que se basará en una técnica de encriptación más robusta llamada Estándar de Encriptación Avanzado (Advanced Encryption Standard, AES). La Alianza Wi-Fi denominará a los productos que cumplan con el estándar 802.11i como WPA2. Sin embargo, implementar 802.11i generalmente requerirá hardware de alto grado y en tanto se completa el estándar debe esperarse un tiempo para el despliegue amplio de dispositivos.
- § **Encriptación WiMAX.** Dado que este se diseñó para aplicaciones de red pública, virtualmente todas las transmisiones WiMAX se encriptarán. La especificación inicial recurre al Estándar de Encriptación de Datos Triple (Triple Data Encryption Standard, 3DES) de 168 bits, como se emplea en los túneles de Red Privada Virtual (Virtual Private Network, VPN) más seguros. Existen planes para incorporar AES, buscando evitar las fallas de seguridad que en sus inicios presentó Wi-Fi.

§ **WiMAX Móvil.** Aún se están trabajando los detalles de la especificación 802.16e, el estándar que describirá una capacidad móvil con *hand-off*²⁰, cuyo requerimiento básico es la compatibilidad hacia atrás con el servicio fijo; uno de los imperativos será reducir las exigencias de potencia para estaciones móviles alimentadas por batería. El plan es soportar tasas de datos alrededor de 500 Kbps, esencialmente equivalente a las ofertas celulares de velocidad más alta.

§ **Roaming²¹ Wi-Fi.** El IEEE está desarrollando un estándar de *roaming* para Wi-Fi, aunque la especificación no se espera para antes del 2006. A mediano tiempo, los fabricantes de switches WLAN han desarrollado sus propios protocolos de *hand-off* y también se han visto capacidades similares en los productos Malla Wi-Fi, sin embargo, eso significa que la capacidad de proporcionar *hand-off* requiere la implementación de una solución propietaria.

La Tabla 2-4 compara los atributos principales de las tecnologías WiMAX y Wi-Fi.

Tabla 2-4. Comparación de las tecnologías WiMAX y Wi-Fi.

	WiMAX (802.16)	Wi-Fi (802.11b)	Wi-Fi (802.11a/g)
Aplicación principal	BWA	WLAN	WLAN
Banda de frecuencia	2-11 GHz Licenciada/No Licenciada	2.4 GHz ISM	2.4 GHz ISM (g) 5 GHz U-NII (a)
BW del canal	Ajustable de 1,25 a 20 MHz	25 MHz	20 MHz
Modo de transmisión	<i>Full-Duplex</i>	<i>Half-Duplex</i>	<i>Half-Duplex</i>
Tecnología radio	OFDM (256 canales)	DSSS	OFDM (64 canales)
Eficiencia del BW	≥5 bps/Hz	≤0,44 bps/Hz	≤2,7 bps/Hz
Modulación	BPSK, QPSK, 16-64- ,256-QAM	QPSK	BPSK, QPSK, 16-64- QAM
FEC	Código Convolutacional Reed-Solomon	Ninguno	Código Convolutacional
Encriptación	Obligatorio - 3DES Opcional - AES	Opcional – RC4 (AES en 802.11i)	Opcional – RC4 (AES en 802.11i)
Protocolo de Acceso	Request/Grant	CSMA/CA	CSMA/CA
○ Best Effort	Si	Si	Si
○ Prioridad de datos	Si	802.11e WME	802.11e WME
○ Retardo consistente	Si	802.11e WSM	802.11e WSM
Movilidad	WiMAX Móvil (802.16e)	En desarrollo	En desarrollo
Malla	Si	Propietaria	Propietaria

²⁰ Proceso de transferencia de una comunicación de una celda a otra mientras el usuario se mueve en el área de servicio.

²¹ Proceso que permite al usuario de telefonía móvil utilizar su equipo en una red celular fuera de la cobertura de la red a la que pertenece, habilitándolo para realizar y recibir llamadas y que solo es posible si existe un acuerdo entre operadores.

2.1.4 Mercados para Wi-Fi y WiMAX. La principal diferencia entre Wi-Fi y WiMAX es que se diseñaron para aplicaciones diferentes; Wi-Fi comenzó como una tecnología de datos para agregar movilidad en LANs; WiMAX se pensó para proveer las bases para servicio inalámbrico de área metropolitana ofrecido por *carriers* para soportar aplicaciones de voz y datos. La incursión al mercado de las capacidades completas de WiMAX dependerá de qué partes de la especificación escojan desplegar los carriers.

§ **Servicios de red Wi-Fi.** La escena ha llegado a ser algo confusa sobre cómo los proveedores de servicio han empleado Wi-Fi para ofrecer servicios para los que no se diseñó originalmente. Dos ejemplos principales de esto son ISPs inalámbricos (Wireless ISP, WISP) y redes Malla Wi-Fi de cobertura metropolitana.

Ø **WISP.** Un negocio sorprendente que creció fuera de Wi-Fi, que ofrece servicio de acceso a Internet empleando tecnología WLAN y una conexión compartida a Internet en un lugar público (*HotSpot*), pero existen dos obstáculos principales: uno técnico y uno orientado al negocio. Desde una perspectiva técnica, el acceso al servicio se limitó basado en el rango de transmisión de la tecnología WLAN; se debe estar dentro del *HotSpot* para usarlo (aproximadamente a 100 m del AP). Desde una posición de negocio, cada uno de los usuarios se suscribe a un servicio de *carrier* particular por una cuota mensual o accede al servicio sobre una base de demanda de pago por hora; mientras la base de cuota mensual es más atractiva, existen arreglos de acceso entre *carriers* para estar en un *HotSpot* operado por su *carrier* para acceder a su servicio.

Ø **Redes Malla de cobertura metropolitana.** Para manejar el rango limitado los proveedores han desarrollado capacidades de redes Malla empleando la tecnología radio de Wi-Fi. La idea de una red Malla es que los mensajes puedan relevarse a través de un número de APs a una estación central de control de la red. Esas redes generalmente pueden soportar movilidad de acuerdo a la cantidad de APs que se incluyan en la red y a la capacidad de movilidad de cada estación. En algunas partes del mundo se están empleando redes Malla Wi-Fi

para proporcionar aplicaciones de seguridad pública y para proveer acceso a Internet para la comunidad (*HotSpots*). Sin embargo, la tecnología Malla y la capacidad de *hand-off* no están en el objetivo de los estándares Wi-Fi, esto es de una solución propietaria; lo cual significa que se debe adquirir todo el equipo del mismo fabricante.

§ **Mercados potenciales para WiMAX.** El pronóstico de mercado para WiMAX no está claro; el principal objetivo será BWA o DSL inalámbrico, aunque los *carriers* primero deben elegir desplegar el servicio. Su éxito dependerá del costo y la funcionalidad de sus ofertas cuando se comparen con otras alternativas de acceso de *broadband*, como DSL y cable modems. Sin embargo, los *carriers* tendrán que invertir en equipo de EB y deben decidir si existe suficiente demanda y un caso de negocio adecuado que justifique la inversión necesaria para ofrecer un servicio BWA. Se espera que los mercados potenciales para WiMAX sean:

Ø **Sistemas PTP.** Para entregar servicio de telefonía básico, *HotSpot* o *backhaul* de EB celular deben continuar para que sea un nicho de mercado viable orientado al *carrier*. Esto es particularmente cierto en países menos desarrollados que carecen de una infraestructura cableada (frente a otras alternativas de acceso de capacidad más alta, como fibra, desplegar acceso inalámbrico a un edificio de consumidores debe ser más rápido y barato).

Ø **BWA/DSL inalámbrico.** Ofrece el potencial de crecimiento más alto a corto plazo, pero también afronta la competencia de mayor aumento. Los sistemas basados en WiMAX tendrán que competir con servicios entre cable modems y DSL que se disponen ampliamente. Se observan oportunidades en la migración de suscriptores de *dial-up* y la extensión de acceso de *broadband* para comunidades no atendidas. Así, una solución inalámbrica debe tener una ventaja de costo importante, además estaciones interiores instalables por el usuario y de bajo costo.

Ø **WiMAX móvil.** El servicio móvil también puede cambiar el escenario para los *carriers* de cable modems y DSL, quienes aunque actualmente dominan el mercado fijo, tendrán que desarrollar servicios adjuntos para soportar usuarios fuera de sus hogares y así poder seguir compitiendo, propósito que podrían alcanzar, a mediano plazo, mediante WISPs basados en Wi-Fi. Por lo tanto, una oferta basada en WiMAX hogar/móvil obligará a los proveedores de cable modem y DSL a ofrecer soluciones más atractivas y de mayor capacidad, de lo contrario, perderán sus consumidores frente a una alternativa inalámbrica más flexible. Por otro lado, debido a que las ofertas de datos de los *carriers* de celular han tenido éxito moderado, en poco tiempo probablemente saldrán de ese mercado, puesto que las ofertas de WiMAX de servicio de datos de alta velocidad para entornos empresariales serán un contendor fuerte, por consiguiente las compañías celulares deberían buscar retener sus clientes a través de VoIP inalámbrica, como una opción para mantener sus servicios básicos de voz.

2.2 COEXISTENCIA

Ya que las ondas de radio se propagan en un medio inalámbrico se deben considerar las diferentes interferencias que pueden presentarse entre sistemas que funcionen en la misma banda o en bandas adyacentes. En este sentido toma gran importancia el concepto de la coexistencia, que es más preponderante en el 802.16, en comparación con el 802.11, pues tanto los escenarios de implementación como los modelos de negocio involucran a los proveedores de servicio.

Básicamente dos clases de interferencia pueden reducir el desempeño en sistemas BWA fijos y son: la *interferencia intrasistema* (que no se considera aquí porque está bajo control del operador) y la *interferencia entre sistemas*.

El asunto de la coexistencia con otros sistemas (sin IEEE 802.16) se trata principalmente en las bandas no licenciadas. En la región de 5 GHz, los servicios de satélite ($f_0 = 5,305$

GHz) y los servicios de radar son los dos usuarios primarios; los servicios satelitales utilizan antenas de muy alta ganancia y su potencia radiada pico puede ser significativa; otras tecnologías que también operan en esta banda son las de Transporte Terrestre y Tráfico Telemétrico (Road Transport and Traffic Telemetric, RTTT) localizados en la banda de 5,795-5,805 MHz. También se trata la coexistencia con otros operadores del IEEE 802.16, tanto en las bandas licenciadas como las no licenciadas, para lo cual el estándar provee recomendaciones dirigidas a fabricantes de equipos y otras que apuntan a las compañías proveedoras de servicios empleando esta tecnología.

2.2.1 Interferencia hacia la EB. La Figura 2-2 muestra los principales casos de interferencia para una EB de BWA fijo, la cual tiene una antena de cobertura sectorial y su patrón de radiación se representa como elipses.

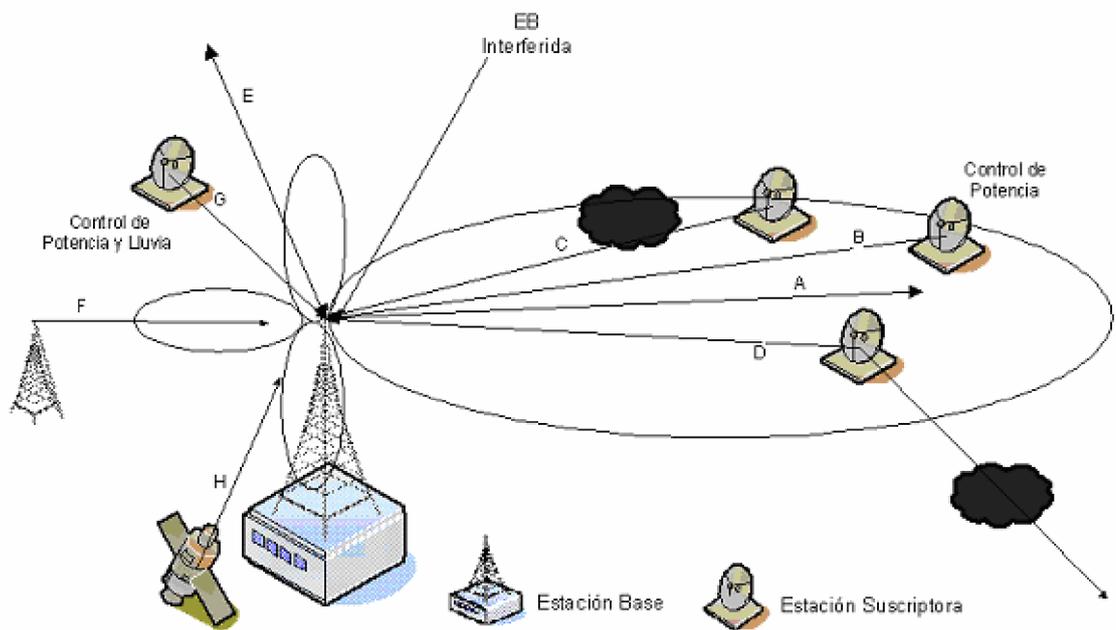


Figura 2-2. Fuentes de Interferencia para una EB de BWA fijo.

- § **Caso A: Interferencia EB-EB.** En la cual cada antena de EB está en el lóbulo principal de otra(s) EB, lo cual puede ser un problema importante porque las antenas tienden a ubicarse en lugares altos, con una probabilidad mayor de trayecto de LOS para cada una de las otras. La reducción del problema radica en asegurar que la frecuencia de transmisión de una EB no se emplee por otra(s) en recepción.
- § **Caso B: Interferencia ES-EB.** Aquí cada antena está en el lóbulo principal de la otra. Como la ganancia de la antena de la ES es mucho mayor que la de la EB, este es el peor caso. Sin embargo, sistemas PTM pueden asumirse sin riesgo al emplear en las ESs control de potencia adaptiva en el UL, el cual ecualiza la intensidad de la señal recibida que llega a la EB proveniente de ESs cercanas y lejanas que operan en canales adyacentes (la activación de control de potencia del DL desde los transmisores de la EB generalmente no se emplea). Los efectos de interferencia de este caso pueden ser menores que los del caso A; además el haz estrecho de la antena de la ES asegura que este caso sea menos común que el caso anterior. No obstante, la planeación de banda no puede eliminar la interferencia del caso B.
- § **Caso C.** Es como el caso B pero la señal interferente está sujeta a atenuación por lluvia; sin embargo, los efectos no superan los del caso B.
- § **Caso D.** También es como el caso B, pero la interferencia se presenta desde el lóbulo lateral de las ESs; como la ES ve la lluvia en su dirección de transmisión principal, no tiene que hacer control de potencia. Este caso puede ser más serio que el caso B si la interferencia no proviene de un sistema BWA, sino de un sistema de comunicación satelital.
- § **Caso E.** Es similar al caso A, pero menos serio porque la interferencia se presenta a causa de lóbulos laterales o posteriores.
- § **Caso F: Interferencia EB-EB desde lóbulos posteriores o laterales.** Las ganancias bajas involucradas aquí aseguran que solo sea un problema para co-despliegues de sistemas en un mismo sitio de emplazamiento. Esta interferencia puede eliminarse prácticamente en FDD mediante un plan de frecuencias coordinado.

- § **Caso G: Interferencia desde una ES al lóbulo lateral o posterior de la EB.** Es menos severo que el caso B y no se considera preponderante.
- § **Caso H: Interferencia desde un DL satelital o desde un DL estratosférico.** No se considera en las Prácticas Recomendadas del estándar.

De este modelo se pueden extraer las fuentes de interferencia que influyen de manera dominante en el desempeño del sistema. El caso A tenderá a prevalecer a menos que exista un plan de bandas armonizado para el uso de FDD; el caso B siempre compete; el caso D es menos significativo que el caso B si la fuente es otro sistema BWA, pero podría ser preocupante si la fuente tiene un nivel alto de potencia de salida; el caso F concierne solamente a EBs co-ubicadas y puede mitigarse enormemente con el uso de un plan de bandas armonizado con FDD.

2.2.2 Interferencia hacia la ES. El fenómeno de interferencia en la ES difiere con respecto a la interferencia en la EB en virtud que su lóbulo de radiación es mucho más angosto. La Figura 2-3 ilustra los diferentes casos.

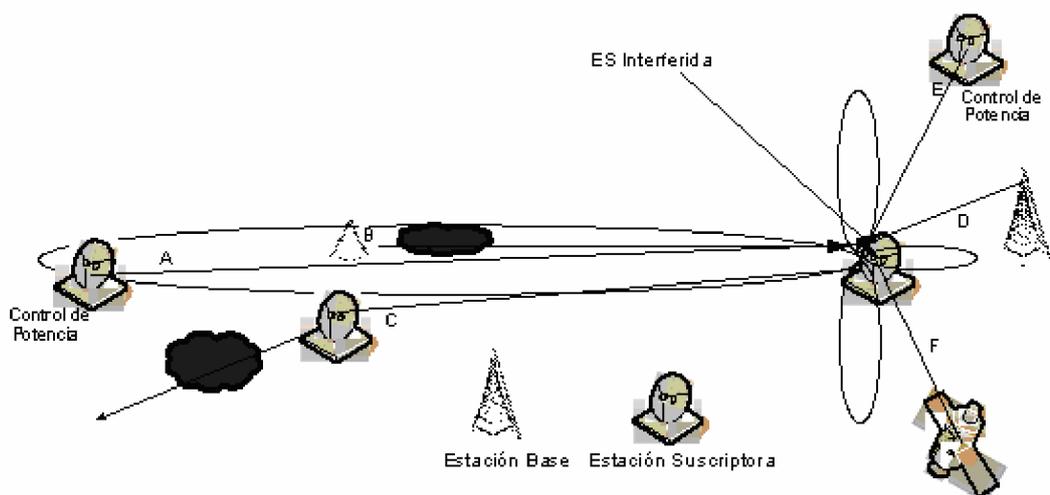


Figura 2-3. Fuentes de Interferencia para la ES.

- § **Caso A: Interferencia ES-ES.** Cuando los patrones de radiación son co-lineales; es un caso que poco se presenta.
- § **Caso B: Interferencia EB-ES.** Cubre la interferencia desde la EB hacia la ES con sus lóbulos principales enfrentados, tratada en sentido contrario al caso B en la interferencia hacia la EB.
- § **Caso C: Interferencia desde un Transmisor de lóbulo estrecho o desde un UL satelital.** Se refiere a la interferencia desde un sistema BWA fijo o PTP con un lóbulo de radiación angosto o desde un UL satelital a potencia máxima, con presencia de lluvia en el trayecto y radiando su lóbulo lateral hacia la ES víctima. Este caso es más probable de ocurrir que el caso A porque puede darse en cualquier sentido desde la fuente de interferencia.
- § **Caso D: Interferencia EB-ES hacia el lóbulo posterior o lateral.** Este caso podría ser frecuente ya que la EB radia sobre áreas amplias y además podría afectar para cualquier orientación de la ES.
- § **Caso E: Interferencia ES-ES hacia el lóbulo lateral o posterior.** Presenta un razonamiento similar a los casos B y C de la EB víctima; el peor caso puede darse cuando hay visibilidad clara entre el lóbulo posterior de la ES víctima y la fuente de interferencia, por lo que la víctima debe variar su potencia hacia atrás.
- § **Caso F: Interferencia desde un DL satelital.** Este caso no se considera en las Recomendaciones Prácticas del estándar.

2.2.3 Manejo de la Interferencia en sistemas BWA. Existen diferentes técnicas para calcular la interferencia tales como: *análisis del peor caso*, *simulaciones de Monte Carlo* o *cálculo del área de interferencia*; la técnica más apropiada depende del tipo de interferencia que se maneje. El *análisis del peor caso* es más adecuado cuando una única fuente produce la interferencia. Las *simulaciones de Monte Carlo* proveen un medio para evaluar la probabilidad de ocurrencia de un rango de niveles de interferencia; en

algunos escenarios pueden observarse partes específicas del área de cobertura en las que se presentan niveles de interferencia altos mientras que otras en la misma zona de influencia no sufren efectos nocivos; se denomina Area de Interferencia (AI) a la proporción del sector del área de cobertura donde se presenta interferencia por encima de los niveles máximos establecidos; en diferentes escenarios, el valor del AI es un porcentaje pequeño y las ubicaciones son predecibles y aunque ocurran niveles de interferencia altos, el problema es sectorizable y puede manejarse más fácilmente.

Para los sistemas BWA se encuentran dos tipos de interferencia preponderantes, la *co-canal* y la de *canal adyacente*. El ancho de banda del co-canal interferente puede ser más amplio o más estrecho que la señal deseada; en el primer caso solo una porción de su potencia cae dentro del ancho de banda del filtro del receptor y la interferencia puede estimarse calculando la potencia que llega a la antena receptora y luego multiplicándola por un factor igual a la relación entre el ancho de banda del filtro y el ancho de banda de la interferencia; para determinar la densidad espectral de potencia de los lóbulos laterales y el umbral de ruido de salida con respecto al lóbulo principal de la señal, puede recurrirse al cálculo realizado para la interferencia co-canal, con la inclusión de un factor de atenuación adicional debido a la supresión de energía espectral con respecto al lóbulo principal de la señal interferente. Adicionalmente existen dos tipos de emisiones no deseadas: *emisiones fuera de banda*, que están dentro del 200% del ancho de banda de la frontera de emisiones autorizadas y no deben exceder un nivel absoluto de -70 dBW/MHz en cualquier banda de 1 MHz; y *emisiones espúreas*, que están más allá de este punto. La densidad espectral de las emisiones no deseadas en la entrada del puerto de la antena deben atenuarse significativamente.

En la porción no licenciada de la banda de 2 a 11 GHz la coexistencia es especialmente importante porque cualquier sistema inalámbrico puede trabajar allí, por ello además de recomendarse la utilización de técnicas como DFS y TPC (descritas en la sección 1.5.3 del capítulo anterior) para gestionarla, se sugieren mecanismos como:

§ **Directividad de Antena.** La directividad vertical reduce la interferencia desde sistemas satelitales, así como hacia y desde sistemas WLAN para interiores; la directividad horizontal disminuye la interferencia para otros sistemas (asumiendo que la interferencia se causa principalmente en el lóbulo principal) pero tiende a incrementar la gravedad de esta en tanto mayor sea la energía del lóbulo principal. Sin embargo este método no se identifica en el alcance del estándar WMAN.

§ **Polarización de la antena.** Las antenas de polarización cruzada en la banda de 5 GHz pueden alcanzar un aislamiento de hasta 15 dB en condiciones LOS, pero este se reduce sustancialmente en NLOS²². Muchos de los despliegues utilizan tanto polarización horizontal como vertical para maximizar el reuso de frecuencias. De allí que a través de la polarización puede lograrse cierto aislamiento entre sistemas, especialmente en operación LOS, sin embargo, las necesidades operacionales y de implementación de la mayoría de sistemas en el espectro deseado generalmente marginan su efectividad.

Debido a que la interferencia entre operadores puede ser un problema serio, el IEEE 802.16 ofrece unas "Recomendaciones Prácticas" (Estándar IEEE 802.16.2) para tratar la coexistencia, que pueden considerarse como un modelo de sistema en que la entrada la constituyen la arquitectura del sistema, la potencia transmitida y los patrones de antena y parámetros del receptor como degradación del umbral de ruido y desempeño, en tanto las salidas son las recomendaciones para el despliegue de sistemas BWA. En estas recomendaciones se incluyen planes de frecuencia, distancias de separación y límites de densidad de flujo de potencia espectral. A continuación, en la Tabla 2-5, se da a conocer un resumen de las recomendaciones generales aplicables en todos los casos y las recomendaciones específicas para los escenarios de interferencia co-canal y de canal adyacente.

²² COOKLEV, Todor. "Wireless Communication Standards. A Study of IEEE 802.11,802.15 y 802.16", p 324. IEEE Press, New York, NY. Agosto 2.004.

Tabla 2-5. “Recomendaciones Prácticas” del IEEE 802.16 para Coexistencia.

RECOMENDACIONES GENERALES	
Degradación de la C/N del sistema	1 dB es aceptable. Para que el umbral de ruido se incremente por un 1 dB, el nivel de potencia de la interferencia debe estar 6 dB por debajo del umbral de ruido térmico del receptor. La interferencia se determina por la $C/(N+I)$. La cantidad de degradación en la sensibilidad del receptor es directamente proporcional a la potencia de ruido total agregada al ruido térmico (I), que consta de componentes internos (ruido térmico generado por componentes dentro del receptor, ruido de intermodulación e interferencia co-canal y de canal adyacente dentro de la red) y externos (interferencia entre redes) a la red. Cualquier red de BWA fijo no debe degradar la sensibilidad del receptor de otra coexistente en más de 1 dB.
Colaboración entre operadores	Los operadores deben cooperar entre sí antes del despliegue inicial y de cada modificación importante del sistema, analizando el potencial de interferencia y dando soluciones posibles que la mitiguen. Debe considerarse el capital de inversión de los operadores existentes frente a los costos de inversión de capital de los nuevos para que coexistan. Los mejores resultados se obtienen si se logra una colaboración completa y una planificación de despliegue común.
Niveles de emisión de los transmisores (EIRP)	El grado de coexistencia entre sistemas depende de los niveles de emisión de los diferentes transmisores, por lo que se debe establecer un límite superior en la EIRP. La mejor medida de la EIRP para coexistencia es la densidad de potencia espectral (psd), expresada en dBW/MHz más que solo potencia en dBW. Valores típicos son: para la EB, $P_{tx} = +24$ dBm (-6 dBW), $G_{ES} = +34$ dBi, $G_{EB} = +19$ dBi, $BW_{fc} = 28$ MHz (+14.47 dB-MHz), $psd_{EIRP} = 0$ dBW/MHz (aunque el máximo es +14 dBW/MHz); para la ES, $psd_{EIRP} = +15$ dBW/MHz (aunque el máximo es +30 dBW/MHz); para repetidores con antenas direccionales, $psd_{EIRP} = +15$ dBW/MHz (aunque el máximo es +30 dBW/MHz); para repetidores con antenas omnidireccionales o sectorizadas, $psd_{EIRP} = 0$ dBW/MHz (aunque el valor máximo es +14 dBW/MHz); por lo tanto una ES debe emplear un control de potencia de UL con al menos 15 dB de rango dinámico.
Caracterización de antenas	Se recomiendan dos orientaciones de polarización lineal (horizontal y vertical). La polarización cruzada puede mitigar la interferencia entre sistemas adyacentes. Independientemente de la polarización los operadores necesitan considerar: el patrón de radiación, azimut y elevación, las RPEs y parámetros mecánicos (viento y lluvia, ingreso de agua, temperatura y humedad, vibración). Las clases de desempeño de las antenas de la EB son: Clase 1, con un mínimo desempeño recomendado; Clase 2, con RPE ampliado, representan el caso más favorable para coexistencia y se recomiendan para operación en ambientes con niveles de interferencia significantes. Las clases de desempeño de las antenas de la ES son: Clase 1, con características moderadas del lóbulo lateral y con un mínimo desempeño recomendado; Clase 2 y 3, con RPEs mejorados, representan incrementalmente un desempeño de coexistencia favorable. Técnicas de mitigación eficientes pueden ser: aislamiento antena-antena, orientación, inclinación o <i>tilt</i> , directividad y polarización.
Reacción a fallas	Se recomienda que los equipos de la ES y EB tengan la capacidad de detección y reacción ante fallas, sean SW o HW, para prevenir emisiones indeseadas e interferencia.
RECOMENDACIONES PARA ESCENARIOS ESPECIFICOS	
Interferencia Co-canal	Entre EBs se recomienda la coordinación entre áreas de servicio licenciado donde ambos sistemas sean de operación co-canal y donde las áreas de servicio estén cercanas (menos de 60 Km). Para el caso de interferencia ES-EB se sugiere se emplee demarcación del área de servicio, aunque es un caso menos severo. También se recomienda que los organismos de regulación de los gobiernos especifiquen valores límites para cada banda, si estos se exceden el operador debe modificar el despliegue o coordinar con el operador afectado, para lo cual existen soluciones como: incrementar la distancia entre el transmisor y receptor interferentes, disminuir la potencia del transmisor, e incluso exclusión de frecuencia ²³ , aunque esta última es poco recomendable.
Interferencia de Canal Adyacente	El despliegue de los sistemas puede necesitar una banda de guarda, que podría ser igual a un canal equivalente de ancho de banda más amplio. Un caso especial se presenta cuando múltiples operadores comparten el lugar de ubicación de la antena empleando transmisiones armonizadas, ya sean FDD o TDD.

²³ Técnica que involucra la división o segregación del espectro de modo que las licencias vecinas operen en frecuencias exclusivas, lo cual evita cualquier posibilidad de interferencia. En lugar de exclusión de frecuencia, algunos problemas co-canal y de canal adyacente pueden eliminarse al retener frecuencias libres que se usan solo cuando se detecta interferencia.

3. CRITERIOS PARA LA PLANEACION Y DISEÑO DE INTERCONEXION INALAMBRICA DE SITIOS REMOTOS CON LAS NORMAS IEEE 802.16 E IEEE 802.11

En este capítulo se entrega un conjunto de criterios para tener en cuenta cuando se desee optar por una solución inalámbrica para interconectar sitios distantes en torno a las redes de área metropolitana utilizando las tecnologías 802.16 y 802.11, pero teniendo presente la premisa que ellas a pesar de compartir algunas características fundamentales, se acercan al espacio inalámbrico desde perspectivas completamente diferentes, complementándose en lugar de competir entre sí, lo cual se ha dejado claro a partir de la comparación entre ellas (sección 2.1 del capítulo precedente).

Por lo tanto, antes de especificar las pautas para las etapas de *Planeación y Diseño*, que constituyen la base de un proceso sólido para la posterior implementación y despliegue de sistemas BWA de manera exitosa, es pertinente plantear los escenarios en que las dos tecnologías son factibles de operar, que aquí se clasifican como *Urbano y Rural* considerando que así se cataloga la distribución demográfica colombiana, siendo el primero aquel en que el enlace ocurre dentro de una ciudad y el segundo fuera de ella; para hacer tal planteamiento primero se exhiben las variables que los definirán.

3.1 VARIABLES QUE DEFINEN EL ESCENARIO DE OPERACIÓN

La Figura 3-1 indica el marco de operación de las tecnologías WiMAX y Wi-Fi.

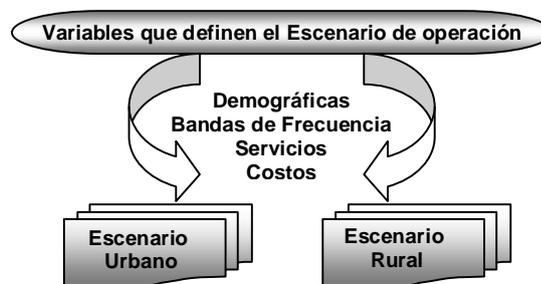


Figura 3-1. Definición del marco de operación para WiMAX y Wi-Fi.

3.1.1 Demográficas. Tradicionalmente las regiones demográficas se dividen en áreas urbanas y rurales y al incursionar en ellas se puede esperar: para el primer caso, penetración de mercado baja y mayor inversión en mercadeo y venta debido a la existencia de tecnologías competentes, por lo que es deseable recurrir al espectro licenciado para minimizar el potencial de interferencia; y para el segundo caso, penetración de mercado mucho más alta y velocidad de adopción rápida, sin embargo, los servicios de *backhaul* pueden significar un reto mayor.

3.1.2 Bandas de frecuencia. Una decisión clave es decidir si se utiliza espectro *licenciado* o *no licenciado*. El hecho de pagar por operar en el espectro *licenciado*, podría conllevar al incremento considerable del costo de la solución inalámbrica, sin embargo, este debería ser el mejor medio para establecer una red, pues el espectro por si mismo se convierte en un activo tangible que además puede ser sinónimo de protección contra interferencia al restringir a cada usuario a su región asignada, aunque su desventaja se relaciona con el proceso de licenciamiento, el cual varía dependiendo de las regulaciones locales. El espectro *no licenciado* maneja los conceptos de espectro abierto, donde el recurso se comparte, la necesidad de protección contra interferencias es muy crítica, los usuarios pueden ser de diferentes clases pero deben manejar las premisas de compartir la banda haciendo uso de técnicas de codificación, técnicas de control de potencia, subcanalización y técnicas de control de acceso al medio; su principal beneficio es que es un recurso gratuito.

Por lo anterior, la utilización de espectro licenciado es deseable en áreas metropolitanas de tipo urbano en donde se cuenta con la presencia de más operadores inalámbricos; por su parte, el espectro exento de licencia se recomienda para entornos rurales en donde prácticamente no existen tecnologías interferentes. La Tabla 3-1 confronta las características que presenta cada región del espectro de interés en el contexto de este proyecto (bandas de 2 GHz a 66 GHz, con sus correspondientes subdivisiones, para el caso del 802.16 y las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz para el 802.11).

Tabla 3-1. Características de las bandas de frecuencia y su relación con las tecnologías 802.16 y 802.11.

Espectro de Microondas	Características	802.16	802.11
UHF 300 MHz – 3 GHz	<ul style="list-style-type: none"> -Redes de datos de acceso público -Limitación relativa en rendimiento -Bajo grado de reutilización de frecuencia - Vulnerabilidad a la multitrayectoria 	<ul style="list-style-type: none"> - Operación NLOS - 2.5 GHz (Licenciada) 	<ul style="list-style-type: none"> -Operación LOS -2.4 GHz (No Licenciada)
SHF 3 GHz – 30 GHz	Región Baja (3 GHz a 10 GHz): <ul style="list-style-type: none"> -Transmisiones RF no uniformes -Limitación relativa en rendimiento -Bajo grado de reutilización de frecuencia -Vulnerabilidad a la multitrayectoria -Susceptibilidad al bloqueo por obstáculos (paredes, follaje), que puede exigir mayores niveles de potencia y disminuir la cobertura. 	<ul style="list-style-type: none"> -Operación NLOS -3.4 GHz a 3.65 GHz (Licenciada) -3.65 GHz a 3.7 GHz (No Licenciada) -5 GHz (No Licenciada) -Maneja el desvanecimiento por multitrayectoria con AAS y técnicas de modulación robustas. 	<ul style="list-style-type: none"> -Operación LOS -5 GHz (No Licenciada) -FHSS contrarresta inconvenientes de la multitrayectoria, sacrificando eficiencia espectral.
	Región Alta (10 GHz a 30 GHz): <ul style="list-style-type: none"> -No la afecta la multitrayectoria -Necesidad LOS -Atenuación (absorción de vapor de agua y de moléculas de oxígeno) -Desvanecimiento por lluvia -Costo mayor del equipo que el de operación para la región baja -Espectro abundante -Reutilización de frecuencias 	<ul style="list-style-type: none"> -Operación LOS 	<ul style="list-style-type: none"> -No aplica
EHF 30GHz - 300GHz	<ul style="list-style-type: none"> -Frontera superior de las comunicaciones RF de alta velocidad -Proceso regulatorio en desarrollo -Velocidades comparables a las de la fibra (cerca de los 40 GHz) 	<ul style="list-style-type: none"> -Operación LOS -30 GHz a 66 GHz (Licenciada) -Posibilidad de crecimiento de actividades en ella 	<ul style="list-style-type: none"> -No aplica

3.1.3 Servicios. Se deben analizar los servicios que es posible ofrecer en la red, relacionando los consumidores que pueden alcanzarse a través de ellos y las implicaciones ligadas a la porción elegida del espectro. Los principales servicios que se brindan en los enlaces de interconexión se presentan a continuación.

§ **Acceso a Internet de Alta Velocidad.** Hoy en día este segmento de mercado está cubierto por tecnologías DSL o cable, pero en algunas regiones los servicios disponibles no pueden reunir las expectativas del consumidor por desempeño o fiabilidad y/o por su

costo excesivo. La tecnología WiMAX permitirá al operador manejar económicamente este segmento de mercado y representa un caso de negocio ganado bajo una variedad de condiciones demográficas, constituyéndose en su oferta principal, en la cual el operador de la red puede actuar como ISP y además pueden establecerse relaciones con uno o más proveedores diferentes para enfrentar el ambiente competitivo.

§ **Modelo “carrier de carrier”**. Este modelo permite transportar volúmenes grandes de información entre redes de envergadura menor a quienes se les debe garantizar ancho de banda y seguridad suficientes en los canales de comunicación para la entrega correcta de información, por lo tanto consiste en vender capacidad a otros operadores y no servicios directamente. A veces, ceder capacidad a otros revendedores puede tener sentido de negocio, pero también puede limitar la rentabilidad que puede derivarse de la red. Este modelo es conveniente para mercados de distancias amplias.

§ **“Backhaul”**. Con este servicio la red puede funcionar como “*carrier de carrier*” al ofrecer conectividad a otros tipos de operadores de red y su rentabilidad se basa en que evita al *carrier de broadband* inalámbrico pagar por el espacio de la torre al utilizar los medios del que lo atiende. En términos de arquitectura de la red, un enlace de *backhaul* se diferencia del PTM porque en lugar de distribuir el espectro disponible entre usuarios simultáneos y emplear antenas de haces medianos para cubrir un sector deseado, se utiliza un solo enlace PTP de haz angosto (como *punteo inalámbrico*), que generalmente empleará el ancho de banda completo asignado a la red. Para propósitos de *backhaul* frecuentemente se recurre al espectro de 5,8 GHz, donde se alcanzan fácilmente desempeños de 100 Mbps sobre distancias de varios kilómetros. Se recomienda este tipo de conexiones cuando la red desea expandirse manteniendo su rendimiento.

§ **Telefonía (Voz)**. Es otra oferta de servicio importante que puede soportar la plataforma del estándar 802.16, como también el estándar 802.11 aunque con capacidad menor; no obstante, se debe considerar que en la telefonía IP al emplear *softswitches* que aún no implementan todas las funcionalidades de la RTPC, se necesita de equipo especializado

en el lado del consumidor, redundando en costos para éste. Otro aspecto a tener en cuenta es que debido a la disponibilidad mayor de ancho de banda en la región alta de las microondas, este servicio se adecua mejor allí que en las microondas bajas y se recomienda realizar una oferta de servicio que se diferencie de la competencia.

§ **Servicio de Datos de Alta Velocidad.** Estos servicios se ubican mejor en las microondas milimétricas y para ofrecerlos se recomienda analizar muy bien el entorno competitivo (principalmente servicios T1²⁴ o circuitos arrendados de datos). Los servicios basados en *circuitos* son bastante confiables, pero carecen de aprovisionamiento rápido, flexibilidad y eficiencia de ancho de banda, el cual es insuficiente para prestar servicios multimedia de calidad muy alta, desventajas que en algunos casos pueden superar las microondas altas. Aunque sustituir servicios T1 no es la mejor opción, la estrategia para competir con ellos es conseguir consumidores de datos por medio de ofertas de *servicios de paquetes* altamente flexibles. Los servicios de paquetes se pueden prestar a través de IP o Ethernet, los cuales son compatibles, pero IP soporta mejor QoS, Servicios Diferenciados o *DiffServ*²⁵ y SLAs y además el protocolo del 802.16 se construyó alrededor de éste. En consecuencia, los factores a tener en cuenta son la velocidad de despliegue del servicio y su capacidad de auto aprovisionamiento en caso de cambios.

§ **Servicios Multimediales.** En la región de 2 GHz a 11 GHz los sistemas 802.16 están en capacidad de ofrecer videoconferencia y audioconferencia y esto, asociado a que actualmente existe una gran variedad de productos software para videoconferencia IP de gran desempeño, convierte a este tipo de soluciones en una herramienta de gran utilidad en las empresas para extender sus propósitos y para controlar sus gastos derivados por el traslado del personal a diferentes lugares; además, en el ámbito local es una aplicación que escasamente han ofrecido otros proveedores de servicios de

²⁴ Un T1 representa una agregación de 24 líneas telefónicas de cobre de 56 Kbps que permite al usuario un rendimiento de un poco más que 1,5 Mbps.

²⁵ Un mecanismo de tratamiento de tráfico por acumulación apropiado para redes grandes, que define un campo en los encabezados IP de los paquetes conocido como Diffserv Codepoint (DSCP), con el cual los enrutadores de la red clasifican los paquetes y aplican un comportamiento de cola específico según dicha clasificación.

telecomunicaciones, por lo que sería una alternativa diferenciadora frente a ellos y adicionalmente debido a su gran valor agregado, los negocios están dispuestos a pagar un buen precio por su disfrute. Aunado a lo anterior, este servicio da la posibilidad de trascender además del ámbito empresarial, al social y educativo, porque se constituye en una herramienta fundamental para llegar vía inalámbrica a sectores en donde de otras maneras es difícil de hacerlo.

§ **Telemetría.** Esencialmente es una comunicación máquina a máquina que generalmente toma la forma de monitoreo remoto, una aplicación en la que se hacen demandas pequeñas de ancho de banda, para la cual existe un potencial de negocio considerable, por cuanto pocos proveedores de servicio de *broadband* la ofrecen (existen algunos a nivel privado en las bandas UHF/VHF); sin embargo, no es un servicio fácil de comercializar porque no existe un perfil consistente para sus usuarios y porque no se ha establecido su sitio de acción para promocionarlo (uno de sus entornos de aplicación se relaciona con proyectos de I+D). Probablemente la mejor estrategia para venderlo es incluirlo en otros servicios de datos y dar a conocer a los clientes comerciales probables que la red inalámbrica puede soportarlo.

§ **Servicios de Seguridad Pública y Redes Privadas.** El soporte de servicios nómadas y la capacidad para brindar cobertura ubicua en áreas metropolitanas convierte a WiMAX en una herramienta que permite mantener comunicaciones críticas bajo condiciones adversas para organizaciones de seguridad pública. Las redes privadas para complejos industriales, universidades y otros ambientes tipo campus también representan una oportunidad de negocio potencial.

§ **Computación en Grilla.** Este término se utiliza cuando se hace referencia a un acuerdo cooperativo con que un gran número de colaboradores hacen disponibles sus recursos computacionales de manera intermitente sobre una red de alta velocidad para aplicaciones computacionales paralelas que requieren potencia de computación suficientemente alta, su utilidad se ajusta a empresas grandes en la industria financiera

y de investigación científica e incluso en organizaciones académicas, recurriendo a la región alta de las microondas. Para los *carriers* de telecomunicaciones podría constituirse en una oferta de servicio de alojamiento para gestionar recursos de usuarios y proporcionarles seguridad; igualmente podría brindarse en sitios donde residen varias instituciones de investigación, mediante una combinación de enlaces PTP, para atender a pocos usuarios de alto valor. Aunque este servicio no ha hecho su incursión en el mercado, es un buen ejercicio pensar en la posibilidad de disponerlo en un futuro.

§ **Redes de Almacenamiento.** Es una aplicación de red donde la información vital se guarda en medios de almacenamiento remoto y se accede a ella si posteriormente se necesita; actualmente se presenta en soluciones IP y Ethernet y posiblemente desplace al almacenamiento tradicional de ambientes LAN. Este servicio nunca se ha ofrecido sobre una red inalámbrica de *broadband* y ningún equipo WiMAX se ha configurado para proporcionarlo, pero podría proveerse y constituiría un mercado potencial que vale la pena considerar, especialmente en las microondas altas cubiertas por el 802.16.

3.1.4 Velocidad de adopción del mercado. La telefonía móvil y más recientemente Wi-Fi han ayudado a establecer una aceptación general del acceso inalámbrico, de manera que es razonable esperar que los enlaces de interconexión basados en la tecnología WiMAX tendrán una velocidad de adopción rápida y fácil, como se ilustra en la Figura 3-2.

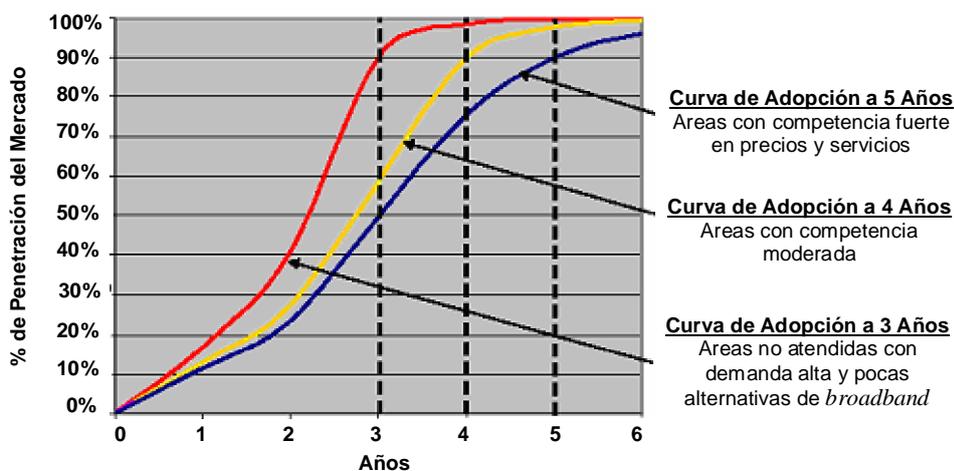


Figura 3-2. Velocidad de adopción del mercado para WiMAX.

3.1.5 Costos. Para desplegar enlaces de interconexión se deben considerar tanto los costos que constituyen el capital de la empresa como los operativos, que determinan la factibilidad de la solución. El capital de la empresa se conforma por su infraestructura física y tecnológica, su recurso humano y otros bienes tangibles e intangibles (precio de los servicios que la harán competitiva, el precio de compra y/o arrendamiento de la infraestructura, costo por utilización del espectro, el *truck roll*²⁶ y arreglos de derechos de terraza y de derechos de paso, entre otros); los costos operativos se relacionan con el funcionamiento del sistema después de su puesta en marcha (mantenimiento y gestión de infraestructura, así como de servicios).

3.2 ESCENARIOS DE OPERACION

La definición del escenario al cual se dirigirá la solución de interconexión inalámbrica, podría denominarse “definición del modelo de negocio”; en este proyecto, se identifican dos escenarios según la distribución de la población nacional y sus necesidades, *urbano* y *rural*, y sus características sobresalientes se exhiben en la Tabla 3-2.

3.3. PLANEACION

A través de esta etapa se fijan los objetivos y se diseñan los planes necesarios para alcanzar las metas propuestas de la oferta inalámbrica (interconexión de sitios remotos), permitiendo determinar hacia dónde se quiere llegar y la manera de hacerlo. La planeación en sus términos más elementales, es decidir con anticipación: qué hacer, cómo hacerlo, cuándo hacerlo y quiénes deben realizarlo. El no planear aumenta el riesgo y deja el éxito de la solución de interconexión inalámbrica en manos del azar. La Figura 3-3 esboza las fases y actividades que constituyen esta etapa.

²⁶ Término utilizado en la industria para referirse a la instalación profesional del terminal suscriptor.

Tabla 3-2. Modelos de Negocio para enlaces de interconexión basados en WiMAX/ Wi-Fi.

Características	Escenario Urbano	Escenario Rural
Generales	El enlace cubre en proporción mayor áreas densamente pobladas (ciudades)	El enlace cubre en proporción mayor áreas escasamente pobladas (zonas rurales)
Densidad de suscriptores potenciales	Alta (negocios grandes y PYMEs)	Baja (negocios pequeños)
Fuentes de interferencia	Abundantes	Escasas o Nulas
Causas de pérdida de señal	Obstrucciones por presencia de edificaciones	Desvanecimiento
Espectro	Licenciado preferiblemente	No Licenciado
Bandas de frecuencia	- 2,5 GHz - 3,4 GHz a 3,65 GHz - 3,65 GHz a 3,7 GHz - 5 GHz	- 2,4 GHz - 5 GHz
Velocidad de adopción del mercado	Más baja debido al ambiente competitivo fuerte (DSL y Datos por Cable)	Más alta debido al ambiente competitivo escaso y a la demanda alta de servicios
Servicios	- Acceso a Internet de Alta velocidad - "Carrier de carrier" - Backhaul - Multimediales (enfoque empresarial) - Seguridad Pública y Redes Privadas - Computación en Grilla (a futuro) - Redes de Almacenamiento (a futuro)	- Acceso a Internet de Alta Velocidad - "Carrier de carrier" - Backhaul - Telefonía - Multimediales (enfoque social) - Telemetría - Seguridad Pública y Redes Privadas
Costos de capital y operativos	Inferiores	Superiores
Tecnología	- WiMAX (2 GHz a 11 GHz) - WiMAX (10 GHz a 66 GHz)	- WiMAX (2 GHz a 11 GHz) - Wi-Fi (2,4 GHz y 5 GHz)

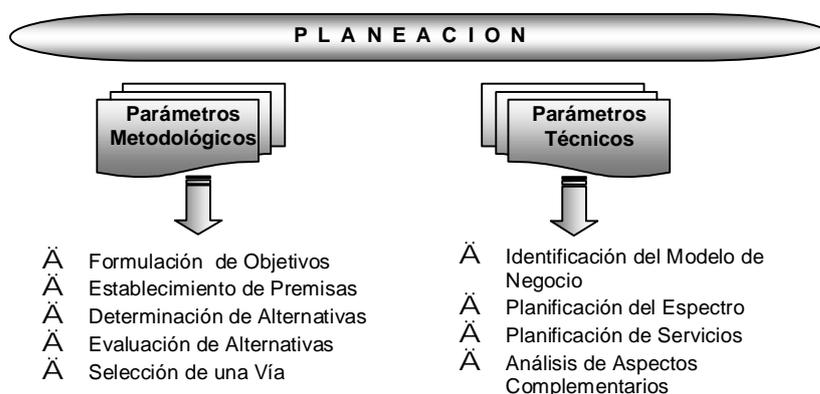


Figura 3-3. Constitución de la Etapa de Planeación

Algunos pasos generales de planeación aplicables a cualquier situación, que pueden catalogarse como *parámetros metodológicos*, son:

- **Formulación de objetivos:** buscan establecer claramente la meta a conseguir; deben ser claros, precisos y factibles de cumplir; puede partirse de un general y llegar a específicos, por ejemplo identificar necesidades del usuario, brindar conectividad, realizar enlaces de respaldo, migrar de redes cableadas a inalámbricas.
- **Establecimiento de premisas:** a través de lo cual es posible suponer situaciones futuras, tanto referentes a asuntos técnicos, como sociales, económicos y políticos.
- **Determinación de alternativas:** respondiendo a preguntas como: ¿Cómo hacerlo?, ¿Qué caminos pueden optarse para lograr lo propuesto? y demás cuestionamientos sobre las condiciones en que se desempeñará el sistema inalámbrico.
- **Evaluación de alternativas:** sopesando los factores que intervienen, así como analizando las consecuencias que cada una de ellas produzca. Involucra la apreciación de beneficios y limitaciones, la valoración de riesgos y la manera de gestionarlos, la estimación del tiempo de despliegue y la posibilidad de negociaciones.
- **Selección de una vía:** después de realizados los análisis anteriores, se adopta el plan más adecuado para el cumplimiento de las metas propuestas.

Alrededor de estos pasos, la etapa de planeación de una solución inalámbrica se conforma de una serie de fases específicas involucradas con el proceso de ingeniería, que corresponden a los *parámetros técnicos* y que específicamente para la interconexión inalámbrica de sitios remotos son la *identificación del modelo de negocio*, la *planificación del espectro*, la *planificación de servicios* y el *análisis de aspectos complementarios*, para que el lector construya una base de conocimiento que soporte posteriormente a la etapa de diseño. A continuación, cada fase se presenta con los criterios que guían hacia la elección de una u otra tecnología (WiMAX/Wi-Fi).

3.3.1 Identificación del Modelo de Negocio. Los criterios que se plantean al evaluar cada parámetro perteneciente al modelo de negocio (urbano o rural), permiten establecer la viabilidad de una u otra tecnología en cada escenario. Estos se indican a continuación.

§ **En escenarios urbanos:**

- ∅ Debido a la posibilidad de fuentes de interferencia, se recomienda recurrir a WiMAX por su capacidad de operar en espectro licenciado; no se aconseja utilizar Wi-Fi porque solo opera en el espectro no licenciado.
- ∅ Si no es factible trabajar en espectro licenciado, WiMAX también se prefiere como solución, porque dispone de mayor espectro que Wi-Fi en la región sin licencia.
- ∅ Se sugiere acudir a WiMAX por su facultad de trabajo NLOS en distancias largas (del orden de Km).
- ∅ La tendencia a la disminución gradual con el tiempo de los costos de infraestructura y de propiedad de WiMAX, al punto en que serán similares a los de Wi-Fi, permite recomendarla como la opción menos costosa a largo plazo.
- ∅ Con respecto a la escalabilidad de la red y los servicios, los cuales determinan a largo plazo las perspectivas de la red, es deseable emplear enlaces WiMAX porque su capacidad para manejar varias EBs y multitud de consumidores es muy superior a la de los enlaces Wi-Fi.
- ∅ Se justifica WiMAX en el sentido que enfrenta mejor que Wi-Fi las exigencias relacionadas con la densidad de suscriptores de los extremos a interconectar (negocios grandes y PYMEs), de manera que la capacidad del sistema y la reutilización de frecuencias, junto a los tipos de antenas que soporta (direccionales, arreglos en fase, sectorizadas e inteligentes) ayudan a mitigar los efectos de la interferencia, al mismo tiempo que permiten densidades de tráfico máximo, siendo virtudes que aminoran las posibilidades de apelar a Wi-Fi.

- Ø Con relación a la facilidad, velocidad y costo de despliegue, WiMAX es más plausible que Wi-Fi, por el hecho de alcanzar distancias más extensas y posibilidad de operación NLOS, lo cual conlleva a reducir la cantidad de saltos necesarios para el enlace y consecuentemente, los procesos de negociación que cada uno requeriría. No se recomienda Wi-Fi porque su limitación para manejar enlaces de distancias largas y la exigencia de operación con LOS implican incrementar la cantidad de saltos del enlace, convirtiendo al proceso de despliegue en un proceso más engorroso, lento e incluso costoso.

§ **En escenarios rurales:**

- Ø Definitivamente se debe optar por espectro no licenciado porque los casos de interferencia son poco probables, de modo que WiMAX y Wi-Fi son viables, pero se recomienda recurrir a Wi-Fi solo cuando existe LOS entre los extremos a interconectar y las distancias a cubrir son inferiores a 2 Km.
- Ø Se propone acudir a WiMAX por su facultad de trabajo NLOS en distancias amplias, excepto cuando un enlace WiMAX de un solo salto resulte menos costo-efectivo que un enlace Wi-Fi de varios saltos.
- Ø Se sugiere WiMAX como solución menos costosa a largo plazo, por la misma razón expresada en ese sentido para el escenario urbano.
- Ø Aunque las características de este escenario exigen requisitos de escalabilidad menores, tanto de la red como de los servicios, se aconseja WiMAX como opción más idónea que Wi-Fi, debido a su desempeño superior en cuanto a requerimientos de ancho de banda y capacidad de usuarios.
- Ø Si bien la densidad de suscriptores de los extremos a interconectar (negocios pequeños) en este escenario es inferior al urbano, se insinúa que es más factible acudir a WiMAX porque posee capacidad del sistema mayor que la de Wi-Fi, la cual podría necesitarse con el crecimiento futuro de negocios enfocados al sector

rural. Frente a una demanda futura de capacidades mayores del enlace, Wi-Fi posiblemente tendría que copar su capacidad sin llegar a suplir dichas exigencias.

- Ø Para efectos de facilidad, velocidad y costos de despliegue, WiMAX tiene más validez que Wi-Fi bajo los mismos argumentos planteados en el escenario urbano. Wi-Fi se indica solo cuando se dan las condiciones para llevar a cabo enlaces con un número reducido de saltos y con pretensiones mínimas.

3.3.2 Planificación del espectro. Solamente se debe proceder a esta fase cuando la valoración completa del ítem anterior ha determinado lo siguiente:

- Ø Existe una demanda considerable de servicios de *broadband* a precio competitivo y el desafío puesto por competidores no es preocupante.
- Ø Las políticas locales no imponen obstáculos insuperables.
- Ø La topografía de la región y la distribución de consumidores potenciales hacen viable la solución de interconexión inalámbrica.
- Ø El enlace gozará de posibilidades grandes durante un tiempo prolongado.
- Ø Es posible establecer relaciones con similares sin perturbar la QoS.
- Ø Existe infraestructura para el despliegue del enlace.
- Ø El enlace de interconexión tendrá la posibilidad de adoptar ampliaciones previsibles sin que ello implique actualizaciones muy grandes.

En consecuencia, existen dos aspectos primordiales que se deben estimar y conforme con lo descrito en la sección 3.1.2 de este capítulo, son:

- § **Espectro Licenciado o No Licenciado.** Lo que se desea en este paso es elegir el espectro de más utilidad para la solución propuesta y como se ha señalado en la sección 3.1.2 de este capítulo, se recomienda utilizar para el escenario urbano

espectro licenciado, en tanto que en el escenario rural tiene sentido operar en espectro no licenciado, por lo cual se propone:

- Ø Para el espectro licenciado descartar el empleo de sistemas basados en Wi-Fi.
- Ø Para el espectro no licenciado recurrir bien sea a soluciones basadas en WiMAX o en Wi-Fi y la elección de una u otra reposará en las exigencias en cuanto a distancias a cubrir en los enlaces y la capacidad que estos deban soportar.

§ **Banda de operación en el espectro elegido.** Consiste en determinar el espectro disponible en el mercado seleccionado y en el área que se atenderá; si el espectro requerido no está disponible, la alternativa escogida tendrá que replantearse; entonces, se trata de analizar qué tan viable es comercialmente. En consecuencia, se proponen las siguientes posibilidades.

- Ø WiMAX para el espectro licenciado, con las opciones de trabajar en la banda de 2,5 GHz o en la banda de 3,4 GHz a 3,65 GHz disponibles en la actualidad; a futuro, la banda de 10 GHz a 66 GHz ofrecerá otras alternativas una vez se progrese en el proceso de regulación. Se recomienda la banda más baja debido a que por razones comerciales, está difundida más ampliamente a nivel mundial; sin embargo la banda más alta puede ser más atractiva para aplicaciones que requieren mayor ancho de banda.
- Ø Para el espectro no licenciado, las opciones son WiMAX en las bandas de 3,65 GHz a 3,7 GHz y en la banda de 5 GHz; y Wi-Fi en las bandas de 2,4 GHz y 5 GHz. En la banda a elegir debe analizarse cuál maneja mejor las situaciones de interferencia y los requerimientos en cuanto a cobertura y desempeño, buscando un equilibrio entre la capacidad del sistema y la disponibilidad del espectro. Una práctica deseable para estos despliegues es clasificar las actividades tal que no más de la mitad de la banda disponible se utilice; esto permite el empleo de selección automática del canal al habilitar la autoselección de canales que no están sujetos a interferencia con otros operadores, aconsejándose WiMAX para tal

propósito ya que Wi-Fi, no implementa este mecanismo hasta el momento; aunque cabe mencionar que existen soluciones propietarias que ya lo ofrecen y que, adicionalmente, se está trabajando en la revisión 802.11h con el fin de formular todo un conjunto de mejoras similares a las ya mencionadas para WiMAX, entre las que se considera la selección automática de canal.

3.3.3 Planificación de los servicios. Teniendo presente que algunos servicios exigen mayor ancho de banda que otros, debe decidirse cuáles soportará el enlace de interconexión y el enfoque de mercadeo que se brindará a cada uno. En este marco, por simplicidad, se plantea manejar las necesidades de los servicios en dos grupos: los de jerarquía mayor y los de jerarquía menor.

Los servicios de jerarquía mayor reúnen exigencia mayor en cuanto a recursos y se enfocan a negocios grandes, entre los cuales están “*Carrier de Carrier*”, *backhaul* y, Computación en Grilla; sin embargo “el servicio de *backhaul* por si solo no se constituye en una fuente de ingresos importante, sino que representa una renta adicional que requiere simplemente una inversión pequeña de capital sobre la infraestructura de los otros servicios”²⁷. Por otro lado, los servicios de jerarquía menor tienen menores exigencias y se orientan a PYMEs, mencionando entre ellos Acceso Básico a Internet de Alta Velocidad, Datos de Alta Velocidad, Telefonía, Multimediales, Telemetría, Seguridad Pública y Redes Privadas, Redes de Almacenamiento.

No obstante, es posible plantear una oferta basada en estratificación de servicios con un precio diferencial; por ejemplo, típicamente la capacidad de *backhaul* puede requerir la décima parte de la capacidad agregada de todos los extremos a interconectar (si se tiene 100 consumidores, cada uno con una conexión de 10 Mbps, entonces la capacidad combinada de todos los extremos a interconectar es de 1 Gbps, por lo tanto un *backhaul* con 100 Mbps podría ser suficiente, aunque sería ideal uno de 250 Mbps); de otro lado, el

²⁷ WiMAX FORUM. “Business Case Models for Fixed Broadband Wireless Access based on WiMAX technology and the 802.16 Standard”, disponible en www.wimaxforum.org

servicio de videoconferencia puede ofrecerse a un rendimiento promedio de 400 Kbps o a un rendimiento alto excediendo los 700 Kbps con un precio mayor; de esta manera, de acuerdo con lo expresado, es razonable establecer SLAs para determinar el desempeño que puede esperar el cliente a quien se brinda el enlace de interconexión.

Sobre los dos grupos de servicios propuestos, se presentan las consideraciones siguientes:

- Ø Debido a que los servicios de jerarquía mayor requieren en promedio una velocidad, rendimiento y un ancho de banda con capacidades superiores, se considera que WiMAX es unívocamente la opción viable. Por ejemplo, en un servicio *Backhaul* Celular, la utilización de esta tecnología otorga la oportunidad de disminuir la dependencia de otros operadores y en ambientes donde prevalecen enlaces de microondas PTP. WiMAX puede incrementar la capacidad de *backhaul* más efectivamente empleándose como una red superpuesta que permitirá ampliar el rango de servicios móviles sin que se corra el riesgo de cortar los servicios existentes.
- Ø Por su parte, debido a que los servicios de jerarquía menor necesitan en promedio una velocidad de desempeño y un ancho de banda con capacidades inferiores, se piensa que aunque en algún momento Wi-Fi podría satisfacer tales exigencias, el crecimiento del sistema a mediano y largo plazo quedaría rezagado debido a la escalabilidad de este, que obviamente es menor a la de WiMAX; de este modo se insiste en esta última como la elección más idónea.

3.3.4 Análisis de aspectos complementarios. En esta fase se debe procurar dar un vistazo a la disponibilidad de herramientas de soporte necesarias y auxiliares para acompañar tanto el proceso de planeación, como de diseño del enlace, de tal manera que el apoyarse en ellas conduzca a resultados certeros a partir de la ejecución eficiente de observaciones y cálculos que guíen hacia la solución más efectiva a un menor costo. Se sugiere verificar la accesibilidad a herramientas para un levantamiento de sitio adecuado, herramientas de análisis espectral, herramientas de simulación que muestren el

comportamiento posible del enlace ante condiciones determinadas y frente a situaciones eventuales.

Adicionalmente se debe analizar con antelación, la disponibilidad de herramientas para la gestión del enlace una vez este inicie su operación; al respecto, la mayoría de fabricantes de equipos inalámbricos de *broadband* suelen incluir utilidades software de diagnóstico del sistema (como por ejemplo, herramientas de diagnóstico del flujo de datos). Así mismo, la gestión de la red es un medio por el que puede obtenerse rentabilidad permanente, puesto que conlleva a procesos sólidos de Administración, Operación y Mantenimiento (AOM) y aunque en el mercado de BWA es relativamente sencillo instalar y operar la planta física de la red, en ocasiones no es tan fácil integrar clases heterogéneas de software e intervención humana, por lo cual se recomienda seleccionar las plataformas de gestión más acordes a las necesidades del enlace, con anterioridad al despliegue de éste, para luego aprovechar al máximo sus posibilidades (gestión de infraestructura, gestión de elementos de red, SLAs y pagos, e incluso Gestión de las Relaciones con los Clientes (Customer Relationship Management, CRM)); en este sentido, manejar el concepto de Sistemas para Soporte de Operaciones (Operations Support Systems, OSS), demuestra la ubicuidad de los procesos de gestión y su repercusión en la optimización de los beneficios que brinde el enlace.

Otro tema de suma importancia es la seguridad del enlace en todos sus aspectos; además de brindar un canal de información seguro, está la integridad de la propia infraestructura, la seguridad del personal que trabaja sobre ella y la de sus usuarios. Se deben seguir políticas para controlar el acceso humano a las instalaciones, disponer de sistemas eléctricos de calidad y de dispositivos adecuados para maniobrarlos, de modo que el grado de seguridad que ofrezca el enlace se traduzca en confiabilidad para quienes lo operen y para quienes se beneficien de éste. Por lo tanto se recomienda identificar las áreas operativas neurálgicas para prever las vías para protegerlo, contra intromisiones y ataques a su estructura lógica en busca de fugas de información, y contra riesgos eléctricos eventuales que puedan atentar contra la integridad de los equipos y del

personal que los opera. Un aspecto más que también merece atención, es la elección del personal capacitado para manejar la tecnología utilizada y para realizar los trabajos relacionados con cada etapa que conforma la elaboración de una solución de interconexión inalámbrica y su puesta en funcionamiento.

3.4. DISEÑO

Esta etapa se enfoca a la aplicación adecuada de las estrategias definidas en la etapa de planeación, tendiente a esbozar las características que definirán la(s) solución(es) de interconexión inalámbrica, cuyas acciones concretas conlleven posteriormente a la implementación y despliegue de servicios exitosamente.

Conforme a las recomendaciones planteadas en la etapa de planeación, en la sección 3.3 de este capítulo, se ha considerado prudente manejar el proceso de diseño del enlace de interconexión a través de tres fases, *Configuración del Enlace*, *Levantamiento de Sitio* y *Selección de Equipos*, como se observa en la Figura 3-4, las cuales se aplican indistintamente para soluciones basadas en WiMAX o en Wi-Fi, pero por supuesto con las implicaciones de capacidad y desempeño ligadas con cada una. A continuación se describen las fases mencionadas.



Figura 3-4. Constitución de la Etapa de Diseño.

3.4.1. Configuración del Enlace. Esta fase define las características de la topología elegida de acuerdo con los requisitos de éste. Las topologías de red para interconexión inalámbrica en WMAN son PTP, PTM y Malla; y aunque es posible una combinación de ellas, no se aconseja hacerlo porque se incrementan las consideraciones técnicas, como también la complejidad del diseño y de la gestión del ancho de banda. En esta fase se determina el perfil del trayecto, básicamente identificando la ubicación de los extremos a interconectar, calculando el número de saltos requeridos para interconectarlos y la longitud que cada uno alcanzará, procurando un número mínimo de saltos posible. Paralelamente con lo anterior, la elección de una u otra topología está ligada a la banda de frecuencia por la que se opte para la operación del enlace.

Al respecto, las recomendaciones son las siguientes:

- § El objetivo de un número de saltos mínimo permite entrever que con Wi-Fi seguramente se necesitarán muchos más saltos que con WiMAX conforme las distancias de los extremos a interconectar aumenten, especialmente cuando existen obstáculos a lo largo del trayecto, razón por la cual es preferible utilizar WiMAX.
- § En el caso de WiMAX, las transmisiones en bandas muy altas no se recomiendan para trabajar en configuración PTM, pues el comportamiento del haz para ajustarse a ella podría resultar en rangos cortos inaceptables que malograrían el alcance de usuarios potenciales debido a consideraciones estrictas de LOS.
- § La topología Malla eleva los costos porque prácticamente cada nodo es una EB, de modo que no se aconseja esta opción, excepto cuando es indispensable enrutamiento redundante para garantizar la conectividad y cuando sobre el trayecto existen demasiados obstáculos que no son posibles de superar.
- § Por debajo de los 3 GHz, pese a que son posibles topologías PTP, escasamente se las encuentra, porque el ancho de banda por sí mismo se presta para despliegues PTM, así que es preferible ajustarse a dichos lineamientos prácticos.

- § Se deben concretar las características de los suscriptores para asignarles los recursos que necesiten; esto es, la forma de reconocerlo a través de información sobre él (calificativo, coordenadas de su ubicación geográfica, frecuencia, anchos de banda manejados, capacidad requerida).
- § Se sugiere establecer las condiciones para que la disponibilidad²⁸ deseada del sistema se mantenga sobre valores óptimos.

3.4.2. Levantamiento de Sitio. Esta fase determina el alcance de los niveles de interferencia en las frecuencias de interés y la severidad de las obstrucciones y la multitrayectoria en las ubicaciones precisas donde se desea instalar los terminales. Debe ser un proceso iterativo que acompaña a cada nodo del enlace, aunque desplazar personal técnico a cada lugar demanda costos, por lo cual debe existir un compromiso para que estos no sean desfavorables y adicionalmente como se realiza de forma manual, debe procederse con mesura tanto en observaciones y mediciones, como en el desarrollo de cálculos. El resultado de este proceso ha de ser documentado debidamente para que las etapas de despliegue posteriores puedan derivar su máximo provecho.

Esta fase involucra las siguientes actividades:

§ **Determinación de LOS y Cálculos de Fresnel.** El levantamiento de sitio comienza con observaciones visuales para establecer la existencia de línea de vista entre la EB y la ES y luego se procede con los Cálculos de Fresnel. El proceso es bastante sencillo e involucra la utilización de herramientas como binoculares, Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System, GPS) altímetro, herramientas software (mapas digitales, sistemas de información geográfica y herramientas de cálculo, entre otras). La fórmula para calcular el radio de Fresnel es la siguiente:

²⁸ Tiempo de operación efectiva del sistema; son deseables típicamente valores de 99.9995%.

$$r_{f1} = 17,3 * \sqrt{\frac{n}{f} * \frac{d1 * d2}{d1 + d2}} \quad (3-1)$$

Donde:

n=1 (Primera Zona de Fresnel)

f: Frecuencia en GHz

d₁: Distancia del obstáculo al punto de transmisión, en Km.

d₂: Distancia del obstáculo al punto de recepción, en Km.

r_{f1}: Radio de la primera zona Fresnel, en metros.

Se debe tener en cuenta que la presencia de obstrucciones en la Primera Zona de Fresnel no excluye por completo el establecimiento del enlace, más bien significa que se necesitarán ajustar ciertos parámetros en los extremos a interconectar (como mayor potencia de transmisión, ubicación de antenas en sitios más altos, antenas con mejores ganancias, equipos con mejores sensibilidades, entre otros) para lograr la misma integridad de la señal que la del trayecto sin obstrucciones²⁹. En tal sentido, se sugiere preferir equipos WiMAX porque manejan mejor que Wi-Fi este tipo de restricciones.

§ **Análisis de RF.** Una vez establecida la topografía del sitio se debe continuar a evaluar las condiciones del ambiente radio en cada nodo para verificar si finalmente es adecuado establecer el enlace; esto se aplica para determinar si se experimenta interferencia, específicamente en el lugar preciso donde se ubicará la antena; dichas medidas deben realizarse reiteradamente durante un período de tiempo debido a la naturaleza intermitente de la interferencia; 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 actividades en bandas cercanas que puedan afectar las transmisiones en las bandas elegidas; particularmente cuando se emplean antenas adaptivas, se requiere un analizador de espectro.

²⁹ Referirse a la Figura 1-6 de la sección 1.5.1 del Capítulo 1.

Por lo tanto, al finalizar este procedimiento se debe llegar a conclusiones sobre la integridad del radioenlace y su conveniencia para prestar servicios de interconexión, con base en las mediciones realizadas y en la información que se posea sobre el grado de tolerancia que manejan los equipos. Conforme a lo expresado aquí, tiene mayor validez optar por enlaces basados en WiMAX, en lugar de Wi-Fi, puesto que con dicha tecnología se dispone de técnicas (especificadas en el proceso de estandarización mismo) más robustas para tratar la interferencia, como DFS, técnicas de reutilización de frecuencia (empleando repetidores, sectorización, diversidad en polarización), AAS y modulación adaptativa, pues Wi-Fi se vale de soluciones propietarias y de desarrollos muy recientes al interior del IEEE (como 802.11h) que limitan su penetración en el mercado.

§ **Presupuesto del Enlace.** En esta fase se llevan a cabo los cálculos para determinar la confiabilidad del enlace de interconexión, relacionados con la ganancia de la antena, las pérdidas internas del sistema, las pérdidas inducidas en cables y conectores y las pérdidas de espacio libre. Aquí también se maneja el concepto de margen o umbral de desvanecimiento en recepción, ligado a la ganancia y sensibilidad de los equipos y que suministran los fabricantes. Estos cálculos concluyen con la determinación del Margen Operativo del Sistema (System Operative Margin, SOM) o Margen Desvanecimiento, que es la diferencia entre el nivel de potencia en recepción y la sensibilidad mínima requerida en el equipo receptor para obtener una transmisión con menor probabilidad de errores, siendo una herramienta muy útil para verificar la factibilidad y conveniencia de los enlaces; se recomiendan valores de SOM positivos, entre 10 dB y 20 dB, pues por debajo de dicho rango supone condiciones críticas de desempeño del sistema, mientras que por encima de 20 dB indica que el diseño de la solución está sobredimensionado. En las expresiones siguientes se incluye la información más representativa al respecto.

$$L_{fs} [dB] = 32,45 + 20 * \log f [MHz] + 20 * \log d [Km] \quad (3-2)$$

Donde:

L_{fs} : Pérdidas de espacio libre

f : Frecuencia de operación

d : Distancia entre puntos

$$P_{Rx} = P_{Tx} - L_{Tx} - L_{CTx} + G_{Tx} - L_{fs} + G_{Rx} - L_{Rx} - L_{CRx} \quad (3-3)$$

Donde:

- P_{Rx} : Nivel de señal en recepción, en dBm
- P_{Tx} : Potencia a la salida del transmisor, en dBm
- L_{Tx} : Pérdidas en la línea de transmisión, en dB
- L_{Rx} : Pérdidas en la línea de recepción, en dB
- L_{CTx} : Pérdidas por conectores en transmisión, en dB
- L_{CRx} : Pérdidas por conectores en recepción, en dB
- G_{Tx} : Ganancia de la antena en transmisión, en dBi
- G_{Rx} : Ganancia de la antena en recepción, en dBi

Finalmente,

$$SOM = P_{Rx} - S_{Rx} \quad (3-4)$$

Donde:

- S_{Rx} : Sensibilidad del receptor, en dBm

3.4.3. Selección de Equipos. Esta fase consiste en la definición de un proceso formal y cuidadoso para cualificar y elegir los equipos; para ello, se aconseja acudir a procesos de licitación y de pruebas exhaustivas, para optar por los que cumplan efectivamente con las exigencias del enlace, de modo que la elección correcta sea la que soporta mejor sus servicios. En este sentido es importante considerar parámetros como el Tiempo Medio Entre Fallas (Mean Time Between Failures, MTBF) y el Tiempo Medio para Recuperación de Fallas (Mean Time To Recovery, MTTR), medidos en horas, los cuales ofrecen una estimación de la indisponibilidad del sistema (porcentaje de tiempo en que el sistema no está disponible), la cual se obtiene mediante la expresión siguiente.

$$Ie(\%) = \frac{MTTR}{MTTR + MTBF} \times 100 \quad (3-5)$$

Este proceso va más allá de evaluar las soluciones posibles ofrecidas por los fabricantes y debe estar ligado a consideraciones adicionales, como soporte de los dispositivos, servicio post-venta y asesoría en las etapas de adecuación de la infraestructura final. También es importante asegurarse que los equipos estén provistos de las interfaces necesarias para comunicarse con otros tipos de red, así como la cantidad de puertos RF que se requerirán (para operación multibanda) y finalmente, cómo se adaptarán al OSS las herramientas de gestión.

§ **Estimación del presupuesto operativo y de capital.** Al terminar la selección de equipo se está en capacidad de establecer el presupuesto final, en términos de inversión, para el enlace de interconexión; por lo tanto, al valorar este ítem, se trasciende de la parte técnica a la financiera. A continuación, en la Tabla 3-3, se lista un conjunto de rubros que se pueden tener en cuenta para cada caso.

Tabla 3-3. 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 CPEs. - Instalación y comisionamiento de CPEs - Planeación del enlace - Inversión en EBs - Costo de adquisición de la terraza o del sitio de la torre - Gestión del enlace - Fidelización del cliente - Instalaciones 	<ul style="list-style-type: none"> - Arrendamiento de terrazas o torres - O&M de la EB - O&M del CPE - O&M del enlace - Capacidades arrendadas - Herramientas complementarias

Igualmente, en los análisis financieros es frecuente encontrarse con el término *Retorno de la Inversión* (Return of Investment, ROI³⁰), que también debe aplicarse a los casos de negocio basados en soluciones de ingeniería, para estimar el tiempo en que se recuperará la inversión realizada en el sistema; para este caso específico, cómo los

³⁰ Método de medida de la rentabilidad aplicado generalmente al entorno empresarial y que evalúa la relación entre los ingresos netos y la inversión total.

sistemas se pagan por si mismos y cómo justifican en el tiempo la inversión inicial realizada al diseñarlos e implantarlos.

No obstante, el cálculo del ROI puede ser un poco complicado en el mercado de las telecomunicaciones inalámbricas, porque estas evolucionan constante y rápidamente, al mismo tiempo que el entorno competitivo; así, en el mercado del BWA en general calcular exactamente cuándo y cómo se recuperará la inversión realmente es complejo, debido a situaciones como la inexactitud en el dato de la inversión real a realizar, cambios en el mercado, cambios en la regulación, cambios en los requerimientos de los usuarios, entre muchas otras variables, afectando de una u otra forma el desempeño de las tecnologías y sus resultados en el tiempo.

La expresión básica para calcular el ROI se indica a continuación.

$$ROI = \frac{Beneficios - Costos}{Costos} * 100 \quad (3-6)$$

Una recomendación final es la siguiente: Una vez se obtenga el diseño, antes de poner en funcionamiento el sistema, puede procederse con una instalación temporal para propósitos de prueba; esta es una práctica conveniente porque permite realizar análisis del flujo de datos con el ánimo de evaluar el desempeño del enlace y en consonancia con los resultados obtenidos, verificar si es necesario llevar a cabo ajustes en el diseño para cumplir con las metas propuestas; para tal efecto se recomienda trabajar con las condiciones más críticas que puedan surgir durante la operación del sistema.

En la Tabla 3-4 se resumen los criterios descritos a lo largo de este capítulo, para tenerlos en cuenta en las etapas de Planeación y Diseño de enlaces de interconexión entre sitios distantes con las tecnologías regidas por los estándares estudiados.

Tabla 3-4. Resumen comparativo de Criterios de Planeación y Diseño para Interconexión Inalámbrica de Sitios Remotos empleando WiMAX y Wi-Fi.

Aspectos a evaluar	Criterios para el Entorno Urbano		Criterios para el Entorno Rural		
	WiMAX	Wi-Fi	WiMAX	Wi-Fi	
P L A N E A C I Ó N	Modelo de Negocio	Se recomienda por las posibilidades altas de escalabilidad, por las técnicas robustas que soporta (AAS, TPC, DFS, OFDM)	No se recomienda por la escalabilidad limitada, por la existencia de fuentes de interferencia abundantes y por las cualidades técnicas restringidas	Se recomienda por las posibilidades altas de escalabilidad, por las técnicas robustas que soporta (AAS, TPC, DFS, OFDM)	Se recomienda parcialmente, por las posibilidades de escalabilidad medianas y por las cualidades técnicas restringidas (mejora con uso de soluciones propietarias)
	Espectro				
	Licenciado	Se recomienda	No aplica	Factible, pero no se recomienda	No aplica
	No Licenciado	Se recomienda parcialmente	No se recomienda	Se recomienda	Se recomienda parcialmente
	Banda de operación	Más espectro disponible	Menos espectro disponible	Más espectro disponible	Menos espectro disponible
	Servicios				
	Jerarquía Mayor	Se recomienda	No aplica	Se recomienda	No aplica
Jerarquía Menor	Se recomienda	Se recomienda parcialmente	Se recomienda	Se recomienda parcialmente	
D I S E ÑO	Configuración del enlace	Se recomiendan PTP y PTM, y en grado menor "Mesh"	Se recomienda parcialmente para PTP	Se recomienda para PTP	Se recomienda parcialmente para PTP
	Levantamiento de Sitio				
	LOS y Cálculos de Fresnel	Proceso más simple y con menor número de iteraciones	Proceso muy complejo y con mayor número de iteraciones	Proceso más simple y con menor número de iteraciones	Proceso complejo y con mayor número de iteraciones
	Análisis RF	Menos crítico gracias a la inclusión de técnicas para manejo de interferencia (DFS, AAS, TPC, Técnicas de modulación, entre otras)	Muy crítico por la existencia de fuentes de interferencia abundantes	Exigencias menores debido a fuentes de interferencia poco probables	Exigencias menores debido a fuentes de interferencia poco probables
	Presupuesto del enlace	Consideraciones similares para ganancias y pérdidas	Consideraciones similares para ganancias y pérdidas	Consideraciones similares para ganancias y pérdidas	Consideraciones similares para ganancias y pérdidas
	Selección de equipos				
	Estimación presupuesto Operativo y de Capital	Menos complejo por la posibilidad de recurrir a menor número de equipos; costos de despliegue inicialmente altos, pero justificables a largo plazo; menor necesidad de herramientas complementarias (seguridad, QoS y gestión)	Más complejo por la posibilidad de recurrir a mayor número de equipos; costos de despliegue inicialmente bajos, pero inestables; mayor necesidad de herramientas complementarias (seguridad, QoS y gestión), mediante extensiones del estándar	Menos complejo por la posibilidad de recurrir a menor número de equipos; costos de despliegue inicialmente altos, pero justificables a largo plazo; menor necesidad de herramientas complementarias (seguridad, QoS y gestión)	Más complejo por la posibilidad de recurrir a mayor número de equipos; costos de despliegue inicialmente bajos, pero inestables; menor necesidad de herramientas complementarias (seguridad, QoS y gestión), mediante extensiones del estándar
ROI	Expectativas mucho mayores	Expectativas poco probables	Expectativas mayores	Expectativas menores	

4. DISEÑO DE LA RED DE INTERCONEXION INALAMBRICA PARA LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA BAJO LAS NORMAS IEEE 802.11 Y 802.16

En el capítulo anterior se plantearon un conjunto de criterios para la interconexión inalámbrica de sitios distantes en torno a MANs con base en las características principales de los estándares IEEE 802.16 y 802.11; estos criterios se plasmaron en las etapas de planeación y diseño, involucrando los aspectos más importantes a tener en cuenta y llevando en mente la idea de complementariedad entre WiMAX y Wi-Fi. El capítulo presente aplica y valida los resultados obtenidos en el Capítulo 3 en un diseño específico para la Universidad del Cauca, concretamente cubriendo las necesidades de interconexión entre la Red de Datos de la Universidad con la Facultad de Ciencias Agropecuarias y con los municipios de Silvia y Santander de Quilichao, de acuerdo a los criterios concebidos y a la norma más apropiada para las necesidades, que además sirve como referencia para la interconexión con otras zonas que la requieran. Al final de este capítulo se resalta el impacto o beneficios generales que se alcanzan con la implementación de este tipo de soluciones.

4.1 DEFINICION DE PARAMETROS METODOLOGICOS

4.1.1 Formulación de objetivos. El objetivo general es proveer un diseño para la interconexión inalámbrica entre algunas sedes de la Universidad del Cauca, basado en la utilización conveniente de tecnologías WiMAX y/o Wi-Fi, como una opción válida para solventar las necesidades generadas por la ubicación de ellas en un área geográficamente dispersa, ligadas a la política de descentralización y función social del Alma Mater. A partir de lo anterior, el diseño implica cubrir las necesidades de interconexión de la Red de Datos con sedes específicas, como sigue:

- § Con la Facultad de Ciencias Agropecuarias, para mejorar la velocidad de conexión y disminuir los costos por utilización de infraestructura cableada.
- § Con el municipio de Silvia, enmarcado en los proyectos de investigación universitaria (EHAS-Silvia, ReTAS y Telecentro Comunitario Agroindustrial Piloto en el Municipio de Silvia) soportados en la tecnología Wi-Fi, para proporcionar con la tecnología WiMAX la posibilidad de opciones nuevas que mejoren su desempeño actual.
- § Con el municipio de Santander de Quilichao, en donde se cuenta con una sede externa de la Universidad, para suministrar una alternativa factible que mejore el acceso a Internet e Intranet y que dote de un medio de comunicación efectivo (por ejemplo, a través de servicios de teleconferencia) entre docentes, administrativos y estudiantes³¹.

4.1.2 Establecimiento de premisas. Es natural suponer que la Red de Datos de la Universidad del Cauca evolucionará hacia la prestación de nuevos servicios ligados a la inclusión de tecnologías inalámbricas puesto que los recursos con que cuenta actualmente involucran únicamente una infraestructura cableada (LAN Fast Ethernet), que incluso ya ha alcanzado su escalabilidad máxima y por lo tanto se hace necesario recurrir a alternativas que amplíen su capacidad y también los servicios que soporta, entre las cuales podría resultar conveniente acudir a tecnologías como WiMAX y Wi-Fi para brindar conectividad entre sedes. A partir de esto y de acuerdo con los objetivos planteados en el ítem anterior se espera que el dotar de enlaces de interconexión entre las diferentes sedes de la Universidad del Cauca y su Red de Datos permita establecer condiciones más efectivas para el desarrollo de actividades diversas en el entorno universitario.

En consonancia con lo anterior, dos sedes universitarias revisten interés especial por su orientación a programas académicos de aparición reciente, la sede de Las Guacas, en donde se encuentra la Facultad de Ciencias Agropecuarias, y la sede de Santander de

³¹ Actualmente la Sede no posee docentes de estadía permanente, su estadía es temporal, por lo cual su disponibilidad es limitada y además se sujeta a los rubros asignados por concepto de viáticos.

Quilichao, que entre sus programas incluye el de Tecnología en Telemática. Para ambas, una solución de interconexión inalámbrica con la Red de Datos posibilitará la optimización de los recursos disponibles y de los costos de operación, teniendo en cuenta que se prevé un crecimiento gradual de la población académica que demandará servicios, aplicaciones y herramientas en proporciones mayores a los utilizados hoy en día, lo cual justifica la inclusión de tecnologías inalámbricas para atender las exigencias futuras de este sector, a través de las cuales se proporcionen mejoras en los procesos y en la calidad de la educación. Posiblemente entre las demandas futuras de cada una de estas sedes estarán un canal de acceso a Internet de alta velocidad, servicios de datos de alta velocidad, servicios multimediales, **Voz sobre IP**, entre otros.

Otro punto de interés que merece atención primordial es el municipio de Silvia por cuanto la interconexión con este evidencia una trascendencia mayor con respecto al impacto social que otorgan los proyectos EHAS-Silvia, ReTAS y Telecentro Comunitario Agroindustrial Piloto en el Municipio de Silvia, al potenciar a futuro su campo de acción a través de las capacidades más robustas que WiMAX posee frente a Wi-Fi.

Particularmente, conforme a las apreciaciones del Grupo de Ingeniería Telemática, se pronostica que el proyecto EHAS-Silvia cambiará uno de sus enlaces Wi-Fi (Popayán - Cerro Nueva Guambía) a una nueva ubicación más favorable (Popayán - El Tranal), lo cual conllevará a ampliar la cobertura del proyecto a poblaciones nuevas no atendidas actualmente en la región, e inclusive se podría especular que con el tiempo este migre a tecnología WiMAX; “el proyecto EHAS-Silvia ofrece conexión permanente mediante enlaces Wi-Fi a los hospitales San Carlos de Silvia y Mamá Dominga del resguardo de Guambía (centros que dirigen los establecimientos de salud de la zona de ejecución del proyecto), con el propósito de mejorar los procesos de gestión de salud y la calidad técnica de los trabajadores de las zonas rurales, mediante el desarrollo de sistemas de comunicaciones de voz y datos sobre los cuales instala servicios de consulta remota, capacitación, vigilancia epidemiológica y referencia y contra-referencia de pacientes, enfrentando las dificultades geográficas, sociales, económicas y de carencia de

infraestructuras de telecomunicaciones de la zona; en este proyecto piloto se asocian el Grupo de Ingeniería Telemática y el Grupo Salud y Sociedad, ambos pertenecientes a la Universidad del Cauca, quienes esperan ampliar su influencia al municipio de Jambaló y a la Costa Pacífica caucana³², lo cual deja entrever que la escalabilidad del mismo exigirá la introducción de sistemas más flexibles, dotados de posibilidades técnicas superiores a los utilizados hoy en día para fortalecer realmente su proyección social.

Así mismo, el Grupo I+D en Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones exhibe dos proyectos que se apoyan sobre la infraestructura Wi-Fi de EHAS-Silvia, ReTAS y Telecentro Comunitario Agroindustrial Piloto en el Municipio de Silvia, los cuales también merecen exaltarse.

“El proyecto ReTAS tiene por objetivo establecer y poner en operación una Red Piloto de Teleasistencia Sanitaria enfocada a la prevención, detección temprana y tratamiento oportuno de la tuberculosis con la ayuda de las Tecnologías de la Información, en zonas de influencia de los Municipios de Popayán, Santander de Quilichao, Silvia, Caloto, Morales y Guapi, que contribuya al mejoramiento de la calidad de vida de las comunidades³³; en este marco, una solución de interconexión inalámbrica aplicada a servicios de telemedicina inducirá al progreso del sector salud, especialmente en regiones rurales donde prevalecen necesidades considerables frente al crecimiento demográfico alto y a las condiciones de marginalidad en que se encuentran; sin embargo, para suplir sus insuficiencias es de suponer la necesidad de involucrar a futuro además de las tecnologías clásicas existentes, otras de surgimiento reciente que proporcionen efectivamente mayores facilidades en cuanto a cobertura y escalabilidad, tanto de la infraestructura como de los servicios.

³² RENDON, Alvaro. EHAS: Infraestructura de Telecomunicaciones y Servicios de Información y Capacitación para la Salud Rural. En: Telecomunicaciones & Sociedad: GNTT Unicauca. Vol. 2, (Ago. 2004); p. 00.41

³³ CASTILLO, Edgard. Red Piloto de Teleasistencia Sanitaria. En: Telecomunicaciones & Sociedad: GNTT Unicauca. Vol. 2, (Ago. 2004); p. 00.07

Por su parte, el proyecto Telecentro Comunitario Agroindustrial Piloto en el Municipio de Silvia, “tiene el propósito de diseñar e implementar un Telecentro Comunitario Agroindustrial Piloto en el Municipio de Silvia, soportado en las TIC (Tecnologías de la Información y Comunicación), que permita a una población rural del Departamento del Cauca incrementar la productividad y el comercio, a beneficio del campesino, su comunidad, la región y el país”³⁴; en este sentido, una solución de interconexión inalámbrica facilitará las condiciones para un ambiente de trabajo favorable, superando las condiciones de aislamiento de las comunidades, con el consecuente progreso de sus actividades comerciales y generación de ambientes propicios para su formación y capacitación, dicha solución proveerá de un canal de comunicación sobre el que se transportarán servicios a la medida de las necesidades (por ejemplo, acceso a Internet, videoconferencia, entre otros).

Para cualquiera de los casos citados anteriormente, la inclusión de tecnologías de telecomunicaciones actuales y novedosas generará no solo cambios en los ámbitos de comunicación, sino también en las esferas social, laboral, jurídica y política, no obstante, este proceso deberá llevarse de manera gradual para que su impacto no genere traumatismos.

4.1.3 Determinación de alternativas. Entre las opciones que se plantean para llegar a un diseño que interconecte vía inalámbrica las distintas sedes, se plantean las siguientes:

- § Orientar los enlaces de interconexión a la utilización de tecnologías WiMAX y/o Wi-Fi.
- § Emplear enlaces PTP y/o PTM.
- § Trabajar con bandas no licenciadas (2,4 GHz o 5 GHz).
- § A través de los enlaces brindar servicios de Acceso a Internet de Alta Velocidad, servicios Multimediales y adicionalmente servicios de VoIP.
- § Elegir sitios de emplazamiento adecuados (Terraza FIET, Cerro Nueva Guambía, Cerro El Tranal, Centro de cableado de la sede Las Guacas, Cerro Munchique, Cerro

³⁴ www.teleagro.unicauca.edu.co

La Chapa, Cerro Las Tres Cruces, Vereda Tres Quebradas en el municipio de Mondomo y sede Unicauca en Santander de Quilichao).

- § Compra o arrendamiento de infraestructura.
- § Recurrir a un solo proveedor de equipos o a varios.

4.1.4 Evaluación de alternativas. El análisis de las alternativas planteadas en el ítem anterior, arroja las implicaciones siguientes.

- § **Tecnologías:** al orientar los enlaces de interconexión a la utilización de tecnologías WiMAX definitivamente se superarán las limitaciones que presentan las tecnologías Wi-Fi, especialmente aquellas relacionadas con el alcance de distancias largas y de operación en condiciones NLOS, ligadas directamente con el desempeño en ambientes exteriores; además de la diferencia obvia en el rango de transmisión, WiMAX cuenta con mejoras en la tecnología de radioenlace, QoS y seguridad (descritas en la sección 2.1 del Capítulo 2) que se ajustan mejor al propósito de interconexión de sedes; sin embargo, los costos de despliegues WiMAX inicialmente pueden ser altos, pero a largo plazo son más justificables que los de Wi-Fi.
- § **Topologías:** es posible utilizar enlaces PTP, pero no sería una elección ideal porque los requerimientos implican interconectar más de dos sedes, lo cual redundaría en costos, por lo tanto es más viable recurrir a una topología PTM porque puede acudir a sectorización y porque facilita la escalabilidad de la red. No obstante, es factible pensar en una combinación de ambas topologías para interconectar la sede de Santander de Quilichao, dado que esta se encuentra mucho más distante de la ubicación de la Red de Datos (FIET) que las demás sedes, por lo cual sería práctico incluir un enlace PTP de varios saltos, buscando mantener el nivel de la señal lo suficientemente fuerte y en consecuencia, un enlace más confiable.
- § **Bandas de Operación:** al decidirse no utilizar la tecnología Wi-Fi (802.11b y g) como solución de interconexión, se desacarta la banda de 2,4 GHz en la que trabaja, por lo

que se concentra la atención sobre la banda de 5 GHz, al existir varias regiones del espectro sobre las cuales puede trabajarse, 5,250-5,350 GHz, 5,470-5,725 GHz y 5,725-5,850 GHz, las cuales maneja WiMAX y además de estar disponibles en el país, no se encuentran tan inundadas de sistemas operativos, por lo que los casos de interferencia intersistemas serán poco probables; sin embargo la operación en esta región implica condiciones más exigentes para la propagación de la señal.

- § **Servicios:** la demanda típica para todas las sedes es el servicio de Acceso a Internet de Alta Velocidad, que en algunas (Las Guacas y Santander de Quilichao) actualmente se suministra vía modem, con implicaciones en cuanto a costo y limitaciones en velocidad, por lo que una solución de interconexión WMAN redundará en mejoras, extendiendo la red de acceso directo a Internet de la Universidad, como hoy en día se hace con la sede de Silvia en el marco de los proyectos que allí se desarrollan; además de este servicio básico, los enlaces de interconexión también estarán facultados para proporcionar servicios Multimediales y de VoIP. Estos servicios integrarán un ambiente propicio para el desarrollo de las comunidades, tanto académicas como rurales, contribuyendo con objetivos de formación, capacitación, crecimiento económico, salud e incluso de esparcimiento, sostenibles y escalables a largo plazo, sin necesidad de inversiones nuevas en infraestructura.

- § **Sitios de emplazamiento:** algunos no satisfacen condiciones de LOS con la Terraza de la FIET, como son la sede Las Guacas y la sede Santander de Quilichao, como si ocurre en la sede Silvia, donde la interconexión con la Red de Datos es posible realizarla mediante un enlace de un solo salto, existiendo dos alternativas, “FIET - Cerro Nueva Guambía” o “FIET - Cerro El Tranal”, teniendo más sentido proyectarse sobre la segunda opción porque se piensa que a futuro la infraestructura existente en el Cerro Nueva Guambía se trasladará al Cerro El Tranal (según lo manifestado en la sección 4.1.2 de este Capítulo). Para la sede Las Guacas, también se plantea un enlace de un solo salto, sin embargo deberá verificarse si es indispensable levantar una torre o simplemente ubicar la antena sobre el Centro de Cableado.

En el caso de Santander de Quilichao, para el enlace de interconexión un solo salto seguramente no será viable, debido a la distancia significativa a recorrer y a las condiciones del relieve, de manera que podría optarse por un enlace que tome una ruta diferente, para lo cual se plantean dos alternativas: la primera, elegir como sitios de emplazamiento aquellos en donde se encuentra infraestructura de Colombia Telecomunicaciones (torres de las repetidoras en el Cerro Munchique, en la Vereda Tres Quebradas del municipio de Mondomo y en el Cerro Las Tres Cruces); y la segunda, escoger aquellos donde se cuenta con infraestructura de Comcel (Cerro Munchique y Cerro La Chapa); esto con el fin de utilizar en arrendamiento las infraestructuras existentes (torres y suministro de potencia) y eliminar la necesidad de acondicionamientos costosos; entre estas dos alternativas, la segunda implica un menor número de saltos. La Figura 4-1 ilustra las opciones para los sitios de emplazamiento.

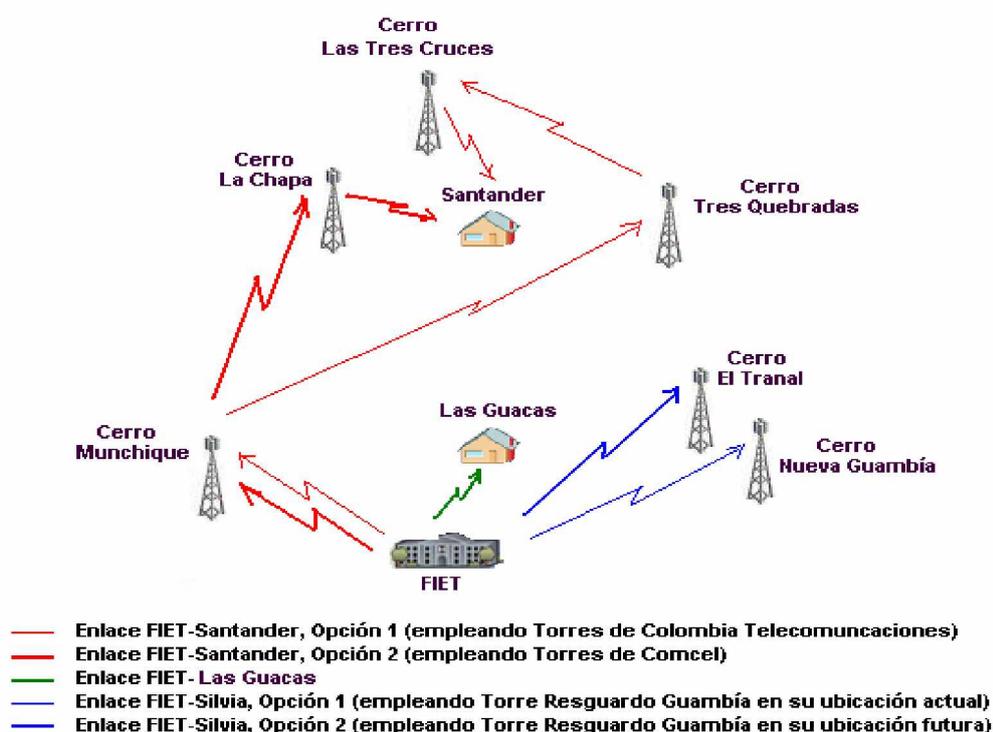


Figura 4-1. Alternativas para los sitios de emplazamiento.

§ **Compra o arrendamiento de infraestructura:** en lo posible, deberán establecerse relaciones con propietarios de infraestructuras de telecomunicaciones existentes, como por ejemplo, torres para la ubicación de antenas (Colombia Telecomunicaciones, Comcel, Resguardo de Guambía), en lugar de construirlas. Esto permitirá disminuir costos y acelerar la velocidad de despliegue de la solución, acudiendo a contratos de arrendamiento y a arreglos de derechos de paso.

§ **Proveedor de equipos:** el optar por un solo proveedor podría garantizar la compatibilidad entre equipos y posiblemente reduciría los costos por la demanda de equipos en cantidades mayores, pero también ataría la expansión del sistema al crecimiento de sus ofertas de mercado. Por otro lado, al recurrir a varios proveedores, la escalabilidad de la solución podría ser mayor, pero se corre el riesgo de disminuir el desempeño del enlace si no se eligen cuidadosamente los elementos de este, además la O&M del sistema en general podría tornarse más compleja y costosa. De otra parte, el proceso de importación de equipos posiblemente resultaría un poco más complicado cuando se eligen varios proveedores. Algunos de los proveedores que muestran soluciones que pueden ajustarse a las características para el diseño de los enlaces de este proyecto se consignan en la Tabla 4-1.

4.1.5 Selección de una vía. Partiendo de los análisis anteriores, las opciones que mejor conducen a proporcionar la interconexión inalámbrica entre las sedes en cuestión son las que se enuncian a continuación.

§ **Tecnología:** WiMAX.

§ **Topología:** PTM, específicamente ubicando la EB en la FIET, a la cual se conectarán tres nodos, sede Silvia, sede Las Guacas y sede Santander de Quilichao; este nodo último se interconectará mediante un enlace de tres saltos, en tanto que las otras sedes lo harán con uno solo, como se indica en la Figura 4-2.

Tabla 4-1. Algunos proveedores de soluciones factibles para el diseño de interconexión WiMAX.

PROVEEDOR ³⁵	EQUIPO	PRECIO (US\$)
Airspan Networks	Solución PTP AS 3030	-
	Solución PTM AS 4030	-
Alvarion	Solución PTM Brezze Access VL Estación Base	3.584
	Solución PTP Brezze Access LB	11.304
Aperto Networks	Wireless Solution Packet Wave 1000 PTM	-
	Wireless Solution Packet Wave Familia 100 Unidad Suscriptora	-
	Wireless Solution Packet Wave 600 PTP	-
Axxcelera	AB Access UNII	1.399
	AB Extender	799
Enterasys	RoamAbout PTP & PTM Outdoor Solution	723
	RoamAbout AP 3000	459
Hyperlink	Antena HyperLink HG 5824D – 5.8GHz	123,95
	Antena Hyperlink HG 5829D – 5.8 GHz	123,95
	Conector Nmale climp	3,45
Motorola	CANOPY – Solución Pre WiMAX 5.7 Ap 10 Mbps	1.595
	CANOPY 5.7 GHz, subscriber - bundle pack (50), wireless bridge	17.500
Proxim	Tsunami QuickBridge 60	2.090
	Puente Inalámbrico Tsunami gx32	5.148
	Sistema Inalámbrico PTM Tsunami	7.730
	Tsunami 5054 Pre WiMAX	2.349
	Cable de Bajas Pérdidas LMR 400 (15 metros)	65,10
	Lightning Protector/Surge Arrester	110,95
Rad Communications	Sistema Multiplexor PTP Airmux 200	3000
SmartBridges	AirHaul Nexus SB 3010	1.500
	AirHaul Nexus Pro SB 3011	2.400
	AirHaul2 Nexus Pro SB3021	3.800
	Antena Dish 23 dBi 5,8 GHz	330

§ **Bandas de Operación:** 5 GHz (en las regiones de 5,250-5,350 GHz, 5,470-5,725 GHz y 5,725-5,850 GHz).

§ **Servicios:** Acceso a Internet de Alta Velocidad, Multimediales y VoIP.

§ **Sitios de emplazamiento:** Terraza FIET, Centro de Cableado de la sede Las Guacas, sede universitaria Santander de Quilichao, Cerro El Tranal, Cerro Munchique, Cerro La Chapa.

³⁵ Los proveedores incluidos forman parte del Foro WiMAX, pero por el momento no disponen de soluciones WiMAX como tal, estas solo aparecerán una vez se haya completado el proceso de certificación; sin embargo, la mayoría disponen de soluciones Pre-WiMAX.

- § **Compra o arrendamiento de infraestructura:** arrendamiento de espacio en las torres de Colombia Telecomunicaciones y Comcel, ubicadas respectivamente en los Cerros Munchique y La Chapa, y acuerdos de derechos de paso en el Resguardo de Guambía, para la torre ubicada en el Cero El Tranal.
- § **Proveedor de equipos:** uno principal para la EB, CPEs y nodos; y según la conveniencia, otros para los elementos complementarios que requiera la solución.

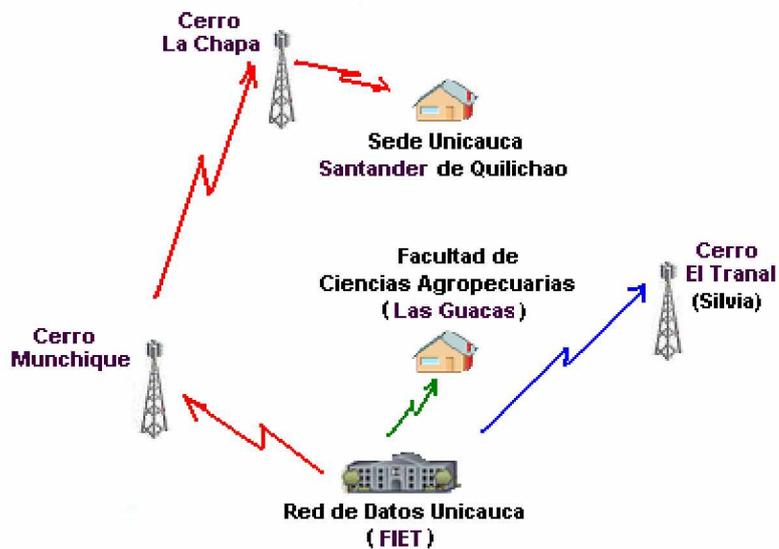


Figura 4-2. Interconexión PTM entre sedes Unicauca.

4.2 PARAMETROS TECNICOS

4.2.1 Identificación del modelo de negocio. Las sedes a interconectar se encuentran dispersas sobre un área geográfica que reúne las características descritas para un escenario rural, indicadas en la Tabla 3-2 del Capítulo 3. Específicamente, se trata de un escenario rural cuya proyección abarca fines sociales y académicos, sin ánimo de lucro, dotando a las comunidades académicas de la Universidad del Cauca en sus sedes de Las Guacas y Santander de Quilichao, y a los grupos de investigación de la misma Universidad que ejercen su campo de acción sobre las comunidades del municipio de Silvia, de un medio inalámbrico que les proporcione conectividad con la Red de Datos de

la Universidad, transportando de manera eficiente los servicios que cada entorno demanda para la satisfacción de sus necesidades.

En este sentido, existe una demanda prioritaria de servicios de *broadband* que no se han suplido adecuadamente, sea por la carencia de tecnologías de telecomunicaciones en los sitios implicados, o porque las tecnologías (tradicionales y recientes) allí utilizadas, no están orientadas para cumplir efectivamente tal propósito. Por fortuna, las políticas de descentralización y función social de la Universidad del Cauca van de la mano con los lineamientos del Estado y se cuenta con consideraciones normativas y regulatorias que fomentan la utilización de tecnologías nuevas para el desarrollo de la sociedad colombiana; prueba de ello es la atribución de bandas de frecuencia de uso libre mediante la Resolución 689 de 2004 del Ministerio de Comunicaciones, que ha abierto la puerta para considerar en un futuro cercano las condiciones regulatorias y de mercado para la introducción de tecnologías basadas en el estándar 802.16 como sustituto o complemento de la infraestructura existente en el país, mediante su inclusión entre las tecnologías BWA.

Por otro lado, la topografía básica de la región caucana y la distribución de consumidores potenciales sobre las diferentes regiones, se presta para un despliegue de tal magnitud, que además reviste posibilidades amplias de expansión y su sostenibilidad se fundamenta en la disminución de costos operativos, administrativos y financieros, así como en la interoperabilidad.

4.2.2 Planificación del espectro. Como se expresó en la sección 4.1.5 de este Capítulo, la banda elegida es la de 5 GHz, contando con tres regiones de operación posibles, 5,250-5,350 GHz, 5,470-5,725 GHz y 5,725-5,850 GHz. El tratamiento de las bandas de frecuencia se ciñe a las posibilidades que brinde la solución WiMAX disponible en el mercado, lo cual se determinará en la etapa de diseño.

4.2.3 Planificación de los servicios. Los servicios que se entregarán mediante los enlaces de interconexión pertenecen al grupo clasificado como de menor jerarquía (sección 3.3.3 del Capítulo 3), por lo tanto las exigencias en anchos de banda y velocidades de desempeño no son muy altas. Estos servicios son específicamente Acceso a Internet de Alta Velocidad, Servicios Multimediales y VoIP, los cuales se ofrecerán para todas las sedes con un desempeño de por lo menos 2 Mbps, puesto que de acuerdo con las características que cada entorno posee, este valor es suficiente; no obstante, las capacidades de la tecnología permiten satisfacer requerimientos superiores, por lo que se facilitaría la escalabilidad de servicios en el futuro.

En la Tabla 4-2 se dan a conocer las características de cada sede, incluyendo el cálculo de la capacidad de ancho de banda requerida para cada una, considerando la expresión:

$$CapacidadBW_T = \sum_{i=1}^N \left[Servicio_i \times \frac{Usuarios}{Servicio_i} \times \frac{BW}{Usuario} \right] \quad (4-1)$$

Donde:

Capacidad BW_T = Capacidad de ancho de banda para todos los servicios.

Usuarios = Cantidad de PCs a atenderse.

BW = Capacidad de ancho de banda por servicio.

y teniendo en cuenta que en la práctica, la capacidad típica del *backhaul* corresponde a la décima parte de la capacidad agregada de todos los extremos a interconectar (como se expresó en la sección 3.3.3 del capítulo anterior).

Tabla 4-2. Características de las sedes a interconectar con la Red de Datos de la Universidad del Cauca.

Sede	Infraestructura existente	Tipo de usuario	# personas que se beneficiarían*	BW _{servicio} [Kbps]	Capacidad BW _T Requerida [Mbps]	Capacidad BW _T Práctica [Mbps]
Las Guacas	1 Centro de Cómputo con 38 computadores	Facultad de Ciencias Agropecuarias	1.000	Internet: 128 VoIP: 64 Multimedia: 400	22,50	~ 2,25
Santander de Quilichao	1 Centro de Cómputo con 1 Servidor y 40 computadores	Sede universitaria	90	Internet: 128 VoIP: 64 Multimedia: 400	23,68	~ 2,36
Silvia	1 PC en Hospital San Carlos 1 PC en Hospital Mamá Dominga	Proyectos de investigación universitaria	Directas: 150 Indirectas: Comunidades de la región	Internet: 128 VoIP: 64 Multimedia: 400	1,18	~ 0,11

* Esta información se obtuvo mediante visitas a los sitios y entrevistas con las personas encargadas de la administración de los proyectos que se desarrollan en las sedes implicadas.

4.2.4 Análisis de aspectos complementarios. Algunas de las herramientas que se consideran para manejar parte de las variables que intervienen en el diseño de los enlaces de interconexión son:

§ **Herramientas para la adquisición de datos:**

- Ø **GPS:** permite la obtención de datos georeferenciados de los sitios de interés; facilitado por la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad.
- Ø **Altímetro:** entrega información sobre la altura (en metros sobre el nivel del mar, s.n.m) de los lugares en cuestión; también facilitado por la Facultad de Ingeniería Civil.
- Ø **Cinta métrica:** facilita la medida de distancias para la ubicación de equipos en los sitios de emplazamiento; igualmente facilitada por la Facultad de Ingeniería Civil.

- Ø **Binoculares:** permite la observación de lugares distantes; se emplea para determinar si existe o no línea de vista visual entre los sitios a interconectar; de propiedad de los realizadores de este proyecto.
- Ø **Brújula:** facilita la orientación de los sitios de interés con respecto al norte magnético terrestre; facilitada por la Facultad de Ingeniería Civil.

§ **Herramientas para el procesamiento de los datos adquiridos:**

- Ø **Aplicación Radio Mobile:** herramienta software de distribución gratuita que permite estudiar la cobertura inalámbrica para estudios de radio propagación con base en mapeo virtual; disponible en <http://www.cplus.org/rmw/english1.html>. En el Anexo C se entrega una guía para la utilización de dicha herramienta.
- Ø **Mapas digitales del Departamento del Cauca:** para la identificación y ubicación de los sitios en donde se encuentran las sedes de la Universidad del Cauca a interconectar, así como de los demás sitios implicados en los enlaces de interconexión; facilitados por la Corporación Regional del Cauca (CRC).

§ **Herramientas de simulación:**

- Ø **Demostración de la interfaz de gestión Web de SmartBridge:** permite visualizar una gestión virtual de la solución AirNexus disponible entre sus soluciones inalámbricas, mostrando una variedad de capacidades para el levantamiento de sitio, configuración de equipo, alineación de antenas, pruebas del enlace y estadísticas de operación del sistema, entre otras, con lo cual pueden comprenderse mejor los aspectos que se deben manejar desde la planeación, hasta la puesta en funcionamiento de una solución inalámbrica.

4.3 CONFIGURACION DEL ENLACE

Los ítems dilucidados en la sección anterior (sección 4.2) conforman la etapa de planeación; a partir de lo expresado allí, de aquí en adelante se presentan los aspectos relacionados propiamente con el diseño de los enlaces de interconexión entre las sedes de Las Guacas, Silvia y Santander de Quilichao con la Red de Datos de la Universidad. Así, en consonancia con lo esbozado en la sección 4.2 de este capítulo, aquí básicamente se define la topología del sistema a implementar y se determina el perfil del trayecto, procesos que se describen a continuación.

4.3.1 Definición de la topología del sistema. Como se indicó en la Figura 4-2, la topología PTM se eligió como estructura física en la que se dispondrán los elementos de red para interconectar las sedes en cuestión, la cual consiste de un nodo central (EB) ubicado en la FIET al que se conectan tres nodos (ESs), dos de ellos (Sede Las Guacas y Sede Silvia) mediante enlaces de un solo salto, mientras que el nodo restante (Sede Santander de Quilichao) a través de un enlace de tres saltos. Todos los enlaces se soportan sobre tecnología WiMAX funcionando en la banda no licenciada de 5 GHz, dos de los cuales satisfacen LOS y el restante trabaja en condiciones NLOS.

Esta selección se bosqueja en la Figura 4-3 y presenta los aspectos siguientes:

- § La existencia de tres puntos remotos que requieren conexión con un mismo punto supone enlaces individuales con el nodo principal, configurando una topología PTM típica. Por lo tanto, una sola EB ubicada en la Facultad de Ingenierías constituye el nodo central a través del cual se brinda comunicación bidireccional con la Red de Datos de la Universidad.
- § No se requiere conexión directa entre ESs, por lo que la información puede conducirse por medio de un nodo central (EB), disminuyendo además los costos de inversión y operación.

- § Las condiciones de LOS entre cada nodo elegido favorecen la utilización de un número de saltos mínimo para la solución, alcanzando un rango de distancias importante en cada salto.
- § El tipo de servicios que demandan los usuarios del sistema son bastante similares ya que se enmarcan dentro del mismo modelo, es decir, la interconexión de sedes universitarias descentralizadas o comunidades distantes con necesidades de conexión hacia la Universidad del Cauca.
- § La solución de interconexión inalámbrica en topología PTM entre las sedes distantes y la Red de Datos de la Universidad se adecua mejor a los requerimientos del entorno que las topologías PTP y Malla; y pese a operar por arriba de los 3 GHz, donde su utilidad es menor, los servicios requeridos en cada sede demandan capacidades de ancho de banda y desempeño que pueden suplirse sin inconvenientes.

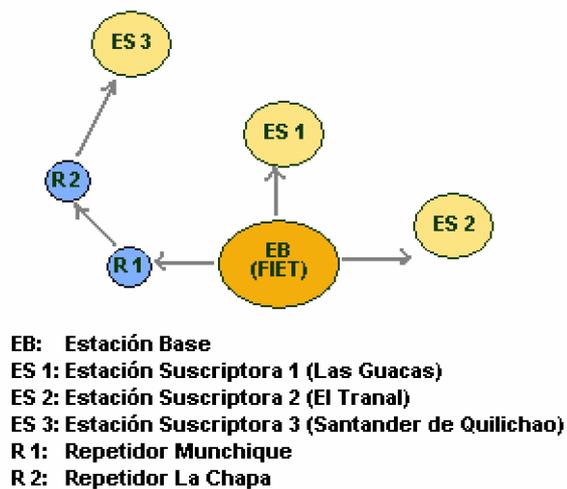


Figura 4-3. Enlaces de Interconexión WiMAX en Topología PTM.

4.3.2 Determinación del Perfil del Trayecto. En esta instancia la caracterización de los sitios en donde se ubican los extremos a interconectar arroja la información siguiente.

§ **Ubicación de los Extremos a Interconectar.**

Ø **FIET:** este es el punto denominado nodo principal en el que se instalará la EB WiMAX con soporte PTM para comunicar a los demás puntos extremos alcanzados mediante uno o más saltos. Para la determinación del punto específico al interior del edificio de Ingenierías se consideraron aspectos como altura del lugar, seguridad y accesibilidad a fuentes de corriente alterna y a infraestructura de red, seleccionándose la terraza de la FIET, conocida como “El Palomar”, que cuenta con una torre de 5 metros de altura, convirtiéndose en el punto mejor ubicado de las instalaciones para el objetivo propuesto, al tiempo que es el único autorizado por la administración universitaria para montar equipo inalámbrico. La Figura 4-4 muestra el sitio seleccionado y la Tabla 4-3 indica los datos de localización geográfica y otros asociados al mismo.

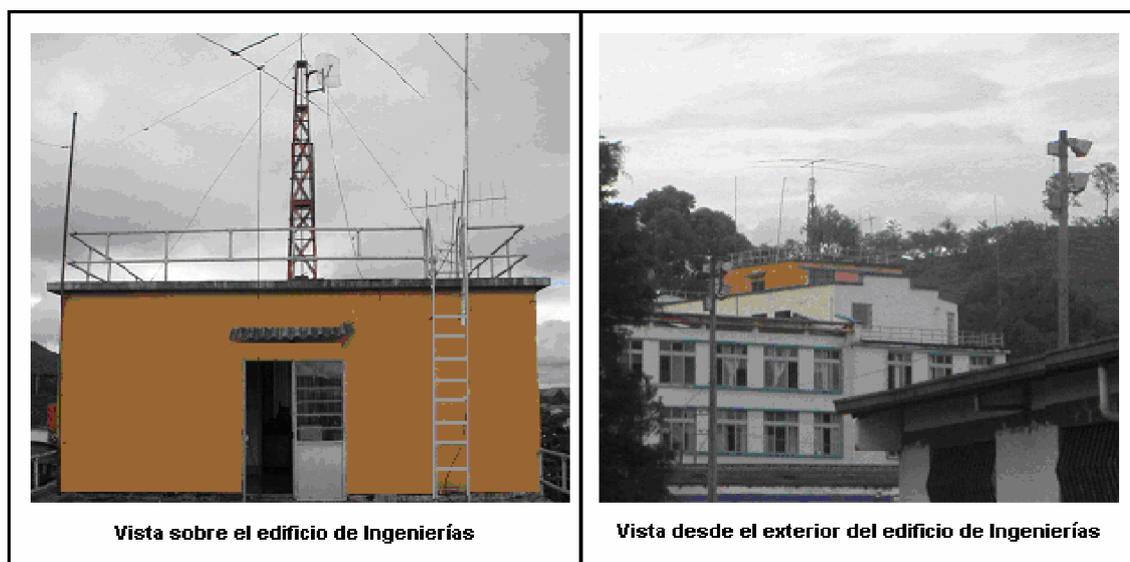


Figura 4-4. Lugar de ubicación de la EB WiMAX en la FIET.

Tabla 4-3. Información del lugar de ubicación de la EB WiMAX.

TERRAZA FIET – EDIFICIO INGENIERÍAS (“El Palomar”)	
Latitud	2°26'48" N
Longitud	76°35'55" O
Altitud	1.744 m
Distancia desde la torre hasta el Punto de Red	15 m
Altura Torre	5 m

- Ø **Facultad de Ciencias Agropecuarias, Sede Las Guacas:** lugar en donde se ubicará la primera ES WiMAX (ES1); este punto se alcanzará mediante un enlace de un solo salto (FIET - Las Guacas) pese a que existe un obstáculo entre los extremos de interés, sobre el cual se amplía información en una sección posterior de este capítulo.

Actualmente en esta sede se desarrollan programas académicos relacionados con los sectores agrario, pecuario y de alimentos, a quienes se les provee acceso a la red a través de conexiones prestadas por terceros³⁶, lo cual genera costos mensuales por concepto de arrendamiento del enlace a la empresa prestadora del servicio. La Figura 4-5 da a conocer los sitios de interés sobre dicha sede y en la Tabla 4-4 se consignan sus datos de posición geográfica, junto con información asociada al sitio. En la elección del sitio para la ubicación de los equipos de ES WiMAX se consideraron parámetros como altura del lugar, cercanía a fuentes de corriente alterna y a puntos de red, siendo el lugar adecuado sobre el Centro de Cableado de esta sede universitaria.



Figura 4-5. Lugar de ubicación de la ES WiMAX en la Facultad de Ciencias Agropecuarias

³⁶ Mediante 4 módems HDSL administrados a través de la infraestructura de la red de EMTel, por medio de su central telefónica ubicada en el Barrio La Paz, los cuales proveen una velocidad de hasta 2 Mbps. Esta solución genera altos costos mensuales debido a la suma que se debe pagar por el alquiler del enlace a la empresa prestadora del servicio.

Tabla 4-4. Información del lugar de ubicación de la ES WiMAX en la Facultad de Ciencias Agropecuarias.

CENTRO DE CABLEADO – FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS	
Latitud	2°28'13" N
Longitud	76°33'03" O
Altitud	1845 m
Distancia desde la torre hasta el Punto de Red	14 m

Ø **Municipio de Silvia - Cauca, Cerro El Tranal:** corresponde al lugar de ubicación de la segunda ES WiMAX (ES 2), que servirá para el radio enlace principal entre Popayán y Silvia en el marco de los proyectos de investigación universitaria (EHAS-Silvia, ReTAS y Telecentro Agroindustrial Piloto en el Municipio de Silvia). La existencia de LOS entre los extremos en cuestión da vía para utilizar un enlace con un salto directo entre ellos. El criterio para la elección de este sitio se basa en las apreciaciones del Grupo de Ingeniería Telemática (Sección 4.1.2 de este Capítulo) sobre el traslado posible de la infraestructura existente en el Cerro Nueva Guambía hacia el Cerro El Tranal, reiterando que para este proyecto tiene más proyección pensar en el diseño con esa ubicación futura. La Figura 4-6 indica las condiciones de ubicación para la interconexión de este punto, a la vez que presenta el escenario del radio enlace actual (Wi-Fi); en la Tabla 4-5 se consignan los datos georeferenciados del lugar, junto a otros asociados con este.

Tabla 4-5. Información del lugar de ubicación de la ES WiMAX en Silvia.

CERRO EL TRANAL – MUNICIPIO DE SILVIA	
Latitud	2°39'06"
Longitud	76°21'19"
Altitud	3.170 m
Altura de la Torre	30 m

Cortesía: Proyecto EHAS – Silvia.

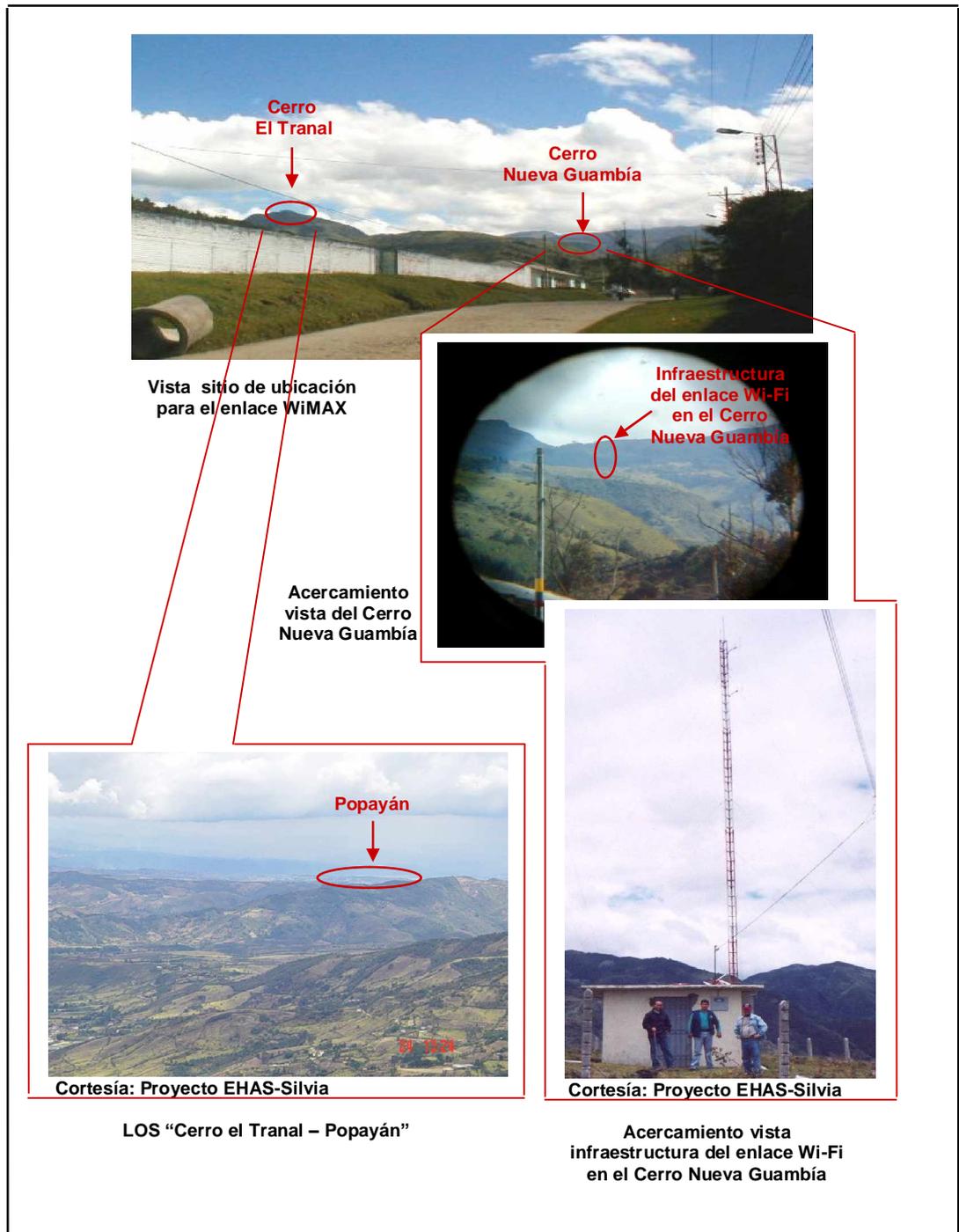


Figura 4-6. Lugar de ubicación de la ES WIMAX en Silvia y del enlace Wi-Fi actual.

- Ø **Sede Universitaria Santander de Quilichao:** corresponde al lugar en donde se ubicará la tercera ES WiMAX (ES 3); este punto, por encontrarse muy distante de la FIET, se alcanzará mediante un enlace de tres saltos (FIET – Cerro Munchique – Cerro La Chapa – Sede Universitaria Santander de Quilichao), donde los puntos intermedios del enlace se eligieron debido a la existencia de infraestructura de telecomunicaciones en sitios que reúnen condiciones favorables para el propósito de este diseño, en dichos puntos se ubicarán dos estaciones repetidoras WiMAX.

En la actualidad, la sede cuenta con una conexión a Internet³⁷, que además de generar costos es bastante deficiente, suscitando inconvenientes dentro de la comunidad educativa, requiriéndose soluciones inmediatas que aporten mejores condiciones en el proceso de descentralización universitaria. La Figura 4-7 revela los sitios de interés entorno a la sede universitaria de Santander de Quilichao y la Tabla 4-6 presenta sus datos de posición geográfica, junto con información asociada al sitio.

En la elección del sitio para la ubicación de los equipos de ES WiMAX se consideraron parámetros como altura del lugar, seguridad, cercanía a fuentes de corriente alterna y a puntos de red, donde la arquitectura de la sede orientó al establecimiento de estos en la oficina administrativa como el punto más adecuado, al encontrarse allí el servidor, disponer de un mástil en su parte superior y estar cercana al centro de cómputo; la altura total desde el suelo hasta la punta del mástil en este sitio es de 7 metros.

³⁷ Dispone de un servidor y 40 computadores (la mitad en estado regular o malo), que se conectan vía MODEM (56 Kbps) a la Red Telefónica Pública (RTPC) de Santander mediante una cuenta "Internautas" de Colombia Telecomunicaciones.



Sede Universitaria Santander de Quilichao



Equipo destinado como Servidor de la Sede



Vista de Santander de Quilichao desde el Cerro La Chapa



Centro de Cómputo de la Sede



Torre Comcel Cerro La Chapa



Torre Colombia Telecomunicaciones Cerro Munchique

Figura 4-7. Lugar de ubicación de la ES WiMAX en Santander de Quilichao.

Tabla 4-6. Información del lugar de ubicación de la ES WiMAX en Santander de Quilichao.

SEDE UNIVERSITARIA SANTANDER DE QUILICHAO	
Ubicación ES WiMAX	Sede universitaria
Latitud	3°00'32.7" N
Longitud	76°29'07.5" O
Altitud	1120 m
Distancia desde la torre hasta el Punto de Red	12 m
Ubicación Repetidora WiMAX 1	Cerro Munchique
Latitud	2°31'19" N
Longitud	76°57'38" O
Altitud	3.043 m
Altura de la Torre	50 m
Ubicación Repetidora WiMAX 2	Cerro La Chapa
Latitud	2°56'11.5" N
Longitud	76°34'27.4" O
Altitud	2.120 m
Altura de la Torre	35 m

§ **Cálculo de la longitud de los saltos que conforman los enlaces de interconexión.**

Este proceso se llevó a cabo a partir de la información de cada sede, presentada en el ítem anterior. Para tal efecto, se utilizaron básicamente dos herramientas software, un mapa digital del Departamento del Cauca (para ubicar los sitios implicados en cada salto) y "Radio Mobile" (para obtener las distancias de los saltos); los resultados obtenidos se ilustran en la Figura 4-8.

4.4 LEVANTAMIENTO DE SITIO

Teniendo en cuenta que se trata de una solución cuya configuración es PTM, las actividades involucradas en esta fase se aplicaron por separado para cada salto del enlace, lo cual idealmente debe realizarse para cualquier diseño. Esto fue posible porque al elegir tecnología WiMAX el número de saltos que conforman el enlace es mínimo; este proceso habría sido más extenso, complicado y engorroso si se hubiera optado por tecnología Wi-Fi, debido a la necesidad de incrementar significativamente el número de saltos. A continuación se detalla la información obtenida en cada actividad.

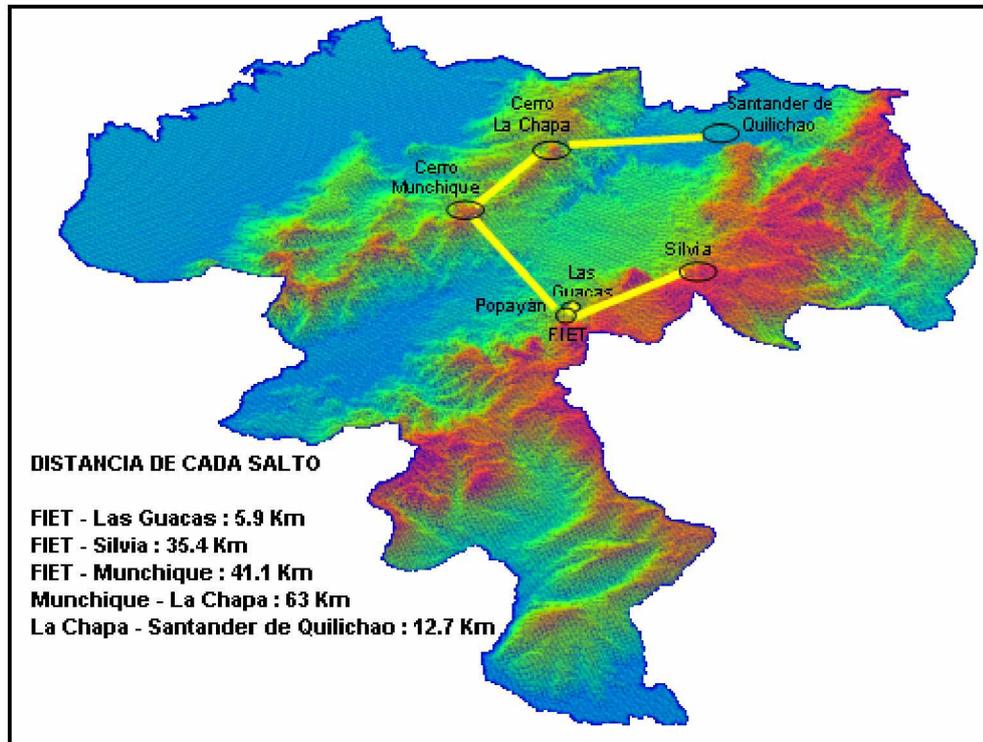


Figura 4-8. Enlaces y distancias para la interconexión WiMAX Unicauca.

4.4.1 Determinación de LOS y Cálculos de Fresnel.

§ **Enlace “FIET – Las Guacas”.** En este caso, las observaciones visuales identifican la presencia de un obstáculo (un cerro) sobre el trayecto, cuya información puede apreciarse en la Figura 4-9 y en la Tabla 4-7. Esto conllevó a verificar las condiciones para garantizar LOS radioeléctrica entre los extremos a interconectar, pues es una condición indispensable para que la señal inalámbrica llegue al extremo receptor sin que el obstáculo existente la atenúe significativamente; sin embargo se recuerda que al utilizar tecnología WiMAX, la cual tiene la posibilidad de operar en ambientes NLOS siempre y cuando las condiciones del enlace (terreno, fenómenos de propagación, entre otras) no sean demasiado críticas (como se considera en este enlace en particular), existirán casos en que pese a la utilización de las técnicas implementadas para trabajo NLOS, no se podrá lograr un enlace exitoso. Adicionalmente, las

Plantillas que reúnen el resto de información de cada extremo de este enlace se presentan el Anexo D-1.



Figura 4-9. Inspección visual de LOS para el enlace “FIET – Las Guacas”.

Tabla 4-7. Información sobre el obstáculo en el enlace “FIET- Las Guacas”.

OBSTÁCULO SOBRE EL ENLACE “FIET – LAS GUACAS”	
Latitud	2°27'56" N
Longitud	76°34'13" O
Altitud	1.816 m
Distancia hasta la FIET	3.96 Km
Distancia hasta Las Guacas	1.96 Km

En consecuencia, para determinar la existencia o no de LOS, se recurrió a la utilización de la herramienta software “Radio Mobile”, la cual permite simular las condiciones del enlace mediante el manejo de los parámetros más sobresalientes de

este; y posteriormente se corroboraron los resultados obtenidos, mediante el desarrollo de los cálculos de Fresnel. La herramienta “Radio Mobile” incluye la ayuda de cartografía digital permitiendo establecer el relieve y las condiciones del radio enlace más cercanos a la realidad, lo cual se presenta a través de una interfaz gráfica; su manejo implica descargar un mapa digital³⁸ de la región o área en estudio, así como ingresar las posiciones de los puntos que se desean ubicar y algunas especificaciones típicas de equipos (como potencia del transmisor, pérdidas de línea, ganancia de las antenas, sensibilidad del receptor y altura de las antenas) que se aspiran utilizar; para ello se adoptaron valores críticos de manera que se evalúe el desempeño del enlace en las condiciones más extremas³⁹ (para los demás enlaces se procedió de manera similar). En la Figura 4-10 y en la Figura 4-11, se enseñan los resultados más relevantes obtenidos para este enlace, indicando respectivamente la ubicación de las sedes y el obstáculo sobre un mapa, y luego el perfil del enlace.

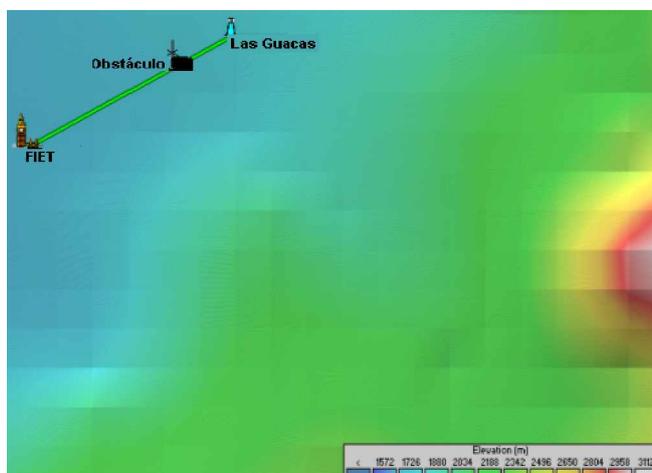


Figura 4-10. Enlace “FIET-Las Guacas” representado sobre el mapa de “Radio Mobile”

En esta figura se observa que aparentemente el obstáculo seleccionado no interfiere sobre la trayectoria de la señal, pues la línea de color “verde” con que esta se indica, según la simbología manejada por la herramienta, representa una señal de +3 dB,

³⁸ Disponible en http://www.geoengine.nima.mil/geospacial/SW_TOOLS/NIMAMUSE/webinter/rast_roam.html

³⁹ Las pérdidas de línea se consideran de 1 dB, que es el valor máximo permitido; y valores altos de sensibilidad del receptor, entre los entregados por los fabricantes de equipos.

indicando que la señal no sufre pérdidas importantes; sin embargo la herramienta trabaja en condiciones ideales, por lo que las características del terreno, la vegetación presente en la zona y la forma del patrón de radiación de las antenas pueden inducir alguna variación en los resultados, complicando realizar el enlace con un solo salto.

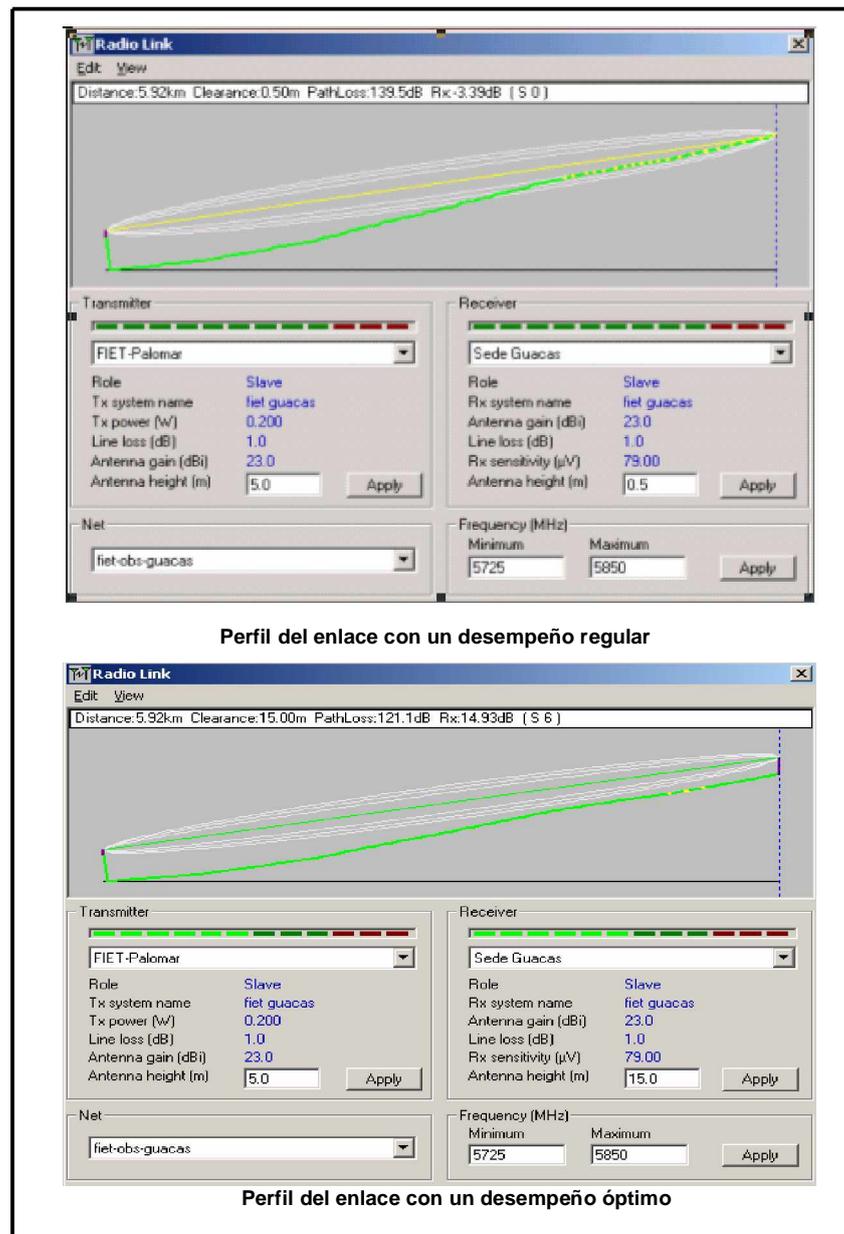


Figura 4-11. Perfil del enlace “FIET - Las Guacas” según “Radio Mobile”

En esta figura se observa que el perfil del enlace entre los puntos de emplazamiento en cuestión, mejora cuando la altura de la antena en el extremo receptor (Sede Las Guacas) se incrementa en diez metros; esto también se deduce siguiendo la simbología manejada por la herramienta, en donde el color “verde” representa una señal por encima de +3 dB (señal ideal, sin pérdidas importantes), el color “amarillo” indica una señal mayor o igual que -3 dB (señal parcialmente bloqueada, con algunas pérdidas) y el color “rojo” una señal por debajo de -3 dB (pérdida total de señal).

Los resultados entregados por “Radio Mobile” se corroboran en seguida realizando los cálculos de Fresnel, con el fin de evaluar definitivamente la viabilidad del enlace en un solo salto. Este procedimiento consiste en calcular la altura requerida para la ubicación de la antena en la sede Las Guacas, para liberar la obstrucción que se presenta sobre la trayectoria que sigue la señal a transmitir desde la sede de Ingenierías, como se presenta a continuación.

La altura de la obstrucción más significativa (h_o), es:

$$h_o = 1.816 \text{ m} \quad (4-2)$$

Ahora, debido a la curvatura terrestre, es necesario agregar una altura a h_o , de acuerdo con un Factor de Corrección; esta nueva altura se denota por h_k , y se obtiene de la expresión:

$$h_k = \frac{d_1 * d_2}{2KR} \quad (4-3)$$

donde:

d_1 : distancia del obstáculo a la EB.

d_2 : distancia del obstáculo a la ES.

K : factor de corrección por curvatura terrestre (para Colombia, $K = 4/3$).

R : Radio de la Tierra ($R = 6.380 \text{ Km}$).

Aplicando los valores correspondientes en la expresión anterior, resulta:

$$h_k = \frac{3,96[Km]*1,96[Km]}{2*4/3*6.380[Km]} = 4,5620*10^{-4} Km = 0,456m \quad (4-4)$$

Por lo tanto, la Altura Corregida de la Obstrucción (h_c), conformada por la adición de h_o y h_k , es:

$$h_c = h_o + h_k = 1.816m + 0,456m = 1.816,456m \quad (4-5)$$

Por otro lado, el Radio de Fresnel (R_f) se calcula con la expresión siguiente:

$$R_f = 17,3 \sqrt{\frac{n}{f} \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (4-6)$$

Donde:

n : Zona de Fresnel (como se trata de liberar la Primera Zona, entonces $n = 1$)

f : frecuencia en GHz (para este caso, $f = 5.78$ GHz es la frecuencia de operación)

Reemplazando los valores respectivos en la expresión anterior, se llega a:

$$R_{f1} = 17,3 * \sqrt{\frac{1}{5,78} * \frac{3,96*1,96}{3,96+1,96}} = 8,24m \quad (4-7)$$

Es necesario tener en cuenta que para asegurar el buen desempeño del enlace a nivel práctico, basta con liberar el 60% de la Primera Zona de Fresnel, con tal de optimizar el diseño y reducir los costos; de modo que:

$$R_{f1}' = 0,6 * R_{f1} = 0,6 * 8,24m = 4,94m \quad (4-8)$$

De esta manera, en la obstrucción existente es necesario liberar la altura resultante de sumar h_c y R_{f1}' , la cual se denota por h_T , indicada a continuación.

$$h_T = h_c + R_{f1}' = 1.816,456m + 4,94m = 1.821,396m \quad (4-9)$$

Para liberar h_T , con base en los resultados anteriores y teniendo en cuenta que en la Facultad de Ingenierías se dispone de una torre de 5 m de altura sobre el edificio, se calcula la altura de la torre que se necesita en la sede Las Guacas, como se indica gráficamente en la Figura 4-12.

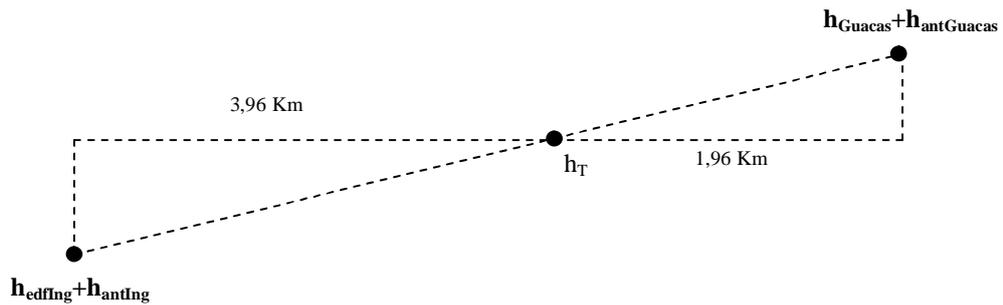


Figura 4-12. Relación de alturas para el enlace “FIET – Las Guacas”.

De la gráfica anterior, por relación de triángulos, se tiene:

$$\frac{h_{Guacas} + h_{antGuacas} - h_T}{1,96} = \frac{h_T - h_{edfIng} - h_{antIng}}{3,96} \quad (4-10)$$

de donde, finalmente se despeja $h_{antGuacas}$, como se indica a continuación.

$$h_{antGuacas} = h_T - h_{Guacas} - \frac{1,96}{3,96} * (h_{edfIng} + h_{antIng} - h_T) \quad (4-11)$$

y reemplazando los valores respectivos, se tiene:

$$h_{antGuacas} = 1.821,396 - 1.845 - \frac{1,96}{3,96} * (1.744 + 5 - 1.821,396) = 12,23m \cong 15m \quad (4-12)$$

Este resultado prácticamente coincide con el de la herramienta “Radio Mobile”, señalando que en el extremo receptor sería ideal montar una torre de 15 m de altura para la ubicación de la antena, señalando que el enlace sería aún más viable con la utilización de la tecnología WiMAX que con Wi-Fi por cuanto la primera recurre a técnicas para operación en entornos NLOS disminuyendo así los inconvenientes que

podrían introducirse por la existencia de la obstrucción en consideración, más aún teniendo en cuenta que se trata de un trayecto relativamente corto, enmarcado dentro de la cobertura amplia de las WMAN, y que el obstáculo entre los extremos no es demasiado crítico; con Wi-Fi este enlace resultaría en un desempeño bajo debido a la distancia del trayecto y a la caracterización de los servicios que se ofrecerá en la sede universitaria.

§ **Enlace “FIET – Silvia”.** En este caso, de acuerdo con lo dado a conocer por el Proyecto EHAS-Silvia, debido a la distancia amplia entre las sedes (FIET y Cerro El Tranal) y a la carencia de herramientas de observación de largo alcance, es difícil identificar ópticamente los dos puntos, sin embargo un análisis con herramientas software y visitas a cada instalación concluyeron que se dispone de LOS, sin obstáculos críticos. A tal determinación se llegó con la utilización de un láser de gran potencia⁴⁰, de propiedad de la Facultad de Educación de la Universidad del Cauca. Esta información suministrada por el Proyecto EHAS-Silvia, permite afirmar que es viable establecer el enlace mediante un solo salto.

Por otra parte, los resultados obtenidos con “Radio Mobile” para el análisis de este enlace se indican en la Figura 4-13 y en la Figura 4-14, describiendo respectivamente el mapa y el perfil del enlace provistos por la herramienta. En la Figura 4-13 se observa el trayecto que sigue la señal transmitida desde la FIET hacia el Cerro el Tranal con una línea de color “amarillo”, lo cual significa que la señal está parcialmente obstruida (señal igual o por encima -3 dB). En la Figura 4-14 se despliegan algunos de los intentos realizados para lograr el perfil deseado para el enlace; en la parte superior de esta figura, se nota que con los valores iniciales para la altura de torre y para las especificaciones del equipo en el extremo receptor, el perfil del enlace es pésimo, lo cual se interpreta por el color “rojo” con que esta se muestra; en la parte intermedia, se incrementan los valores de algunos parámetros (altura de la torre y mejor sensibilidad del receptor) en el sitio de emplazamiento de la ES, pero a

⁴⁰ Durante la etapa de implementación del Proyecto EHAS – Silvia, la alineación de antenas se logró con la ayuda de dicho láser.

pesar de revelarse un progreso sobre el perfil (cambio de color “rojo” a “amarillo”), el resultado logrado no es satisfactorio; finalmente, en la parte inferior de la figura, se visualiza el perfil deseado, con niveles de señal por encima de +3 dB (color “verde”), alcanzado después de ensayos reiterados variando las condiciones del enlace, permitiendo concluir que a partir de las características establecidas allí, redundarán mejoras en el perfil del enlace conforme estas continúen perfeccionándose (por ejemplo, incrementando la altura de torre, mejorando la sensibilidad, aumentando la ganancia de antena y aplicando potencias de transmisión mayores, entre otras).

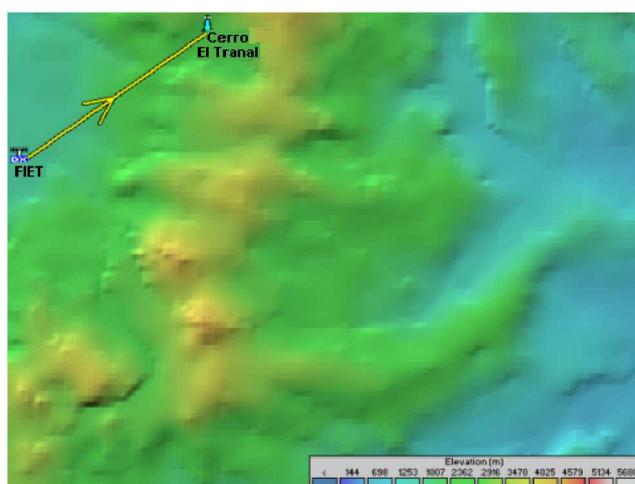


Figura 4-13. Enlace “FIET-Silvia” representado sobre el mapa de “Radio Mobile”

Al contar con LOS entre los extremos a interconectar, no se considera aplicar los cálculos de Fresnel, pero se debe tener en cuenta que las fluctuaciones de fase entre una y otra Zona de Fresnel pueden hacer que las reflexiones del lóbulo lateral del patrón de radiación lleguen en fase o no con el lóbulo principal en recepción, según las características presentes en el trayecto (presencia de lagos, ríos y vegetación). Por lo tanto, en esta actividad solo resta suministrar la información de las Plantillas de los sitios de emplazamiento de la EB (FIET) y la ES (Cerro El Tranal)⁴¹; estas Plantillas se enseñan en el Anexo D-2.

⁴¹ La información suministrada en la Plantilla de cerro El Tranal fue suministrada por el Proyecto EHAS-Silvia.

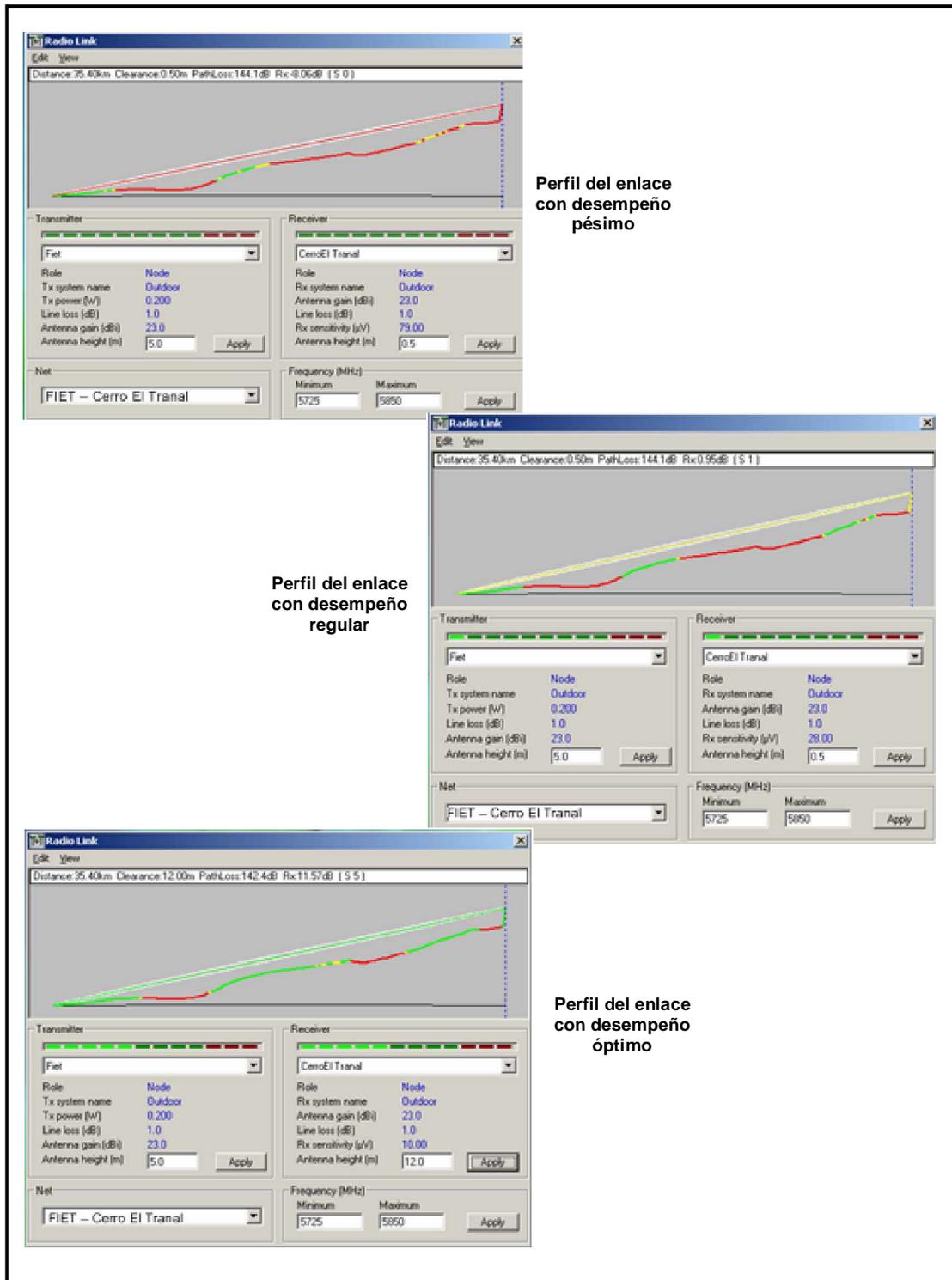


Figura 4-14. Perfil del enlace "FIET - Silvia" según "Radio Mobile"

§ **Enlace “FIET – Santander de Quilichao”.** En este caso, existen dos desafíos bastante complicados de enfrentar para establecer un enlace de un solo salto, que son la distancia supremamente larga (63,8 Km) entre los dos extremos y las condiciones impuestas por el relieve montañoso existente entre ellas, por lo cual es preferible recurrir a una nueva trayectoria que bordee los obstáculos más sobresalientes, para lograr menor degradación de la señal transmitida.

Con base en lo anterior, se incluyen dos nodos entre la FIET y Santander de Quilichao, que son el Cerro Munchique y el Cerro La Chapa, con los cuales pese a que se mantienen distancias largas en el camino que sigue la señal, se busca contar con LOS en cada salto (desde el extremo donde se ubicará la EB, pasando por los nodos que actuarán como puentes, hasta el extremo donde se emplazará la ES receptora), disminuyendo la posibilidad de degradación en la señal y por tanto mejorando las condiciones para un desempeño superior del enlace.

En consecuencia, prosiguiendo con la verificación de LOS para cada salto, se reunió la información consignada en las Plantillas de cada emplazamiento, las cuales se indican en el Anexo D-3. Este procedimiento se condujo mediante los análisis correspondientes de cada sitio, a través de visitas a algunos de ellos⁴², como también recurriendo a fuentes de información confiables, particularmente cuando el acceso al lugar no fue posible, lo cual confirmó la condición buscada (LOS). Complementando los análisis anteriores, a continuación se dan a conocer los resultados conseguidos con la utilización de “Radio Mobile”.

El mapa incluyendo cada salto del enlace se indica en la Figura 4-15, en donde se distinguen las trayectorias seguidas por la señal transmitida con la línea de color “verde”, lo cual permite interpretar que no se presentan pérdidas importantes sobre el

⁴² Se contó con autorización para el acceso a los sitios de emplazamiento en Popayán, Cerro La Chapa y Santander de Quilichao, mientras que en el Cerro Munchique no ocurrió lo mismo, por lo que se recurrió a obtener la información de dicho sitio a través de entrevistas con personas que tienen permitido el ingreso al lugar (vinculadas a empresas e instituciones como Colombia Telecomunicaciones, Comcel, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Corporación Regional del Cauca y Universidad del Cauca).

enlace, demostrando la conveniencia de los saltos sugeridos para este. Adicionalmente, el perfil correspondiente para cada salto se observa en las Figuras 4-16 a 4-18, señalando la necesidad de variar los parámetros iniciales de los nodos de repetición hasta obtener el perfil deseado en cada uno, con lo cual el salto final (Cerro La Chapa – Santander de Quilichao) muestra resultados sobresalientes sin demandar exigencias mayores, gracias a la cercanía entre los dos puntos finales.

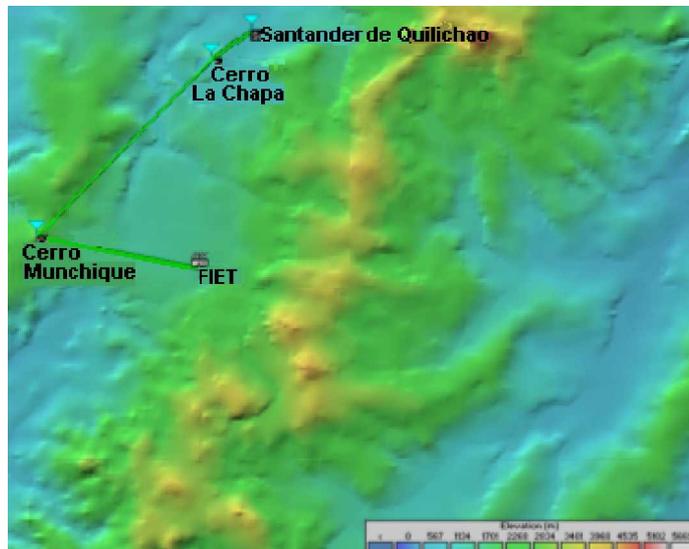
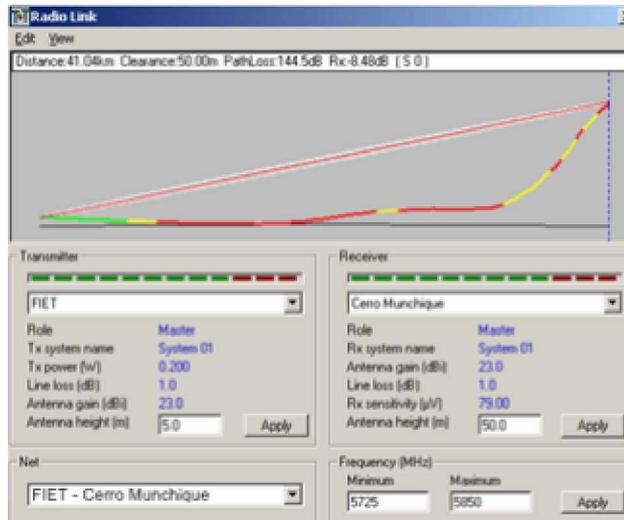
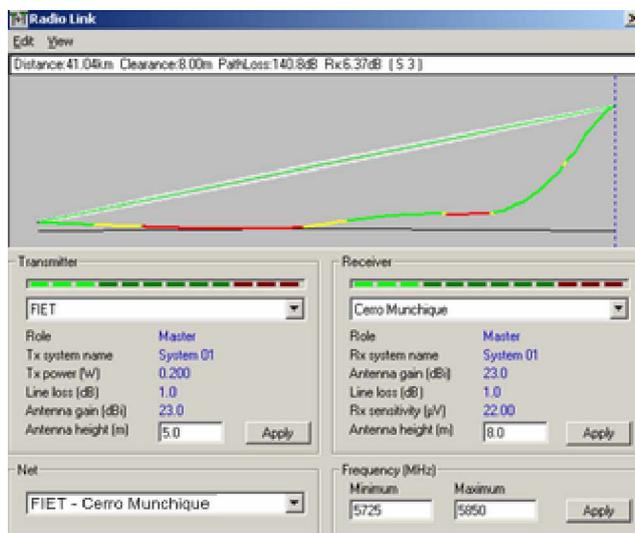


Figura 4-15. Enlace “FIET-Santander de Quilichao” representado sobre los mapas de “Radio Mobile”.

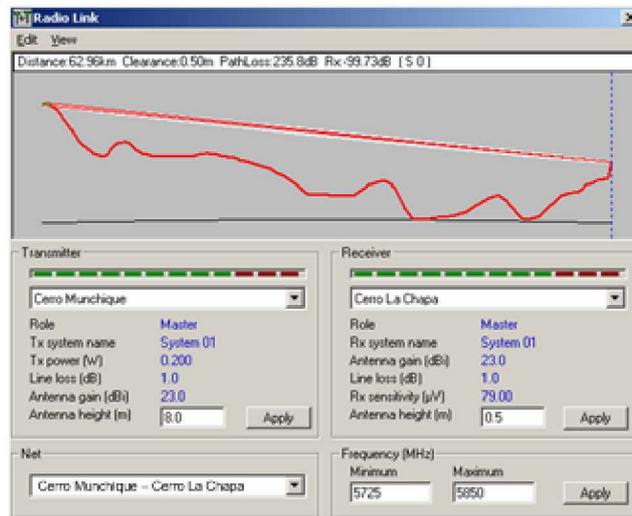


Perfil con desempeño pésimo

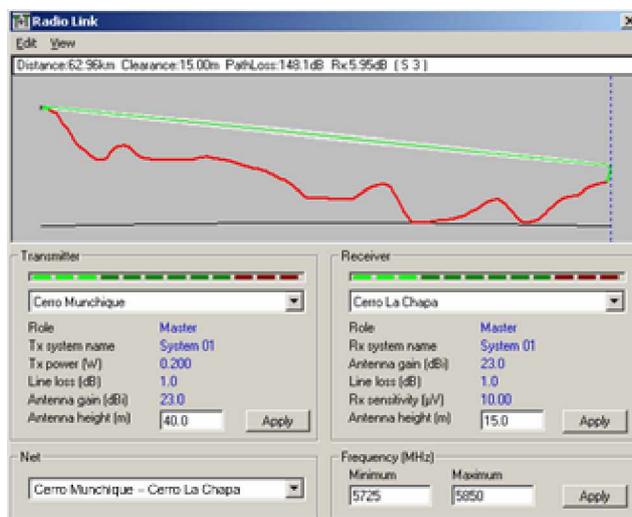


Perfil con desempeño óptimo

Figura 4-16. Perfil del salto “FIET – Cerro Munchique” según “Radio Mobile”



Perfil con desempeño pésimo



Perfil con desempeño óptimo

Figura 4-17. Perfil del salto “Cerro Munchique – Cerro La Chapa” según “Radio Mobile”

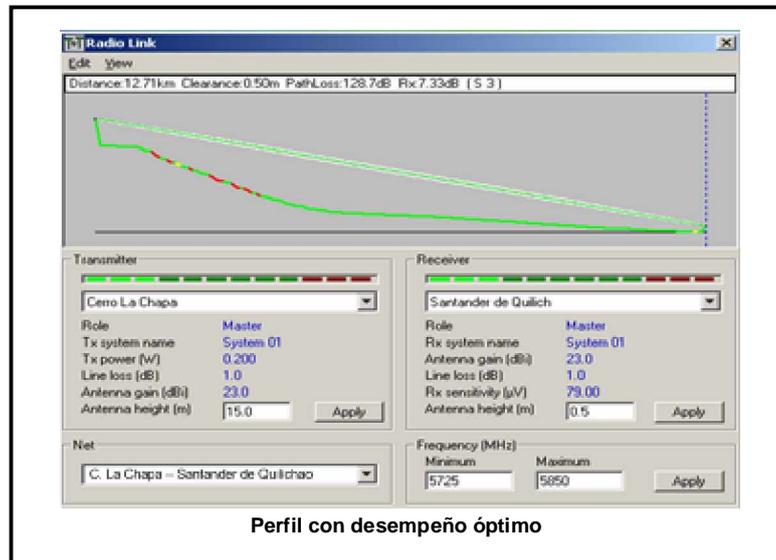


Figura 4-18. Perfil del salto “Cerro La Chapa – Santander de Quilichao” según “Radio Mobile”

Como se ha constatado la existencia de LOS para cada salto que conforma el enlace en cuestión, se realizan las mismas consideraciones presentadas para el caso del enlace “FIET- Silvia”. Así, el enlace “FIET – Santander de Quilichao” se define de acuerdo con las características resumidas en la Figura 4-19, en donde una idea del perfil total de este, se forma a partir de la unión de cada salto que lo constituye, retomando los resultados finales de las tres figuras anteriores (Figuras 4-16 a 4-18).

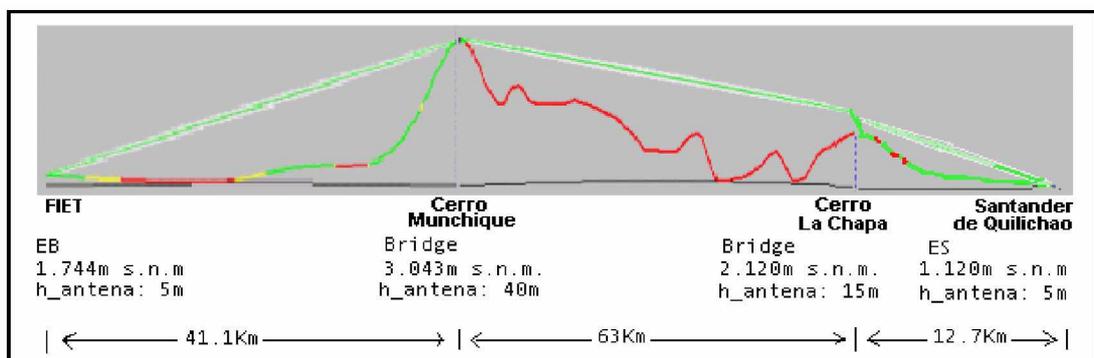


Figura 4-19. Perfil del enlace “FIET – Santander de Quilichao” según “Radio Mobile”

4.4.2 Análisis de RF. El análisis presentado en la sección anterior (sección 4.4.1) indica que la interconexión inalámbrica entre las distintas sedes (Las Guacas, Silvia y Santander de Quilichao) con la Red de Datos de la Universidad del Cauca, maneja situaciones muy diversas para proporcionar dicha conectividad a cada extremo, debido a que cada caso posee características bastante diferenciadas; sin embargo, el hecho de alcanzar los resultados esperados revela el gran potencial de desempeño de la tecnología WiMAX. No obstante, la factibilidad técnica de este diseño debe complementarse con la inspección del nivel de interferencia probable en cada punto, para lo cual es ideal disponer de herramientas de medición adecuadas, y en caso contrario, es el criterio del ingeniero el que guiará esta actividad, como se da para este caso en particular.

Por lo tanto, basándose en la información proporcionada en el proyecto presente, puede señalarse que debido a haber elegido únicamente tecnología WiMAX para la solución requerida, muy posiblemente la integridad de los enlaces no se verá afectada. Esto se justifica primero, por el modelo de negocio en que se enmarca el diseño actual (Entorno Rural), en donde el medio no se encuentra saturado de otras soluciones inalámbricas que puedan catalogarse como fuentes de interferencia probables; y segundo, porque dicha tecnología hace uso de técnicas muy robustas para el tratamiento de la interferencia, como DFS, técnicas de reutilización de frecuencia, AAS y modulación adaptiva. En consecuencia, definitivamente se reúnen las condiciones que permiten establecer una operación adecuada en cada uno de los emplazamientos seleccionados, tal como se describe en la Tabla 4-8.

4.4.3. Presupuesto del enlace. Para determinar la confiabilidad de los enlaces de interconexión WiMAX, en esta sección se presentan los resultados de los cálculos relacionados con la obtención de la potencia de recepción de cada extremo del enlace, manejando parámetros como ganancia de antena, pérdidas internas del sistema, pérdidas inducidas en cables y conectores y pérdidas de espacio libre, junto con la información adicional que los fabricantes de equipos Pre-WiMAX y WiMAX disponibles en el mercado suministran sobre ellos y que tentativamente se utilizarán para la solución.

Tabla 4-8. Análisis de RF para los sitios de emplazamiento de los enlaces de interconexión WiMAX.

SITIO DE EMPLAZAMIENTO	CONDICIONES POSIBLES DE INTERFERENCIA	ACCIONES A TOMAR
Terraza Edificio de Ingenierías	<ul style="list-style-type: none"> - Se considera el punto más sensible porque se presta para el desarrollo de actividades académicas y de I+D relacionadas con pruebas e implantación de sistemas inalámbricos, de permanencia corta y/o prolongada - Manejo inadecuado de frecuencias y de polarización de antena (más de un sistema operando con la misma frecuencia y polarización) - Manejo inadecuado de niveles de potencia (por encima de valores permitidos) - Configuración indebida de equipos (asignación idéntica de canales) 	<ul style="list-style-type: none"> - Estudios de interferencia intersistema - Coordinación con los otros proyectos y sus actores - Cumplimiento de Normas y de la Regulación - Planeación de frecuencias - Verificación de condiciones de coexistencia
Sede Las Guacas	- Actualmente ninguna	- Cumplimiento de Normas y de la Regulación
Cerro El Tranal	- Existencia futura de otros sistemas inalámbricos (emisora comunitaria, Proyectos I+D)	<ul style="list-style-type: none"> - Cumplimiento de Normas y de la Regulación - Verificación de condiciones de coexistencia
Cerro Munchique	- Existencia de otros sistemas en operación (Celulares, AM, FM, TV), aunque trabajan con bandas de frecuencia diferentes y no representan riesgos importantes	<ul style="list-style-type: none"> - Cumplimiento de Normas y de la Regulación - Verificación de condiciones de coexistencia
Cerro La Chapa	- Existencia de otros sistemas en operación (Celulares), aunque trabajan con bandas de frecuencia diferentes y no representan riesgos importantes	<ul style="list-style-type: none"> - Cumplimiento de Normas y de la Regulación - Verificación de condiciones de coexistencia
Sede Santander de Quilichao	- Surgimiento incipiente de otros sistemas inalámbricos en zonas cercanas (a futuro podría observarse un crecimiento acelerado, impulsado por la actividad comercial del municipio)	<ul style="list-style-type: none"> - Cumplimiento de Normas y de la Regulación - Verificación de condiciones de coexistencia

Para el desarrollo de dichos cálculos, se recuerdan a continuación las expresiones que enmarcan esta fase; y posteriormente, se resumen los resultados de tales procedimientos para todos los casos de interconexión en la Tabla 4-9.

$$L_{fs} [dB] = 32,45 + 20 * \log f [MHz] + 20 * \log d [Km] \quad (4-13)$$

Donde:

L_{fs} : Pérdidas de espacio libre

f : Frecuencia de operación

d : Distancia entre puntos

$$P_{Rx} = P_{Tx} - L_{Tx} - L_{CTx} + G_{Tx} - L_{fs} + G_{Rx} - L_{Rx} - L_{CRx} \quad (4-14)$$

Donde:

- P_{Rx} : Nivel de señal en recepción, en dBm
- P_{Tx} : Potencia a la salida del transmisor, en dBm
- L_{Tx} : Pérdidas en la línea de transmisión, en dB
- L_{Rx} : Pérdidas en la línea de recepción, en dB
- L_{CTx} : Pérdidas por conectores en transmisión, en dB (L.Arrestor, Cable Adaptador)
- L_{CRx} : Pérdidas por conectores en recepción, en dB
- G_{Tx} : Ganancia de la antena en transmisión, en dBi
- G_{Rx} : Ganancia de la antena en recepción, en dBi

Y por último, el Margen de Operación del Sistema (SOM), es:

$$SOM = P_{Rx} - S_{Rx} \quad (4-15)$$

Donde:

- S_{Rx} : Sensibilidad del receptor, en dBm

Tabla 4-9. Resumen del presupuesto de los enlaces de interconexión WiMAX.

PARAMETROS	ENLACE / SALTO WiMAX				
	FIET-Las Guacas	FIET-Silvia	FIET – Santander de Quilichao		
			FIET-Cerro Munchique	Cerro Munchique-Cerro La Chapa	Cerro La Chapa-Santander de Quilichao
L_{fs} [dB]	123,12	138,68	139,98	143,69	129,78
f [MHz]	5.788	5.788	5.788	5.788	5.788
d [Km]	5,9	35,4	41,1	63	12,7
P_{Rx} [dBm]	-50,92	-66,48	-61,78	-65,49	-63,58
P_{Tx} [dBm]	23	23	23	23	23
L_{Tx} [dB] ⁽¹⁾	1	1	1	1	1
L_{Rx} [dB] ⁽¹⁾	1	1	1	1	1
L_{CTx} [dB] ⁽²⁾	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
L_{CRx} [dB] ⁽²⁾	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
G_{Tx} [dBi]	29	29	29	29	23
G_{Rx} [dBi]	23	23	29	29	23
SOM [dB]	18,08	20,52	18,22	21,51	5,42
S_{Rx} [dBm] ⁽³⁾	-69	-87	-80	-87	-69

- (1) Según el fabricante las pérdidas en la línea de transmisión son de 0,35 dB/m, sin embargo se han asumido valores máximos de 1dB, aunque las unidades de EB y/o ES se ubican exteriormente (junto a la antena).
- (2) De acuerdo con las especificaciones del fabricante cada conector introduce pérdidas de 0,2 dB.
- (3) Los valores de sensibilidad de los equipos suministrados por el fabricante se proveen para velocidades de transmisión de 12, 24 y 54 Mbps, observando que a mayor velocidad de transmisión se requieren sensibilidades más altas.

Estos resultados confirman que los valores manejados (de variables del entorno y especificaciones de equipos) reúnen condiciones que garantizan la viabilidad de todos los enlaces, lo cual se deduce de los valores de SOM obtenidos, que además de ser positivos, en la mayoría de los saltos se encuentran dentro del rango recomendado (10-20 dB); aunque solo en el caso del salto “Cerro La Chapa - Santander de Quilichao” el valor está por fuera de dicho rango, este resultado es comprensible porque se utilizaron las condiciones más modestas para el diseño (en ganancias, sensibilidades y alturas), poniendo en evidencia que se pueden alcanzar resultados mucho mejores, a partir de la modificación de estas, ya que no se ha exigido la capacidad máxima de los equipos. Por lo tanto, puede concluirse que el optar por tecnologías WiMAX ha sido una decisión acertada técnicamente.

4.5 SELECCION DE EQUIPOS

La elección de los equipos seleccionados (entre las alternativas dadas en la sección 4.1.4 de este Capítulo), tuvo en cuenta sus características, tales como: rango de cobertura y desempeño, facilidad de instalación, facilidad de gestión, integridad y confiabilidad, portabilidad, compatibilidad con otras redes (especialmente con la LAN de la Universidad del Cauca), consumo de potencia, interoperabilidad de los dispositivos inalámbricos, protección humana, costo, cumplimiento de estándares, diversidad de accesorios, capacidad de gestión y posible soporte técnico del proveedor. En la Tabla 4-10, se plasma un compendio de cada sede y su equipamiento definitivo.

Como no se dispone de información del MTBF de los equipos del fabricante elegido, se sugiere tener presente que el tiempo deseable de operación efectiva del sistema debe encontrarse por encima de 99.999% según la ITU-R. Por otro lado, para considerar el MTTR se recomienda seguir las políticas de gestión y mantenimiento de la red inalámbrica más acordes con los requerimientos y prioridades de cada sede a interconectar, sujetos a los procedimientos estipulados al interior de la Red de Datos.

Tabla 4-10. Resumen de los equipos seleccionados para la interconexión WiMAX

SEDE	ELEMENTO	CODIGO	PROVEEDOR
FIET	Cable de bajas pérdidas	LMR400	Proxim
	Conector Nmale Crimp	ANM-1406	Hyperlink
	EB AirNexusPro2	SB 3021	SmartBridges
	Antena Dish 29 dBi 5,8 GHz	HG 5829D	Hyperlink
Las Guacas	Cable de bajas pérdidas	LMR400	Proxim
	Conector Nmale Crimp	ANM-1406	Hyperlink
	ES AirNexusPro	SB 3011	SmartBridges
	Antena Dish 23 dBi 5,8 GHz	SB 3801-5523	SmartBridges
Cerro El Tranal	Cable de bajas pérdidas	LMR400	Proxim
	Conector Nmale Crimp	ANM-1406	Hyperlink
	ES AirNexusPro	SB 3011	SmartBridges
	Antena Dish 23 dBi 5,8 GHz	SB 3801-5523	SmartBridges
Cerro Munchique	Cable de bajas pérdidas	LMR400	Proxim
	Conector Nmale Crimp	ANM-1406	Hyperlink
	EB AirNexusPro2 (modo Bridge)	SB 3021	SmartBridges
	Antena Dish 29 dBi 5,8 GHz	HG 5829D	Hyperlink
Cerro La Chapa	Cable de bajas pérdidas	LMR400	Proxim
	Conector Nmale Crimp	ANM-1406	Hyperlink
	EB AirNexusPro2 (modo Bridge)	SB 3021	SmartBridges
	Antena Dish 29 dBi 5,8 GHz	HG 5829D	Hyperlink
	Antena Dish 23 dBi 5,8 GHz	SB 3801-5523	SmartBridges
Santander de Quilichao	Cable de bajas pérdidas	LMR400	Proxim
	Conector Nmale Crimp	ANM-1406	Hyperlink
	ES AirNexusPro	SB 3011	SmartBridges
	Antena Dish 23 dBi 5,8 GHz	SB 3801-5523	SmartBridges

4.5.1 Estimación de presupuesto operativo y de capital. El establecimiento del presupuesto final, en términos de inversión se detalla a continuación, en la Tabla 4-11.

Tabla 4-11. Resumen presupuesto operativo y de capital para la interconexión WiMAX Unicauca.

Item	Elemento	Código	Proveedor	Cant.	V/Unit (\$)	SubTotal (\$)
1	Cable de bajas pérdidas	LMR400	Proxim	9 m	143.871 C/15m	143.871
2	Conector Nmale Crimp	ANM-1406	Hyperlink	18 Unds	76.245 C/10Unds.	152.490
3	EB AirHaul2 NexusPro	SB 3021	SmartBridges	3 Unds	8'398.000	25'194.000
4	ES AirHaul NexusPro	SB 3011	SmartBridges	3 Unds	5'304.000	15'912.000
5	Antena Dish 29 dBi - 5,8 GHz	HG 5829D	Hyperlink	5 Unds	273.929,5	1'369.647,5
6	Antena Dish 23 dBi - 5,8 GHz	SB 3801-5523	SmartBridges	4 Unds	729.300	2'917.200
7	Arrendamiento de infraestructura (espacio en torres y suministro de potencia)			2 Unds	6'000.000 /Año	12'000.000
7	ADECUACIÓN E INSTALACION				3'000.00	3'000.00
TOTAL (No incluye IVA)						60'689.208,5

La estimación del ROI para este diseño en particular es compleja, porque puede tenerse una idea de la cantidad de inversión requerida, pero no pasa lo mismo con el concepto de recuperación de esta en un tiempo dado, puesto que no se trata de una aplicación comercial, sino que su propósito es dotar de un medio costo-efectivo para mejorar los procesos educativos y de I+D de la Universidad del Cauca, por lo cual no se obtiene lucro alguno. Más bien, desde el punto de vista financiero, el diseño propuesto podría beneficiar económicamente al Alma Mater, al reducir los costos de inversión, operación y mantenimiento que otras opciones tecnológicas exigirían (tales como Wi-Fi o soluciones cableadas) para proveer conectividad entre sedes distantes; así mismo, se disminuirían los gastos por viáticos derivados del traslado frecuente de docentes, investigadores y otros profesionales a las sedes distintas para el desarrollo de sus labores.

Lo que si es concluyente es que una implementación de este tipo, contribuiría ampliamente al mejoramiento de los procesos de comunicación y acceso a la información de estudiantes, docentes, investigadores y de la comunidad en general, redundando en dinamismo de las funciones administrativas, prestación de nuevos y mejores servicios, penetración de las TICs en las comunidades caucanas desfavorecidas, promoción y desarrollo del recurso humano de las diversas instituciones (Universitaria, de salud y de comercio), inclusión del país en las tendencias tecnológicas de redes inalámbricas de datos más recientes, fortalecimiento y expansión de la Red de Datos de la Universidad, entre muchas más contraprestaciones; de esta manera, el despliegue de la tecnología WiMAX para la interconexión de las sedes distantes sobre las que ejerce su campo de acción la Universidad, repercutiría en el desarrollo de las comunidades en los sectores urbano y rural. Por todo lo expresado es que el ROI adquiere importancia, en el sentido que la inversión planteada redundará en la generación de valor agregado en las esferas mencionadas, superando por mucho cualquier otro tipo de beneficio financiero.

4.6 VISUALIZACION DEL ALCANCE Y EFECTIVIDAD SOCIAL DE LA SOLUCION DE INTERCONEXION INALAMBRICA

La solución presentada para interconectar las sedes de la Universidad del Cauca con su Red de Datos mediante la utilización de soluciones WMAN, particularmente con tecnologías WiMAX, pone en descubierto un camino efectivo para reunir comunidades distantes, tanto en los ámbitos de formación como de la investigación, otorgando beneficios como los siguientes:

- § Provee un medio de comunicación permanente, con velocidades altas y con prestaciones amplias, que permitirá estrechar los vínculos tanto a nivel académico como social, rompiendo las barreras impuestas por el factor distancia para el intercambio de información.
- § Favorece el soporte de procesos de comunicación efectivos al interior y al exterior del entorno universitario, que mejorarán la calidad en la formación académica y la calidad de vida de las comunidades con las que la universidad interactúa.
- § Proporciona un medio único por el que se pueden soportar los distintos servicios que demandan cada una de las sedes a interconectar, destacando entre ellos el servicio de Acceso a Internet de Alta velocidad, mediante el cual es posible adquirir, ampliar y difundir mucha más información que conlleve a la generación de una base de conocimiento verdadera; adicionalmente, sobre este mismo medio se pueden adecuar muchos más servicios para muchos más usuarios, conforme pase el tiempo y surjan necesidades nuevas.
- § Mejora la productividad de las personas, bien sea en el desarrollo de procesos académicos, como en el ejercicio profesional, impactando en el desarrollo social, comercial y de salud del sector o región que las rodea.

§ Brinda una opción atractiva para los proyectos de investigación que se desarrollan en el Alma Mater para potenciar su campo de acción, replicando sus experiencias con base en capacidades y posibilidades nuevas, que eliminan los desafíos grandes hasta ahora impuestos por la utilización de tecnologías Wi-Fi.

§ Pone la pauta para fomentar proyectos futuros en busca de conectividad, innovación y desarrollo social, contribuyendo a la creación de una verdadera Sociedad de la Información.

CONCLUSIONES

- § El conjunto de criterios generados para la planeación y diseño de interconexión inalámbrica entre sitios distantes, con las normas IEEE 802.11 y 802.16, se convierte en un aporte valioso para orientar soluciones efectivas que conlleven a satisfacer las necesidades de conectividad entre entornos apartados, porque además de fundamentarse en un análisis previo y completo de las normas implicadas, señala una metodología organizada que ofrece pautas claras y concretas sobre la conveniencia de recurrir a una u otra, como base de un proceso consistente para posteriores implementaciones y despliegues con las tecnologías de interés; prueba de ello es su validación exitosa en el entorno universitario.

- § El diseño de interconexión inalámbrica propuesto para la Universidad del Cauca (entre la Red de Datos y varias sedes universitarias ubicadas en rangos de distancias variados y con características bien diferenciadas), siguiendo los criterios entregados en este proyecto, permitió validar la efectividad de estos, mostrándose como un ejemplo apto en donde la utilización adecuada de tecnologías WMAN favorecería el fortalecimiento de procesos de formación e investigación, trascendiendo al interior y al exterior de la Universidad con un impacto social fuerte, que mejore la calidad de vida de las comunidades con quienes se actúa; y adicionalmente revela que el desempeño y flexibilidad de la solución propuesta pueden ser replicables y extensibles a otros entornos y aplicaciones.

- § Las innovaciones en tecnologías inalámbricas, principalmente las de *broadband*, se convierten en un factor primordial para el desarrollo de la sociedad, puesto que su utilización confiere beneficios innumerables que satisfacen sus necesidades nuevas y cada vez más exigentes, más aún cuando los escenarios a comunicar se encuentran distantes y las soluciones cableadas tradicionales no son factibles, ni oportunas.

- § La generación de estándares nuevos por parte de los organismos de telecomunicaciones, como los creados por el IEEE, en especial 802.11 y 802.16, ofrece un impacto fuerte sobre la demanda actual de soluciones inalámbricas con capacidades altas (en ancho de banda, rendimiento y cobertura, entre otras), por cuanto la adopción de estos en las tecnologías de comunicación garantiza soluciones coexistentes y ubicuas, acordes con la evolución del mercado y con la transformación continua de los requerimientos de cada entorno, mejorando la efectividad de los beneficios alcanzados tanto a nivel técnico, como industrial, político y social.
- § La tecnología WiMAX (IEEE 802.16), como ponente principal entre las opciones de BWA, se presagia a corto y mediano plazo, e inclusive a largo plazo, como el camino más efectivo y atractivo para alcanzar una penetración amplia en los diversos mercados, debido a que sus cualidades le otorgan gran flexibilidad para atender una variedad de entornos entre los ya explorados por las tecnologías tradicionales y los que aún no se han atendido, traduciéndose en una oportunidad de negocio con expectativas ampliamente alcanzables.
- § Aunque la complejidad en las especificaciones de las capas MAC y PHY del estándar IEEE 802.16 ha retardado un poco el lanzamiento de equipos certificados WiMAX, conforme se vaya alcanzando madurez en los procesos de estandarización y certificación, se irán justificando su robustez y confiabilidad en ofertas WMAN de desempeño y cobertura altos. Por un lado, la capa MAC proveerá capacidades de QoS, multiplicidad de conexiones simultáneas y flexibilidad para la adaptación a capas PHY diferenciadas; por otro, la capa PHY, valiéndose de algoritmos sofisticados y técnicas de modulación y multiplexación avanzadas, sorteará adecuadamente la modificación dinámica de las condiciones presentadas por el rango extenso de frecuencias que manejará (2 GHz a 66 GHz) y por la posibilidad de operación en condiciones LOS y NLOS; adicionalmente, la implementación de técnicas de AAS,

incluirá ventajas que pese a encarecer la solución, maximizarán su desempeño en áreas de aplicación diversas, dando mérito a dicha inversión.

- § La tecnología Wi-Fi (802.11 a, b y g) se ha consolidado y adaptado excelentemente en entornos WLAN; sin embargo, pese a sus capacidades, demostró no ser propicia para ambientes WMAN, y más bien es factible considerarla como infraestructura complementaria para enlazar usuarios individuales en el último kilómetro. No obstante, debe reconocerse que su éxito y madurez actuales (particularmente en la creación de *Hot Spots*), fueron aspectos motivadores para el surgimiento de WiMAX.

- § Debido a que las redes inalámbricas utilizan el aire como medio de transmisión, la seguridad de la información siempre será uno de los aspectos más críticos a tratar porque la naturaleza de dicho medio lo hace vulnerable; en este sentido, el desarrollo del presente proyecto permitió notar que el estándar 802.16 por estar orientado especialmente a servicios de gran capacidad y a aplicaciones de *carriers*, se apoyará de niveles de seguridad superiores a los del 802.11 (cuya revisión más reciente es 802.11i, con la cual intentará mejorar sus falencias iniciales); sin embargo, se espera que para disfrutar de esta cualidad, el trabajo que aún queda por culminar por parte del Grupo IEEE, replanteando algunos de sus desaciertos originales al respecto (como procedimientos de autenticación y manejo de claves), dote al estándar de técnicas más sólidas que otorguen fiabilidad a los canales WMAN (tanto en entornos fijos, como portables y móviles). Este será un aspecto crucial para el éxito verdadero de la incursión de la tecnología WiMAX en el mercado.

- § Ofrecer servicios de *broadband* fiables en aplicaciones de interconexión inalámbrica entre sitios distantes no solo significa ajustar adecuadamente las herramientas, los protocolos, las bandas de operación y el ancho de banda, sino que es necesaria una orientación correcta basada en el cliente y una apreciación atenta del entorno en que se trabaja, llevando a pensar que la noción de acceso, ligada al concepto de servicio y a la capacidad de ajustarse rápidamente a los cambios en las necesidades de los

usuarios, es una visión objetiva que puede asegurar en gran porcentaje el éxito de cualquier solución inalámbrica.

- § Los procesos regulatorios cobran gran importancia en la medida en que, a la postre, son los que determinan el momento de incursión o no de las tecnologías en el mercado. Esto se aprecia claramente en el marco internacional, donde los esfuerzos de instituciones de dicha envergadura (como IEEE, ETSI, ITU y WiMAX, entre otras) impulsan el surgimiento y la adopción de tecnologías cada vez más óptimas, cuya utilización masificada ayuda a disminuir la brecha tecnológica existente entre naciones desarrolladas y en vía de desarrollo, mejorando en consecuencia, las oportunidades de difusión, apropiación y generación de conocimiento.

- § En el ámbito nacional, es evidente que la tecnología ha logrado superar a la regulación, puesto que las normas vigentes se quedan cortas frente a la diversidad de opciones tecnológicas actuales y a sus especificaciones; por ello, la clave para que Colombia esté a la vanguardia en el desarrollo tecnológico y de telecomunicaciones internacional está en adelantar un proceso progresivo que vaya ajustando la tecnología al entorno local y la obtención de una visión acertada de negocios por parte de los proveedores de servicio y de las instituciones gubernamentales encargadas de la regulación a nivel nacional, que asegure soluciones convergentes, con características no disponibles en el pasado (como capacidad alta, cobertura de áreas amplias y operación en gran parte del espectro licenciado y no licenciado, entre otras), exigiendo además la unión de esfuerzos entre los organismos involucrados, de manera que este proceso traduzca sus resultados en beneficios sociales trascendentales, máxime, teniendo en cuenta que en el país el acceso a las TICs es uno de los objetivos estratégicos más recientes e importantes entre las políticas del gobierno y por lo tanto se puede presumir de un espacio asegurado para la penetración de tecnologías inalámbricas.

RECOMENDACIONES

- § Insistir en la búsqueda de herramientas de simulación de enlaces NLOS, para analizar y comprender de manera más didáctica el desempeño de estos, o si es posible, generarlas, de modo que dicho recurso pueda complementar los resultados obtenidos en el presente proyecto, pues durante el desarrollo de este no estuvieron disponibles, debiéndose recurrir a una herramienta (“Radio Mobile”) pensada solamente para satisfacer LOS.

- § Continuar el estudio de la norma IEEE 802.16, pues por tratarse de un estándar emergente su proceso de desarrollo está a la expectativa de aprobar especificaciones futuras (como 802.16e, que adicionará opciones para acceso móvil) que incluirán mejoras al estándar actual, lo cual permitirá disponer de capacidades aún más robustas que podrían generar ideas nuevas para trabajos de grado futuros, e incluso ampliar el alcance del presente proyecto.

- § Fomentar e impulsar la creación de un Grupo de Investigación en Tecnologías Inalámbricas mediante el cual se creen ambientes propicios para un trabajo mancomunado entre los diferentes proyectos del área inalámbrica en la Universidad del Cauca, para que la unión de esfuerzos permita maximizar el potencial investigativo y refleje resultados de mayor impacto académico y social, considerando que el surgimiento vertiginoso de tecnologías de esta naturaleza ofrece opciones de innovación amplias en el sector de telecomunicaciones. Este marco de trabajo facilitaría la orientación y canalización de recursos (humanos, técnicos y financieros) para la viabilidad práctica de los proyectos, creando y/o estrechando los vínculos con organismos y empresas nacionales e internacionales, como aval para la participación de la Universidad en espacios nuevos a nivel regional y nacional.

BIBLIOGRAFÍA

BRAVO, Hernán y VERA, Martha. Análisis y Diseño de una Red Inalámbrica bajo las Normas IEEE 802.11(x) para el Campus de Ingenierías Sector Tulcán. Popayán: Universidad del Cauca, 2.004. 157 p.

COOKLEV, Todor. Wireless Communication Standards. A Study of IEEE 802.11,802.15 y 802.16. New York: IEEE Press, 2.004. 360 p.

EKLUND, Carl. IEEE 802.16: A technical overview of the WirelessMAN Air Interface for Wireless Broadband Access. IEEE Communications Magazine, 2.002 12 p.

GRUPO I+D NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES. Telecomunicaciones & Sociedad. Vol 2. Popayán. Universidad del Cauca. 2004. 72 p.

HAYKIN, Simon y SELLATHURAI, Mathini. Turbo-MIMO for Wireless Communications. IEEE Communications Magazine. Vol 42, Num. 10. 2.004. p. 48-53.

KOFFMAN, Israel. Broadband Wireless Access Solutions based on OFDM access in IEEE 802.16. IEEE Communications Magazine, 2.002. 8 p.

ROSAS TAPIA, Daniel. Estrategia y Planeación de Diseño de Redes Móviles. 2.004. 34 p. En Foro OLA Inteligente, Santiago de Cali, Universidad ICESI. 2.004.

UNGER, Jack. Deploying License-Free Wireless Wide-Area Networks. Best practices for planning and deployment of broadband WMANs. Indianapolis: CISCO Press, 2.003. 328 p.

ALCATEL. WiMAX making ubiquitous high-speed data services a reality. 2.004. 10 p.
Disponible en: <http://www.alcatel.com>

FORO WiMAX. IEEE 802.16a y WiMAX. Igniting Broadband Wireless Access. 2.003. 7p.
Disponible en: <http://www.wimaxforum.org/news/downloads/>

FORO WiMAX. WiMAX's Technologies for LOS and NLOS environments. 2.004. 10p.
Disponible en: <http://www.wimaxforum.org/news/downloads/>

IDA e INTEL Corp. Public WLAN Interworking Study. 2.004. 65 p. Disponible en:
<http://www.ida.gov.sg/idaweb/techdev/infopage.jsp?infopagecategory=articles:techdev&versionid=3&infopageid=l3055>

IEEE-SA STANDARDS BOARD. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks
Part16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. 2.002. 322 p.
Disponible en: <http://www.wirelessman.org>

INTEL TECHNOLOGY JOURNAL. WiMAX. Vol 8, 3 ed. 2.004. 96 p. Disponible en:
<http://developer.intel.com>

JHONSTON, David. Overview of IEEE 802.16 Security. IEEE Security and Privacy: IEEE
Computer Society. 2.004. 9 p. Disponible en <http://www.computer.org/security>

LALANNE, Christian. IEEE Std 802.16. 2.003 97p. Disponible en:
<http://www.wirelessman.org>

MINISTERIO DE COMUNICACIONES DE COLOMBIA. Promoción y Masificación de los Servicios de Banda Ancha en Colombia. 2.004. 75 p. Disponible en: <http://www.crt.gov.co/#fin1>

OULLET, Eric. Building a CISCO Wireless LAN. Syngress Publishing. 2.002. 530 p. Disponible en: <http://www.syngress.com/catalog/?pid=1690>

RENDON, Alvaro. Diseño e implementación de la red de comunicaciones EHAS. GIT: Universidad del Cauca. 2.003. 126 p. Disponible en: <http://git.ucauca.edu.co/ehas/>

TELEPHONY'S. Complete guide to WiMAX. The business Case for Service Provider Deployment. 2.004. 10 p. Disponible en: www.wimaxforum.org/news/press_releases/Telephony_WiMAX.pdf

TELE-SEMANA. Especial WiMAX 802.16. Proceso de Estandarización. 2.004. 7p. Disponible en: <http://www.tele-semana.com/archivo/Download.php?c=0148611026022-478>

WiLAN WHITE PAPER. Pre-WiMAX Wireless Broadband Solutions for Service Providers. 2.004. 13 p. Disponible en: <http://www.wilan.com/whitepaper/libramx.htm>

<http://www.intel.com>

<http://www.wimaxforum.org>

<http://www.wimaxxed.com>

<http://www.wimax-industry.com>

<http://www.wirelessman.org>

<http://gntt.unicauca.edu.co>

<http://git.ucauca.edu.co/ehas/>

<http://ReTAS.unicauca.edu.co>

<http://www.itu.int>

<http://www.techonline.com>

<http://www.wi-fiplanet.com>

<http://www.crt.gov.co>

<http://www.cintel.org.co>

<http://www.eveliux.com>

<http://www.mincomunicaciones.gov.co>

<http://standards.ieee.org>

<http://www.swisswireless.org>

<http://www.ieee.org>

<http://www.cisco.com>

<http://www.nwfusion.com>

<http://www.comsoc.org>

<http://www.smartbridges.com>

<http://www.apertonetworks.com>

<http://www.atheros.com>

<http://www.dlink.com>

<http://www.hyperlinktech.com>

<http://www.alvarion.com>

<http://www.80216news.com>

<http://www.bbwxchange.com>

http://www.iitk.ac.in/mladgp/Thesis_Presentation_Draft.pdf

<http://www.terabeam.com>

<http://www.geoengine.nima.mil>

http://www.mincomunicaciones.gov.co/mincom/src/user_docs/Archivos/normatividad/2004/Resolucion/R00689d2004.pdf

<http://www.teleagro.unicauca.edu.co>