



W-SPACES TV

Tecnología de canal de retorno para el estándar DVB-T mediante el uso de WRAN

JUAN VICENTE PRADILLA CERÓN

Universidad Icesi
Facultad de Ingeniería
Departamento de Tecnologías de Información y Comunicaciones
Santiago de Cali
2012

W-SPACES TV

Tecnología de canal de retorno para el estándar DVB-T mediante el uso de WRAN

JUAN VICENTE PRADILLA CERÓN

Trabajo de grado para optar por el título de
Magister en Gestión de Informática y Telecomunicaciones

Director de trabajo de grado
ANDRÉS NAVARRO CADAVID Ph.D.

Universidad Icesi
Facultad de Ingeniería
Departamento de Tecnologías de Información y Comunicaciones
Santiago de Cali
2012

DEDICATORIA

A los que han coincidido en este tiempo y lugar para hacer de él una extensión del amor de Dios. Mi esposa amorosa y consejera. Mis padres sabios y dispuestos. Mi familia incondicional y afectuosa.

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Santiago de Cali, Junio de 2012

AGRADECIMIENTOS

A todos aquellos que con su sabiduría han instruido mi amor por el conocimiento y han aportado al crecimiento de las virtudes que Dios ha depositado en mi vida. En especial a Andrés Navarro Cadavid Ph.D. que con su consejo e instrucción ha guiado y apoyado mi desarrollo profesional y la realización de este trabajo.

Índice

Dedicatoria	i
Aceptación	ii
Agradecimientos	iii
Índice	iv
Índice de tablas	vii
Índice de figuras	viii
CAPÍTULO I – Introducción	1
1.1 Prologo	1
1.2 Objetivo	1
1.2.1 Objetivo General	1
1.2.2 Objetivos Específicos	1
1.3 Justificación	1
1.4 Hipótesis	5
1.5 Metodología	5
1.6 Narrativa por capítulos	5
CAPÍTULO II – Estado del arte	7
2.1 Marco contextual	7
2.2 Marco teórico	8
2.2.1 DVB-TDigital Video Broadcasting – Terrestrial	9
2.2.2 El canal de retorno	11
2.2.3 PLC - Power Line Communications	13
2.2.4 xDSL - Digital Subscriber Line	15
2.2.5 Cable modem	17
2.2.6 FTTx - Fibra óptica	19
2.2.7 Satélite	21
2.2.8 UMTS - Universal Mobile Telecommunications System	23
2.2.9 WiMAX - Worldwide Interoperability for Microwave Access	25
2.2.10 WRAN - Wireless Regional Area Networks	27
2.2.11 El uso de las tecnologías de acceso como canal de retorno	28
2.2.12 El estándar IEEE 802.22	36
2.3 Aportes al estado del arte	40
CAPÍTULO III – Herramientas	41
3.1 Características deseables	41

3.2 Alternativas y escogencia	42
3.2.1 OMNET++	42
3.2.2 NS-2	44
3.2.3 GloMoSim	46
3.2.4 OPNET	46
3.2.5 NCTuns	48
3.2.6 Radio mobile	49
3.3 Comparativa según características deseables	50
CAPÍTULO IV – El canal de comunicación	52
4.1 Modelos de propagación	52
4.1.1 Clasificación de los modelos de propagación	52
4.1.2 Modelo de propagación en espacio libre (Modelo de Friis)	54
4.1.3 Modelo de propagación de dos rayos (reflexión terrestre)	54
4.1.4 Modelo de propagación Okumura	55
4.1.5 Modelo de propagación Okumura-Hata	57
4.1.6 Modelo de propagación Cost 231	58
4.1.7 Modelo de propagación Walfisch-Bertoni	58
4.1.8 Modelo de propagación Walfisch-Ikegami	59
4.1.9 Modelo de propagación Longley-Rice	62
CAPÍTULO V – Escenarios de simulación	63
5.1 Diseño de la red	63
5.1.1 Zona de estudio	63
5.1.2 Zonas de cobertura	67
5.1.3 Ubicación de estaciones base	68
5.1.4 Antenas sectoriales	69
5.1.5 Bandas de frecuencia	69
5.1.6 Ubicación de estaciones subscriptoras	69
5.1.7 Usuarios de red	70
5.1.8 Tráfico de red	70
5.2 Procedimiento de simulación	71
5.3 Simulación de cobertura	72
5.3.1 Cartografía digital	72
5.3.2 Modelo de propagación	72
5.3.3 Configuración de la simulación	73

5.4 Simulación de la red	74
5.4.1 Movilidad	74
5.4.2 Distribución de usuarios y área de interés	74
5.4.3 Módulos desarrollados en Omnet++	76
5.4.4 Configuración de la simulación	78
5.5 Mediciones	79
CAPÍTULO VI – Resultados de las simulaciones	81
6.1 Resultados de cobertura de los 10 municipios en Radio Mobile	81
6.1.1 Consideraciones generales	82
6.1.2 Ocaña	83
6.1.3 Sabanalarga	84
6.1.4 Tierralta	85
6.1.5 Manaure	86
6.1.6 Aguachica	87
6.1.7 Santander de Quilichao	88
6.1.8 Cereté	89
6.1.9 Sahagún	90
6.1.10 Arauca	91
6.1.11 Villa del Rosario	92
6.1.12 Resultados consolidados	93
6.2 Resultados de throughput en los 3 escenarios en Omnet++	94
6.2.1 Eventos	94
6.2.2 Recursos	95
6.2.3 Video	95
6.2.4 Consolidado	96
CAPÍTULO VII – Conclusiones y futuros desarrollos	98
7.1 Desarrollos futuros	99
Bibliografía	100

Índice de tablas

Tabla 1 - Indicadores de medición de la brecha digital.	3
Tabla 2- Características técnicas de DVB-T	9
Tabla 3 - Tecnologías xDSL	17
Tabla 4 - Bandas de frecuencias en comunicación satelital	22
Tabla 5 - Tasa de binaria según distancia para tecnología UMTS	24
Tabla 6 - Características técnicas de IEEE 802.22	40
Tabla 7 - Características de configuración de las herramientas	50
Tabla 8 - Características de preferencia de las herramientas	50
Tabla 9 - Municipios seleccionados para la simulación	67
Tabla 10 - Localización de las estaciones base	69
Tabla 11 - Parámetros de configuración Radio Mobile	73
Tabla 12 - Distancia transmisor/municipio	75
Tabla 13 - Parámetros de configuración Omnet++	78
Tabla 14 - Configuración de los escenarios en Omnet++	79
Tabla 15 - Datos de cobertura Ocaña	83
Tabla 16 - Datos de cobertura Sabanalarga	84
Tabla 17 - Datos de cobertura Tierralta	85
Tabla 18 - Datos de cobertura Manaure	86
Tabla 19 - Datos de cobertura Aguachica	87
Tabla 20 - Datos de cobertura Santander de Quilichao	88
Tabla 21 - Datos de cobertura Cereté	89
Tabla 22 - Datos de cobertura Sahagún	90
Tabla 23 - Datos de cobertura Arauca	91
Tabla 24 - Datos de cobertura Villa del Rosario	92
Tabla 25- Resultados de la simulación de cobertura consolidados	93

Índice de figuras

Figura 1 - Mercado de receptores de TVDigital en el mundo por tecnología	10
Figura 2 - Mercado de receptores por plataforma DVB	10
Figura 3 - Adopción de estándares de televisión digital terrestre	11
Figura 4 - Arquitectura del canal de retorno	12
Figura 5 - Arquitectura de un sistema de televisión con canal de retorno	12
Figura 6 - Arquitectura de la red de potencia eléctrica	14
Figura 7- ADSL división de frecuencias	15
Figura 8 - Esquema arquitectura ADSL	16
Figura 9 - Arquitectura de una red de cable modem	18
Figura 10 – Clasificación de las tecnologías de fibra óptica	19
Figura 11 - Arquitectura de red FTTH	20
Figura 12 - Arquitectura básica de un sistema satelital	22
Figura 13 - Arquitectura básica de UMTS	24
Figura 14 - Arquitectura de una red WiMAX	26
Figura 15 - Penetración por tecnología de acceso	29
Figura 16 - Visión general del proyecto SAMBA	30
Figura 17 - Arquitectura del proyecto SAMBA	31
Figura 18 - Visión general del proyecto CARIMBÓ	32
Figura 19 - Arquitectura del proyecto SATMODE	33
Figura 20 - Arquitectura del proyecto DIGISAT	34
Figura 21 - Arquitectura del proyecto PORTIVITY	35
Figura 22 - Familia de estándares IEEE 802	37
Figura 23- - Arquitectura de referencia de la estación base IEEE 802.22	38
Figura 24 - Arquitectura de referencia del equipo de usuario IEEE 802.22	39
Figura 25 - Entorno Integrado de Desarrollo OMNET++	44
Figura 26 - Visualizador grafico de archivos NAM en NS-2	45
Figura 27 - Entorno Integrado de Desarrollo OPNET	47
Figura 28 - Entorno Integrado de Desarrollo NCTuns	48
Figura 29 - Entorno de Radio Mobile	49
Figura 30 - Clasificación de los modelos de propagación	53
Figura 31 - Esquema de modelo de dos rayos	55
Figura 32 - Curvas del modelo Okumura	56
Figura 33 - Esquema del modelo Walfisch-Bertoni	59
Figura 34- Esquema del modelo Walfisch-Ikegami	60
Figura 35 – Ubicación de Colombia en el mundo	63
Figura 36 - Mapa de relieve de Colombia	64
Figura 37 – Distribución política de Colombia	65
Figura 38 - Distribución poblacional de Colombia	66
Figura 39 - Ubicación de los municipios escogidos	68
Figura 40 - Diagrama de radiación de antena	73
Figura 41 - Área de interés	75
Figura 42 - Red de simulación	76

Figura 43 - Estructura del servidor	77
Figura 44 - Estructura del cliente	77
Figura 45 - Estructura de la estación base	78
Figura 46- Escala de colores para los mapas de cobertura	82
Figura 47 - Cobertura Ocaña cenital	83
Figura 48 - Cobertura Ocañaoblicua	83
Figura 49 - Cobertura Sabanalarga cenital	84
Figura 50 - Cobertura Sabanalarga oblicua	84
Figura 51 - Cobertura Tierralta cenital	85
Figura 52 - Cobertura Tierralta oblicua	85
Figura 53 - Cobertura Manaure cenital	86
Figura 54 - Cobertura Manaure oblicua	86
Figura 55 - Cobertura Aguachica cenital	87
Figura 56 - Cobertura Aguachica oblicua	87
Figura 57 - Cobertura Santander de Quilichao cenital	88
Figura 58 - Cobertura Santander de Quilichao oblicua	88
Figura 59 - Cobertura Cereté cenital	89
Figura 60 - Cobertura Cereté oblicua	89
Figura 61 - Cobertura Sahagún cenital	90
Figura 62 - Cobertura Sahagún oblicua	90
Figura 63 - Cobertura Arauca cenital	91
Figura 64 - Cobertura Arauca oblicua	91
Figura 65 - Cobertura Villa del Rosario cenital	92
Figura 66 - Cobertura Villa del Rosario oblicua	92
Figura 67 - Resultados de la simulación de cobertura consolidados	93
Figura 68 - Throughput en la simulación de eventos	94
Figura 69 - Throughput en la simulación de recursos	95
Figura 70 - Throughput en la simulación de video	96
Figura 71 - Throughput en las simulaciones consolidado	97

CAPÍTULO I – Introducción

1.1 Prologo

Con miras a disminuir la brecha digital en Colombia, se están revisando propuestas tecnológicas que posibiliten el acceso a la información y al conocimiento. Una de esas propuestas es la televisión digital y en especial, en la posibilidad de brindar interactividad apoyada sobre un canal de comunicación bidireccional entre emisor y receptor, conocido como canal de retorno.

El canal de retorno no se encuentra estandarizado y por ende, la tecnología que se implemente dependerá del entorno objetivo del servicio. En la presente trabajo de grado se plantea, para el canal de retorno, el uso de la tecnología Wireless Regional Area Network - WRAN (IEEE 802.22), la cual es una tecnología novedosa que aprovecha los espacios en blanco (White Spaces) del espectro radioeléctrico los cuales están íntimamente ligados con el despliegue de la televisión digital.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo General

Proponer una tecnología de canal de retorno para el estándar DVB-T mediante el uso de WRAN (802.22).

1.2.2 Objetivos Específicos

Realizar un documento de estado del arte para el canal de retorno en DVB-T siguiendo el formato de Colciencias

Implementar una simulación para el canal de retorno en DVB-T bajo la tecnología WRAN

1.3 Justificación

En la actualidad, los conceptos de “era de la información” y “sociedad del conocimiento” evidencian la tendencia de la sociedad actual a re-valorar el conocimiento como parte primordial de las actuaciones y los desarrollos sociales, económicos, políticos y culturales. La información y la transformación de esta en conocimiento, es una labor humana de gran importancia, la cual se evidencia al evaluar su influencia en las personas que la usan (o dejan de usar) y en la organización social que se conforma entorno a ellas.

Es en esta labor humana, que los mecanismos de acceso a la información y al conocimiento, generado por otras personas, toman un lugar prioritario en los temas a tratar a nivel mundial. En especial, la existencia equitativa de estos mecanismos y la reducción de las diferencias en el acceso a la información y al conocimiento, tanto como, su calidad y la idoneidad de las personas para su asimilación. Teniendo en cuenta que estas diferencias pueden repercutir o estar influenciadas por las desigualdades sociales, económicas, políticas, raciales o culturales.

Así, con la premisa que una pobre posibilidad en el acceso a la información, una mala calidad de la misma o una imposibilidad en su buen uso, repercute directamente en la asimilación, uso y creación de conocimiento. Y por ende, en el desarrollo tecnológico, económico, social, político y cultural de una localidad, en su competitividad y en su sostenibilidad a largo plazo. Se esgrime la necesidad de procurar una igualdad o, en muchas ocasiones, una discriminación positiva que beneficie a los sectores o localidades que se encuentran marginados.

Teniendo en cuenta esto, la sociedad actual se encuentra potenciando mecanismos de gran auge a finales de siglo pasado y de relevancia principal en los principios del presente, conocidas como las “tecnologías de la información y la comunican - TIC”. En términos de las TIC la desigualdad es conocida como “brecha digital” y la propuesta de reducirla es fundamental en diversos planes de gobiernos a nivel mundial.

Existen diversas concepciones del significado de brecha digital, en el presente trabajo será entendida como la sumatoria de tres dimensiones particulares(Hacker & Van Dijk, 2003): "Primero, las limitaciones en el acceso material a las tecnologías (computadores, internet, redes), así como la calidad de ese acceso, están determinadas por características demográficas. Segundo, la brecha por diferencias subjetivas se refiere a la desigual capacidad individual para usar las tecnologías que resultan de las imágenes de sí y del entorno, así como de las orientaciones para la acción que se derivan de la cultura a la que se pertenece. Tercero, el acceso y circulación por las redes y el tipo de papeles y privilegios que cada usuario puede adquirir en ellas tienden a estar fuertemente influidos por la posición que éste ocupa en las jerarquías sociales, lo cual las constituye en un criterio de segmentación también al interior de la red." (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo – PNUD, 2009)

Basándose en la anterior definición, existen diversos mecanismos de medición de la brecha digital a nivel mundial, el listado de los mismos se puede consultar en la Tabla 1¹. Algunos de los indicadores son directos y otros se encuentran estrechamente relacionados con el concepto de brecha digital.

¹Fuente: (Carlos, Gustavo, Fernando, & Mónica, 2002)

METODOLOGÍA	INSTITUCIÓN
El índice de acceso digital (IAD)	Unión Internacional de telecomunicaciones (ITU)
Índice de Sociedad de la Información (ISI)	International Data Consulting (IDC) y World Times
Índice de Adelanto Tecnológico (IDD)	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)
Monitoreo de la Brecha Digital, índice de brecha digital entre países (IDD)	SCUADAS, Orbicom (UNESCO) y Canadian International Development Agency (CIDA)
Readinnes Guide	Computer Systems Policy Project
Preparación para el Mundo Interconectado – Una guía para los países en desarrollo	Center for International Development de la Universidad de Harvard
E-commerce Readiness Methodology	Cooperación Económica Asia Pacífico (APEC)
Knowledge Assessment Methodology	Programa Conocimiento para el Desarrollo del Instituto del Banco Mundial
INEXSK	Masell y Wehn del SPRU - Universidad de Sussex
Indicadores de seguimiento	Programa eEurope. An Information Society For All del Consejo de la Unión Europea
Recomendaciones metodológicas y acuerdos sobre conceptos clave	Working Party on Indicators for the Information Society de la OCDE
Homologación de cuestionarios	Comisión de estadística de Naciones Unidas y Grupo Voorburg
Propuesta de indicadores	Asociación Española de Empresas de Tecnologías de la Información (SEDISI)
Propuesta de indicadores y metodologías de recolección de datos	Conferencia de Autoridades Iberoamericanas de Informática (CAIBI)
Definiciones y propuestas de instrumentos de recolección de datos	Oficina de Censos de Estados Unidos
Homologación de metodologías y publicaciones en conjunto de los países nórdicos	Grupo Nórdico de Desarrollo de Estadísticas sobre la Sociedad de la Información
Propuesta de marco teórico y variables a relevar	Oficina Australiana de Estadísticas
Manual de Indicadores de Telecomunicaciones	Unión Internacional de Telecomunicaciones

Tabla 1 - Indicadores de medición de la brecha digital.

Uno de los indicadores más ampliamente difundido y aceptado es el Índice de Sociedad de la Información (ISI), el cual considera 21 variables de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones TIC y de Entorno Macroeconómico. Para Colombia fue medido en 2011 en 4,54%, lo cual representa un aumento del 4,9% con respecto a la medida anterior, siendo este el valor más alto en la historia del país y el de mayor crecimiento en Latinoamérica. Hay que tener en cuenta que el mayor valor del índice lo ostenta EE.UU con un 8.17%. (IESE Business School, 2012)

Aunque el indicador ha mejorado ostensiblemente para Colombia, desde el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones se busca seguir avanzando mediante nuevas iniciativas. Ejemplo de estas iniciativas son: la Red Nacional de Fibra Óptica que permitirá conectar 700 municipios a Internet en 2014 dentro del Plan Vive Digital (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones , 2011) y la eliminación del IVA del 16% al servicio de Internet en los estratos 1 y 2, propuesta contemplada dentro del Plan Nacional de Desarrollo.

Por otra parte, una de las principales preocupaciones a nivel nacional dentro del marco de la brecha digital, se encuentra focalizado en las regiones alejadas de las cabeceras municipales, debido a la poca disponibilidad de tecnologías de acceso a la información, que posibiliten la inclusión social y el aumento de la competitividad de estas regiones.

Si se observa detenidamente, en las regiones alejadas de las cabeceras municipales en Colombia, se encuentran las poblaciones con un mayor índice de pobreza, una mayor propensión a ser víctimas de la violación de los derechos humanos y una menor equidad social (Sistema de Naciones Unidas en Colombia y Departamento Nacional de Planeación, 2006). Por otra parte, estas regiones tienen un importante impacto en la conservación de recursos naturales y la explotación agrícola sostenible.

Así, las regiones alejadas de las cabeceras municipales son fundamentales para el desarrollo del país en equidad y sostenibilidad temas centrales en las iniciativas mundiales (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD, 2011), hecho directamente palpable en los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM): ODM 1- Erradicar la pobreza extrema y el hambre y ODM 7- Garantizar la sostenibilidad ambiental(Naciones Unidas, 2010).

De la necesidad de disminuir la brecha digital en las regiones alejadas de las cabeceras municipales nace el proyecto de W-SPACE TV, el cual busca ofrecer un canal de acceso a la información para estas regiones. Conociendo que ofrecer el canal para la transmisión de información es tan solo el primer paso para lograr un impacto positivo para suplir la necesidad.

1.4 Hipótesis

El uso de una red inalámbrica IEEE 802.22 WRAN es viable técnicamente como tecnología de canal de retorno para la televisión digital terrestre en ciudades alejadas de las cabeceras municipales en Colombia.

1.5 Metodología

Para lograr el objetivo propuesto, se realizará una investigación sobre las diferentes alternativas para el canal de retorno que incluirá realizar un documento de estado del arte.

De forma complementaria, se investigará la distribución poblacional del país, identificando el público objetivo y un subconjunto característico de este de forma que se pueda establecer el emplazamiento de las estaciones de difusión para brindar la conexión del canal de retorno.

Por otra parte, se emplearán programas de computadora específicos para realizar simulaciones de la cobertura y el desempeño de una red WRAN IEEE 802.22 que satisfaga las condiciones de una muestra representativa del despliegue a nivel de país. Estas simulaciones determinarán de forma aproximada el comportamiento de la red en términos de: cobertura y throughput, considerando estas dos variables como medida de viabilidad técnica.

1.6 Narrativa por capítulos

La presente trabajo de grado se divide en siete capítulos: Introducción, Estado del arte, Herramientas de simulación, El canal de comunicación, Escenarios de simulación, Resultado de las simulaciones y Conclusiones y futuros desarrollos.

El primer capítulo, Introducción, brinda una visión clara y concisa del tema del trabajo de grado, la motivación para realizarlo y la forma como se va a abordar. El segundo capítulo, por su parte, brinda una aproximación al marco contextual y teórico necesario para fundamentar el desarrollo del trabajo de grado. El tercer capítulo, Herramientas de simulación, provee un listado de algunas de las plataformas de simulación que se pueden emplear y la escogencia de dos de estas para realizar la experimentación se requirió el trabajo de grado. De la misma forma, el capítulo cuarto fundamenta de forma teórica las características del canal, necesarias para hacer las simulaciones más cercanas a los datos que se pueden obtener en entornos reales.

En el quinto capítulo se describen los escenarios que se desean simular, las simplificaciones necesarias para lograr tener resultados aproximados y algunos datos de configuración de las herramientas de simulación. Por su parte, el capítulo sexto, Resultado de las simulaciones, recopila los datos y análisis de las

simulaciones. Y finalmente, el séptimo capítulo recopila algunas conclusiones y trabajos futuros.

CAPÍTULO II – Estado del arte

Al pensar en proveer un canal de comunicación que sirva como vía para disminuir la brecha digital en Colombia se presentan un gran número de alternativas tecnológicas que podrían ser de utilidad para este fin. Estas incluyen tecnologías alámbricas e inalámbricas, las cuales pueden ser tan aceptadas y utilizadas como son la línea de abonado digital (xDSL– Digital Subscriber Line) basada en el cable de cobre empleado en la telefonía convencional, o tan novedosas como la Red inalámbrica de área regional (WRAN – Wireless Regional Area Network) que emplea radio cognitiva y espacios en blanco.

La escogencia de una tecnología u otra dependerá, de muchas variables sociales, económicas, culturales y tecnológicas. Tener en cuenta todas las posibles variables es una labor colosal y debido al alcance del presente proyecto se hace necesario realizar una simplificación basada en la visión del autor y su tutor. De forma que a partir de la hipótesis básica se presenta el desarrollo teórico en este apartado.

2.1 Marco contextual

Colombia es un país tropical que cuenta con una orografía variada y cuyo territorio se encuentra atravesado por grandes cadenas montañosas. Su población está distribuida en 1.122 municipios, dividiéndose el 75% en cabeceras municipales y 25% en zona rural(DANE, 2005). Estas dos condiciones, orografía y demografía, conllevan a que el desarrollo en las tecnologías de la información y las comunicaciones este mayormente centralizado en las ciudades, dejando de lado muchas regiones rurales del país.

Son pocos los servicios de comunicaciones que llegan a cubrir más del 90% de la población colombiana, entre estos, la televisión es sin duda la de mayor aceptación e importancia. Además, para el 57% de los colombianos la televisión es importante, siendo atendida más de cinco días a la semana por 77%(Comisión Nacional de Televisión, 2008). En zonas rurales el televisor es el electrodoméstico con mayor penetración, estando disponible en el 61.7% de los hogares rurales (por encima de la estufa – 47.7%, la nevera – 45.3%, el teléfono fijo – 5.6% y el computador 2.0%) y la señal que recibe proviene mayormente de la red de distribución de televisión terrestre (el 85% de los hogares sobre el 11.2% de las tecnologías por cable o satélite y el 3.8% de las comunitarias) (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2009).

Siendo la televisión una tecnología de información con tan buena aceptación y penetración en el país, es bastante relevante el cambio que se está llevando a cabo en la actualidad. El cual, propone un paso de la televisión analógica a la televisión digital terrestre en un periodo de 10 años que se extiende hasta el año 2019. Este cambio ha sido potenciado por la posibilidad de tener interactividad sobre la televisión, además de un aumento en la calidad del sonido y la imagen.

La interactividad sobre a televisión digital es sin duda alguna el hecho que puede marcar la diferencia en la disminución de la brecha digital en el país, en especial en las zonas rurales apartadas. Sin embargo, la interactividad sobre televisión digital tiene dos requerimientos: el primero es la disponibilidad de un canal de comunicación bidireccional, conocido como canal de retorno, y el segundo es la existencia de contenido interactivo que circule por la red y que sea aprovechado con el fin de disminuir la brecha digital.

Por otra parte, a nivel mundial se han desarrollado diferentes estándares de televisión digital (DVB-T (European Telecommunications Standards Institute, 2011), ATSC(Advanced Television Systems Committee, 2007), ISDB (ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2007)) que han tenido asociados varias alternativas de canal de retorno. Específicamente en DVB-T (estándar de televisión digital escogido por Colombia) se han planteado soluciones para canal de retorno como: DVB-RCT, PLC, xDSL, UMTS y Cable modem.

Sin embargo, muchas de las posibles tecnologías de canal de retorno han sido desestimadas o han quedado en desuso en pro de una tecnología que se adapta mejor al entorno donde se despliega la televisión digital. Por ejemplo, en Europa (que es el caso de referencia debido a que emplea el mismo estándar de televisión digital que Colombia) se ha optado mayormente por un canal de retorno en xDSL o Cable modem, debido a la disponibilidad de estas líneas en casi todo el territorio europeo.

Como se mencionó anteriormente, Colombia ha optado por el DVB-T como estándar de televisión digital terrestre (hace poco el gobierno ha decidido hacer la actualización a la versión dos del mismo estándar), este estándar fue lanzado por el consorcio europeo Digital Video Broadcasting Project (DVB) y define la existencia de un canal de retorno para permitir la prestación de servicios interactivos dentro del sistema de televisión, apoyándose en la pila de protocolos de DVB Network-independent protocols for DVB interactive services - NIP (European Telecommunications Standards Institute, 1997) y siguiendo las guías propuestas en la TR 101 194 (European Telecommunications Standards Institute, 1997). Además, la misma organización sugiere un estándar para el canal de retorno en DVB-T conocido como DVB-RCT (European Telecommunications Standards Institute, 2002), sin embargo no limita la implementación del canal de retorno a una tecnología específica.

2.2 Marco teórico

Existen múltiples alternativas para la implementación del canal de retorno para televisión digital, la escogencia entre una y otra dependerá en gran medida de las condiciones sociales, topológicas, tecnológicas y económicas de cada región. Tal como se ha determinado para la tecnología DVB-T (Digital Video Broadcasting – Terrestrial, Difusión de Video Digital - Terrestre) (European Telecommunications

Standards Institute, 2011), (European Telecommunications Standards Institute, 2009) el canal de retorno puede ser implementado en cualquier variante tecnológica que se desee.

Para dilucidar las diferentes tecnologías a fin de decantarse por alguna de las opciones, se describen algunas características tecnológicas de diferentes soluciones de interconexión y su aplicabilidad al caso colombiano. Para abordar la aplicabilidad de estas tecnologías primero se realiza un acercamiento a la televisión digital terrestre bajo el estándar DVB-T y posteriormente se introduce el canal de retorno.

2.2.1 DVB-T Digital Video Broadcasting – Terrestrial

DVB-T (Digital Video Broadcasting – Terrestrial) es el estándar para televisión digital terrestre lanzado por DVB Project, que en la actualidad cuenta con su segunda versión (DVB-T2) y que hace parte de la familia de estándares del DVB, compuesta por DVB-T/T2 (para televisión terrestre), DVB-S/S2 (para televisión satelital), DVB-C/C2 (para televisión satelital), DVB-H/SH (para televisión en dispositivos móviles), DVB-IPTV (para televisión sobre redes IP) y otra larga lista de estándares que incluyen: DVB-M, DVB-SIM, DVB-CSA, DVB-IPDC, DVB-IRDI, DVB-PCF, DVB-RCGPRS, DVB-RCT, DVB-RCS/RSC2, DVB-RCL, DVB-RCC y DVB-3DTV.

Las principales características técnicas del estándar DVB-T se puede apreciar en la siguiente tabla (Tabla 2):

	DVB-T	DVB-T2
FEC	Códigos convolucionales + Red Solomon	LPDC + BCH
Tasa de codificación	1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8	1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6
Modulación	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM
Canalización	5, 6, 7, 8 MHz	1.7, 5, 6, 7, 8, 10 MHz
Intervalos de guarda	1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/4, 19/256, 1/8, 19/128, 1/16, 1/32, 1/128
Tamaño de FFT	2k, 8k	1k, 2k, 4k, 8k, 16k, 32k
Pilotos dispersos	8% del total	1%, 2%, 4%, 8% del total
Pilotos continuos	0.35% del total	2.6 % del total
Máxima capacidad	31.66 Mbps	50.34 Mbps

Tabla 2- Características técnicas de DVB-T

El mercado de receptores a nivel mundial (Figura 1) por tecnología, muestra que las tecnologías DVB en su conjunto son las de mayor uso a nivel mundial con un 59% del mercado de los receptores, seguido por un 28% para los receptores que aceptan los estándares ATSC. Estos datos no incluyen los receptores de IPTV.

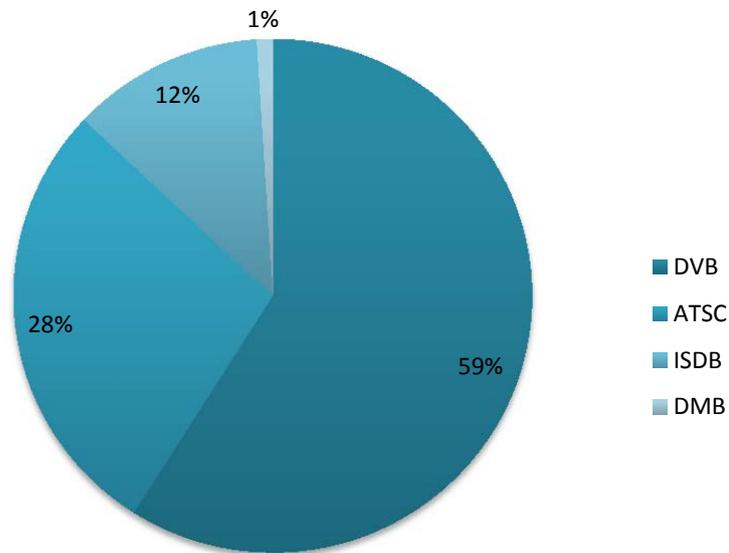


Figura 1 - Mercado de receptores de TVDigital en el mundo por tecnología

La distribución de los equipos receptores a nivel mundial entre las tres plataformas de difusión principales, estandarizados por el DVB Project, son: 40% para satélite, 34% para terrestre y 26% para cable.

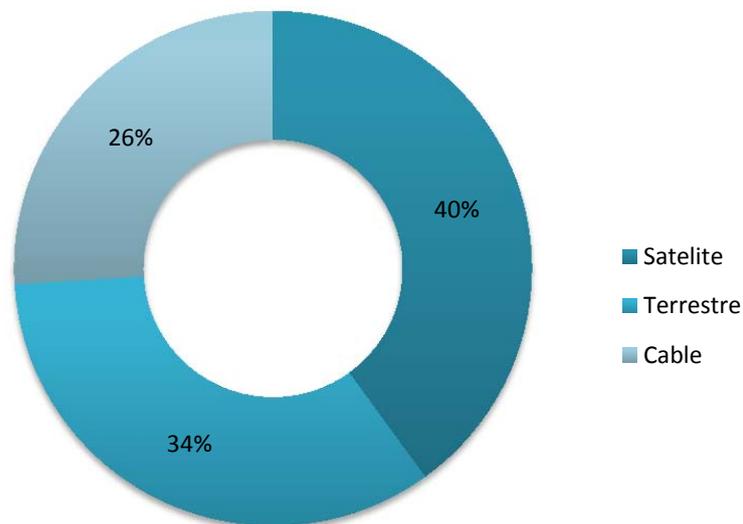


Figura 2 - Mercado de receptores por plataforma DVB

Por su parte, la adopción del estándar de televisión digital terrestre DVB-T/T2 es una alternativa que involucra una mayor cantidad de países a nivel mundial. En la

Figura 3² se pueden observar los países del mundo y los estándares que han elegido para el despliegue de la televisión digital terrestre. El dominio del estándar DVB-T en Europa y África contrasta con la situación en Sudamérica donde predomina el estándar ISDB-T siendo Colombia y Panamá los únicos que han optado por DVB-T/T2.

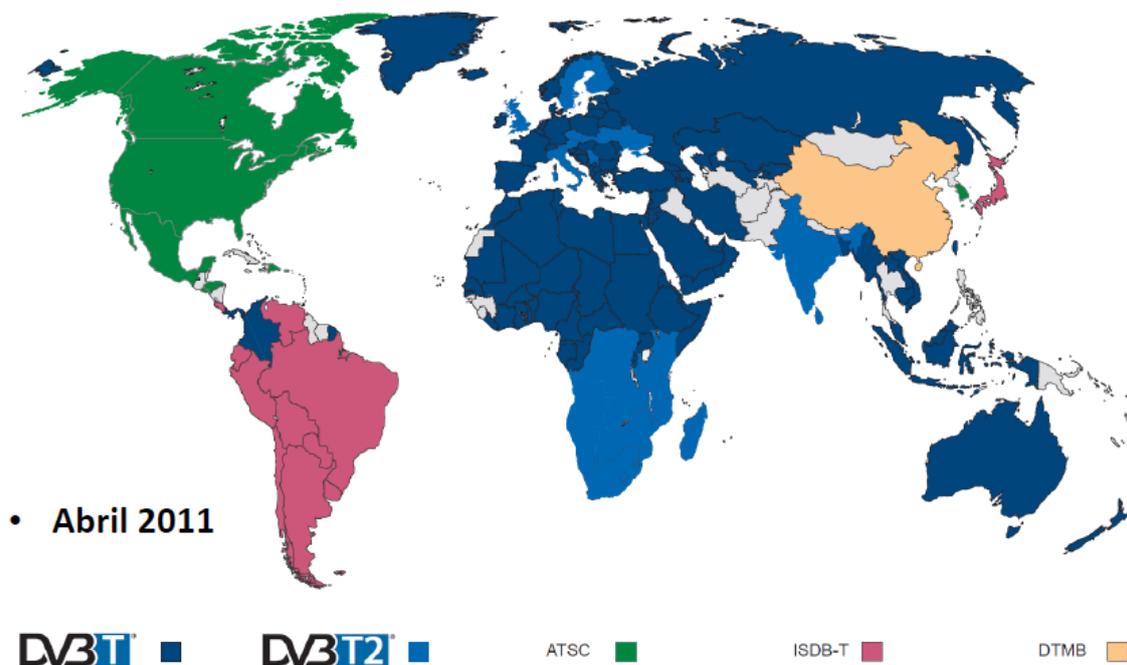


Figura 3 - Adopción de estándares de televisión digital terrestre

2.2.2 El canal de retorno

Conceptualmente, el canal de retorno (o canal de interacción - Interaction channel - IC) es un canal de comunicación bidireccional entre el proveedor de servicios y el usuario, establecido con el fin de proveer interacción. Está compuesto por dos rutas de interacción: de retorno (Return Interaction path) y hacia adelante (Forward Interaction path) (Figura 4). La ruta de interacción de retorno, desde el usuario al proveedor de servicios, se utiliza para realizar peticiones al proveedor de servicios, responder preguntas o cargar datos. Por su parte la ruta de interacción hacia adelante, desde el proveedor de servicios hacia el usuario, es usada para suministrar información y cualquier otra comunicación para la prestación de servicios interactivos (European Telecommunications Standards Institute, 2002).

El estándar de televisión digital europeo, Digital Video Broadcasting (DVB), no definió una única tecnología para la implantación del canal de retorno y ha dejado la labor de escoger la mejor tecnología, o combinación de estas, a las diferentes administraciones buscando siempre la que se adapta mejor al entorno de

² Fuente: Presentación: Curso DVB Colombia, iTEAM, Gomez, David. Septiembre de 2011

despliegue. Además, cabe mencionar que el canal de retorno puede proveer cada uno de sus rutas por una tecnología diferente o integrarlas en una sola tecnología.

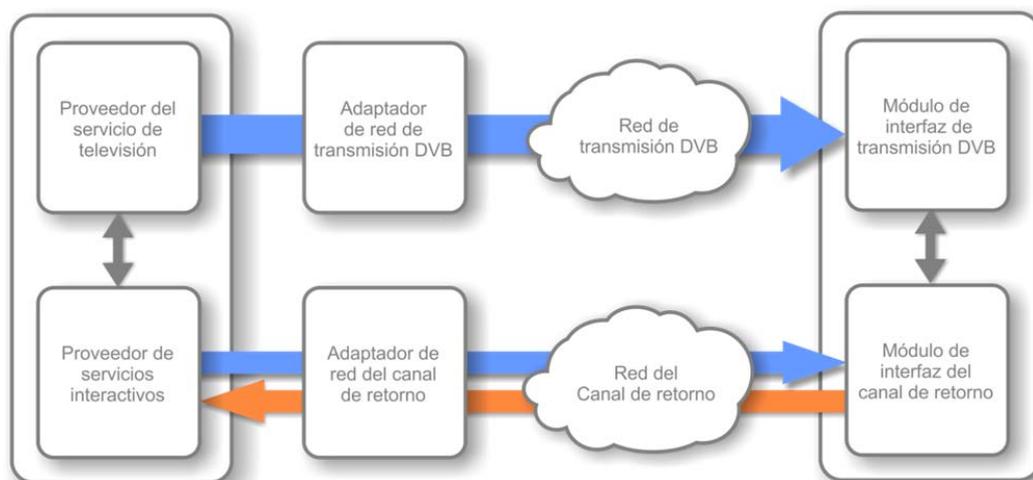


Figura 4 - Arquitectura del canal de retorno

De forma práctica, se puede definir el canal de retorno, como la vía de comunicación entre el usuario y los proveedores de servicios interactivos. Como tal, es un medio de apoyo a las aplicaciones interactivas que se ejecuten dentro del equipo de usuario de la televisión digital (TV, Set top box – STB, PC + decodificador).

La arquitectura de un sistema de televisión digital (incluye diversos mecanismos de difusión) se puede apreciar en la siguiente figura (Figura 5):

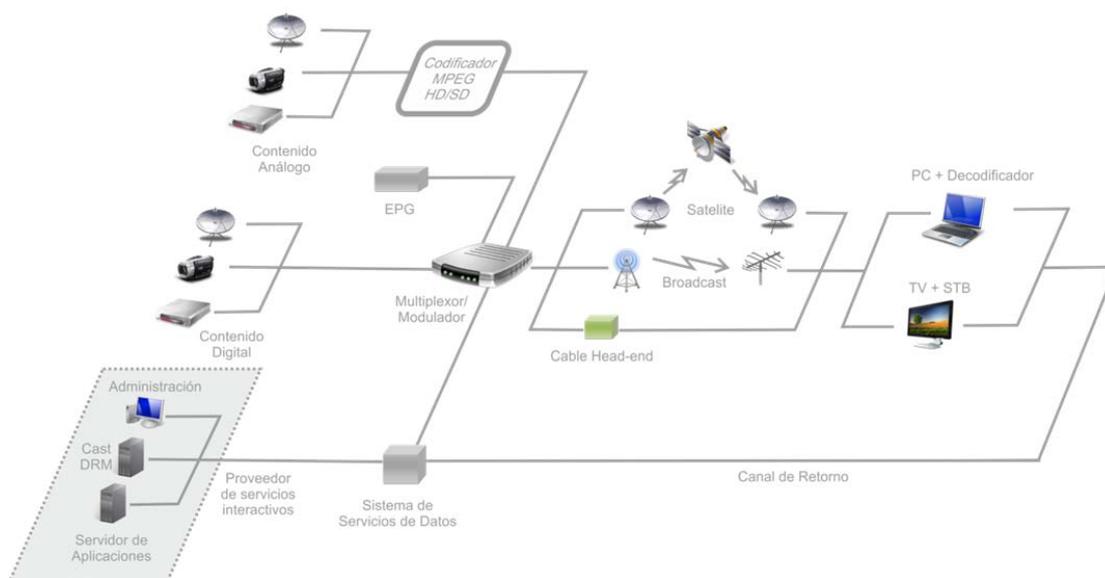


Figura 5 - Arquitectura de un sistema de televisión con canal de retorno

2.2.2.1 Las diferentes tecnologías de acceso de banda ancha

Como ya se ha mencionado, prácticamente cualquier tecnología de telecomunicaciones puede ser usada como tecnología para el despliegue del canal de retorno, siempre y cuando cumpla con ser una tecnología de acceso de banda ancha, en este capítulo se evaluarán las siguientes tecnologías:

- Alámbricas
 - PLC - Power Line Communications
 - xDSL - Digital Subscriber Line
 - Cable modem
 - Fibra óptica
- Inalámbricas
 - Satélite
 - UMTS - Universal Mobile Telecommunications System
 - WiMAX - Worldwide Interoperability for Microwave Access
 - WRAN – Wireless Regional Area Networks

La lista de tecnologías descritas no pretende ser exhaustiva, por el contrario busca dar una idea de la gran variedad de tecnologías existentes y que la elección entre una u otra dependerá enteramente del entorno de despliegue.

2.2.3 PLC - Power Line Communications

PLC es un concepto que cobija un conjunto de diferentes tecnologías que utilizan las líneas de energía eléctrica (o de transmisión de potencia) para transmitir señales digitales que conviertan la línea en un medio de comunicación de datos a alta velocidad. En la actualidad son tres los estándares que se han implementado: IEEE 1901 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010), HomePlug AV2(HomePlug: Powerline Alliance, 2012) y ITU G.hn/G.9960(International Telecommunication Union, 2010)(International Telecommunication Union, 2010).

Para entender cómo funcionan las tecnologías PLC es necesario conocer el esquema de distribución de la red eléctrica, para esto basta conocer los segmentos de red y el papel de los transformadores como intermediarios entre estos (Figura 6).

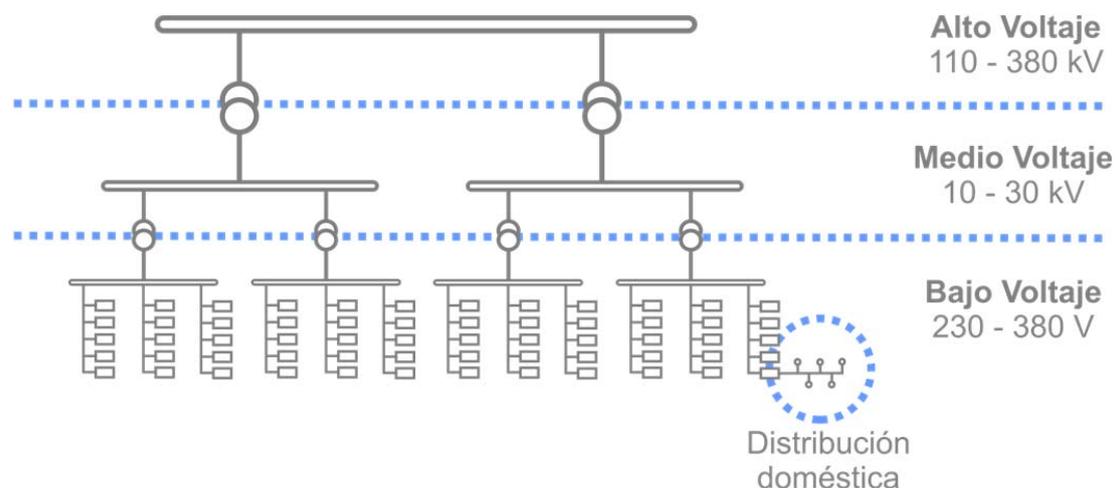


Figura 6 - Arquitectura de la red de potencia eléctrica

Como se observa, la red puede dividirse en cuatro segmentos: alto voltaje, medio voltaje, bajo voltaje y distribución doméstica. Estos segmentos se encuentran interconectados mediante transformadores que se encargan de disminuir el voltaje eléctrico entre un segmento de mayor voltaje y uno de menor voltaje.

2.2.3.1 Características tecnológicas

Las tecnologías PLC prometen obtener una tasa de transmisión de hasta 200 Mbps, transmitiendo en frecuencias de entre 1.6 a 30 MHz sobre un medio compartido e intrínsecamente ruidoso.

Es necesario aclarar que el comportamiento entre cada uno de los segmentos puede ser muy diferente uno del otro. En las líneas de alto voltaje se suele emplear para la comunicación de datos un tendido de fibra óptica que comúnmente los distribuidores de energía eléctrica instalan junto con las líneas de voltaje. Por su parte los segmentos de medio y bajo voltaje pueden considerarse con un comportamiento similar siempre y cuando se tenga presente el efecto de los transformadores, estos segmentos suelen ser los empleados para proveer servicios de acceso banda ancha. Finalmente el segmento de distribución doméstica es el de mayor utilización a nivel mundial y suele ser empleado para aplicaciones de domótica.

2.2.3.2 Aplicabilidad

La red eléctrica es el servicio público de mayor penetración en casi todos los países, esto hace que las tecnologías PLC sean interesantes para brindar servicios de comunicación de datos con fines sociales o en lugares alejados de las cabeceras municipales. Sin embargo existen diferentes razones que hacen que su implantación sea difícil y hasta el momento poco aceptada (Alemania el país de mayor implantación tiene 20.000 usuarios).

La primera de las razones para la poca implantación de las tecnologías PLC para el uso como red de acceso de banda ancha es el paso por los transformadores de la señal de datos. Este paso se convierte en un inconveniente debido a la incapacidad de los transformadores para trabajar en frecuencias altas, lo que conlleva a la derivación de la señal a tierra o a la atenuación de la misma. Para sopesar este inconveniente se hace necesario el uso de repetidores en cada transformador, lo que conlleva a un aumento en los costos del sistema.

Una segunda razón, está vinculada con las frecuencias de operación empleadas y su coincidencia con las frecuencias usadas en radiodifusión o en radio aficionados, este hecho unido a que las líneas eléctricas no tienen blindaje hace que las señales de datos útiles se puedan eliminar en transmisión.

Finalmente, una tercera razón, la constituye la atenuación en función de la distancia de las frecuencias empleadas y las reflexiones debido a ramificaciones, estas dos características se ven reflejadas en desvanecimientos selectivos con variación temporal (dependientes de la carga de la red en un momento dado). Estos efectos se pueden reducir con el uso de modulaciones adaptables, lo que incrementa el costo de los equipos.

2.2.4 xDSL - Digital Subscriber Line

xDSL son un conjunto de tecnologías que permiten acceso de banda ancha sobre par trenzado de cobre al tiempo que mantiene una línea telefónica. Existen una gran cantidad de tecnologías xDSL las más representativas y sus características se observan en la Tabla 3. Sin embargo, la que se encuentra con más frecuencia para dar cobertura al usuario doméstico es el ADSL.

En ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) sigue una orientación asíncrona para los flujos de subida y bajada, considerando el uso típico de un usuario doméstico de Internet. Así, divide el ancho de banda disponible en tres franjas (Figura 7): de 0 a 4 kHz para el uso del servicio de línea telefónica, de 25.875 a 138 kHz para el flujo de subida y de 138 kHz a 1104 kHz para el flujo de bajada.



Figura 7- ADSL división de frecuencias

La arquitectura de ADSL se basa en tres equipos el DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer), Splitter (Figura 8Figura 8) y modem.

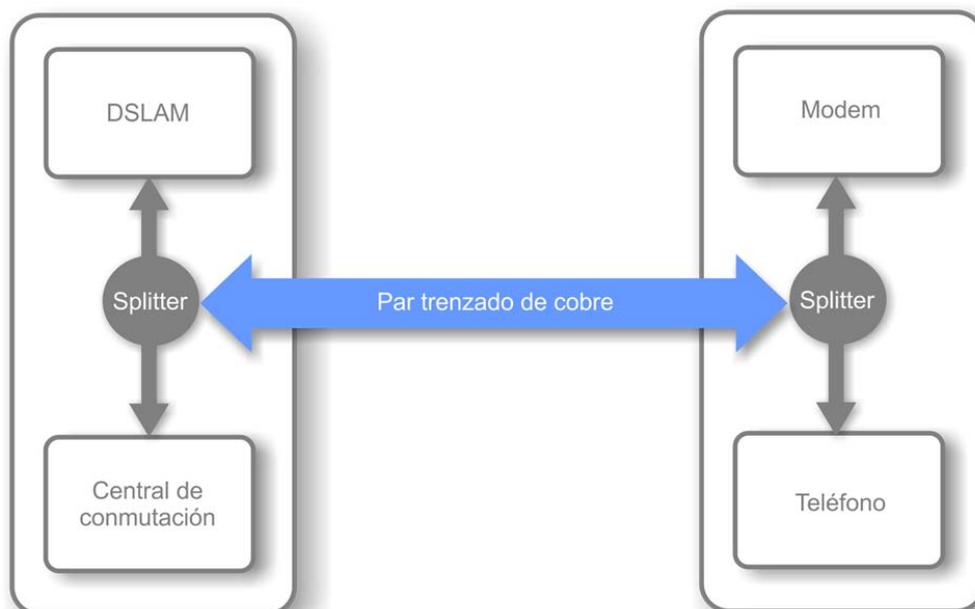


Figura 8 - Esquema arquitectura ADSL

Aunque la gráfica no lo muestra, es común que el núcleo de la red del operador este implementado sobre anillos de fibra óptica que interconecten las diferentes centrales y provean la salida a internet.

2.2.4.1 Características tecnológicas

Las principales características tecnológicas de las variantes de xDSL más representativas se pueden observar en la Tabla 3.

	ADSL³	HDSL⁴	SDSL⁵	VDSL⁶
bit/seg	1.5 – 9 Mbps (descendente) 16 – 640 kbps (ascendente)	1.544/2.048 Mbps	1.544/2.048 Mbps	13 – 52 Mbps (descendente) 1.3 – 2.3 Mbps (ascendente)
Modo	Asimétrico	Simétrico	Simétrico	Asimétrico

³ ADSL: Asymmetric digital subscriber line (American National Standards Institute, 1999), (International Telecommunication Union, 1999), (International Telecommunication Union, 1999), (International Telecommunication Union, 2009), (International Telecommunication Union, 2002), (International Telecommunication Union, 2009)

⁴ HDSL: High-bit-rate digital subscriber line (International Telecommunication Union, 1998)

⁵ SDSL: Symmetric digital subscriber line

⁶ VDSL: Very-high-bit-rate digital subscriber line (International Telecommunication Union, 2004), (International Telecommunication Union, 2011)

Pares de cobre	1	2	1	1
Distancia	3.7 - 5.5 km	3.7 km	3 km	1.4 km
Señalización	Analógica	Digital	Digital	Analógica
Código de línea	CAP/DMT	2B1Q	2B1Q	DMT
Frecuencia	1 - 5 MHz	196 kHz	196 kHz	10 MHz
bits/ciclo	Variable	4	4	Variable

Tabla 3 - Tecnologías xDSL

2.2.4.2 Aplicabilidad

Las redes xDSL son muy interesantes para la implantación de servicios de acceso de banda ancha porque dependen de la existencia de la red telefónica sobre par trenzado la cual está altamente extendida en la mayoría de los países, además, presenta unos anchos de banda razonables para diversos servicios y los costos de despliegue no son tan altos como otras tecnologías de acceso.

Sin embargo, esta misma ventaja se convierte en una limitante en sitios donde no existe red telefónica o donde se requiere un ancho de banda mayor, por otra parte, el mal estado de la red telefónica en algunas localidades o la variedad de cableado empleado puede causar que la red sea inestable o no logre las expectativas esperadas de la tecnología.

2.2.5 Cable modem

Esta tecnología, tal como las xDSL, hacen uso de redes que ya están tendidas para el aprovisionamiento de un servicio de telecomunicación diferente, en este caso se trata del servicio de televisión por cable coaxial. El cable modem recibe su nombre del modem empleado para modular la señal de datos sobre el cable coaxial aprovechando las frecuencias no empleadas por los canales de televisión. Existen dos estándares ampliamente adoptados para la tecnologías de cable modem: DOCSIS⁷ y EuroDOCSIS⁸, la gran diferencia del estándar EURODOCSIS es que tiene una canalización a 8 MHz (empleada en Europa) en lugar de la de 6 MHz de DOCSIS.

El cable modem junto a las tecnologías xDSL son las dos soluciones mas ampliamente extendidas para proveer servicios de internet de banda ancha en las ciudades. La arquitectura de un sistema de distribución de cable modem puede ser vista en la Figura 9. Como se puede observar son tres los componentes principales de una red de cable modem: el combiner que se encarga de combinar

⁷ DOCSIS: Data Over Cable Service Interface Specification(CableLabs, 2006), (CableLabs, 2006), (CableLabs, 2006)

⁸ EuroDOCSIS (International Telecommunication Union, 2007), (International Telecommunication Union, 2007), (International Telecommunication Union, 2007), (International Telecommunication Union, 2007), (European Telecommunications Standards Institute, 2009), (European Telecommunications Standards Institute, 2007)

las señales de televisión e internet, el splitter que realiza el proceso inverso y el cable modem que adecua la señal para que pueda ser procesada por un computador.

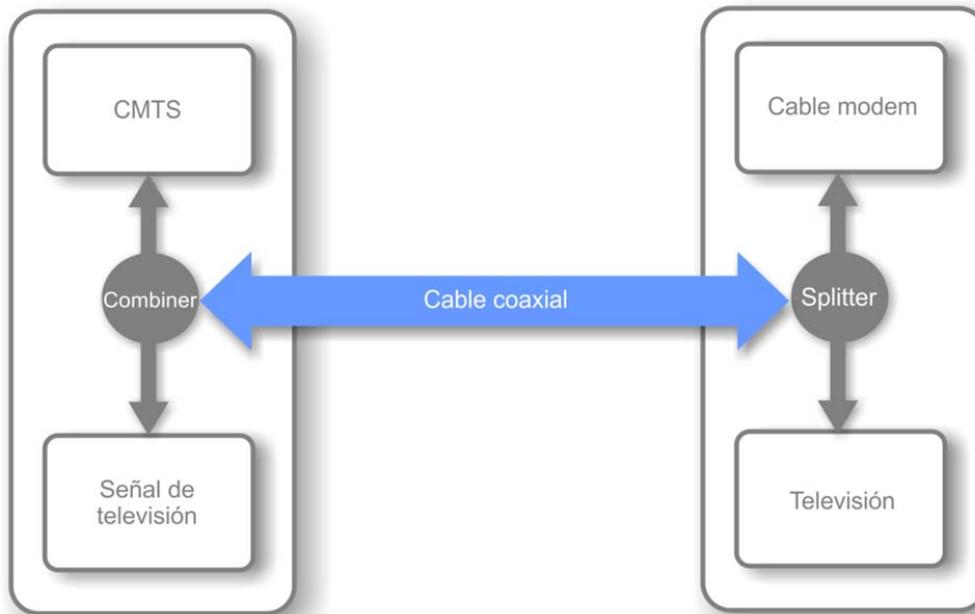


Figura 9 - Arquitectura de una red de cable modem

Es necesario anotar que existe un estándar oficial del Digital Video Broadcasting Project - DVB para el canal de retorno sobre cable, este es el DVB-RCC (European Telecommunication Standard Institute, 1998) sin embargo es muy poco usado y en el mercado son escasos los equipos que lo implementan.

2.2.5.1 Características tecnológicas

El cable modem emplea uno de los canales de televisión para el flujo de bajada, generalmente el ancho de banda de cada canal de televisión es de 6 MHz; y para el flujo de subida destinada 2 MHz asumiendo una distribución asimétrica de los dos flujos (como ADSL).

La tasa de bits, en esta tecnología, puede llegar a superar los 100 Mbps, sin embargo, al ser la red de distribución un medio compartido se le asigna un canal de televisión a un grupo de usuarios que lo comparten, esto ocasiona que la tasa de bits obtenida sea variable y en ocasiones este degradada, dependiendo del uso que el grupo de usuarios haga.

En la actualidad es común encontrar que las redes de televisión son un híbrido entre fibra óptica y cable coaxial (en redes Hybrid Fiber Coaxial -HFC). Dejando el cable coaxial como tecnología de última milla. Este hecho beneficia el desempeño

y la calidad de la red que pueden percibir los usuarios y expande las posibilidades de servicios que pueden brindar los operadores.

2.2.5.2 Aplicabilidad

El cable modem provee unos anchos de banda altos y que pueden ser bastante estables, en especial si se brindan sobre redes HFC, además, el rendimiento de la red no depende drásticamente de la distancia desde el suscriptor a la central. Al combinar estos dos aspectos con la gran penetración de la televisión por cable que hay en ciertos países esta opción suele ser muy atractiva para brindar servicios de acceso a datos de banda ancha.

Sin embargo, tal como ocurre con las tecnologías xDSL, la ventaja de estar sobre redes ya desplegadas no puede ser aprovechada en sitios que no cuentan con estas y generalmente es más costoso desplegar una nueva red de cable modem que emplear otras tecnologías.

2.2.6 FTTx - Fibra óptica

La fibra óptica es la tecnología que provee el mayor ancho de banda y el menor probabilidad de error, por lo tanto es comúnmente empleada en entornos que requieren un rendimiento superior de sus redes, además, es la tecnología que menor consumo eléctrico tiene. En este contexto las tecnologías basadas en fibra óptica suelen clasificarse como (Figura 10): fibra hasta el nodo (FTTN), fibra hasta la acera (FTTC), fibra hasta el edificio (FTTB), fibra hasta la oficina (FTTO) y fibra hasta el hogar (FTTH).

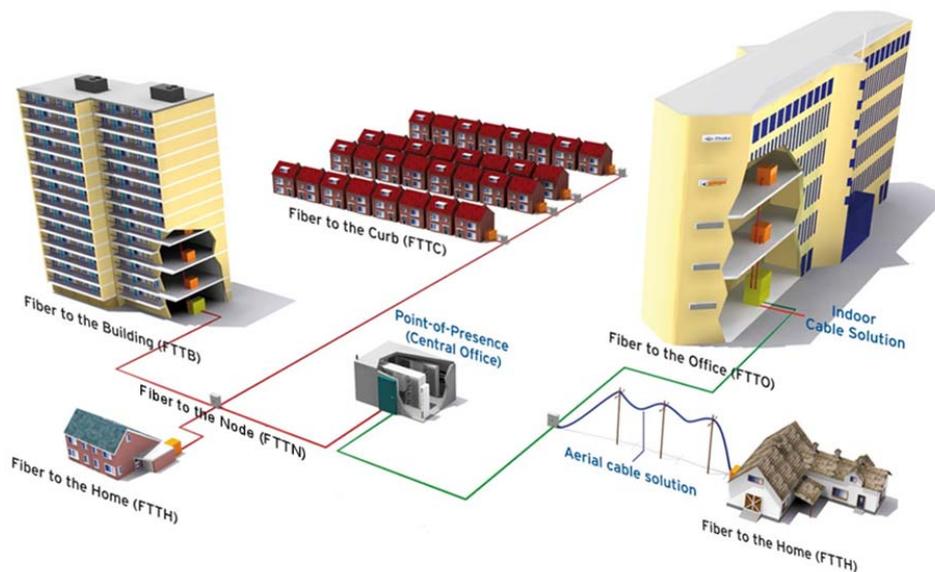


Figura 10 – Clasificación de las tecnologías de fibra óptica

En las tecnologías que se presentaron anteriormente: cable modem, xDSL y PLC, se ha descrito que todas suelen tener un punto de contacto con las redes de fibra. En el caso de PLC y xDSL se puede considerar que el núcleo de la red suele estar sobre fibra óptica (FTTN), mientras que en el cable modem se pueden encontrar variantes de fibra hasta la acera (FTTC) y fibra hasta el edificio (FTTB). Como se está hablando de tecnologías que sirvan para el canal de retorno en televisión digital solo se considera el caso de la fibra hasta el hogar (FTTH) que consiste en tener la red completa implementada sobre esta tecnología.

La arquitectura de las redes FTTH se compone de una oficina central (OC) o punto de presencia (PoP), una red óptica de distribución (ODN) y de un equipo local de cliente (CPE). A su vez, la red óptica de distribución puede ser de varios tipos: Home Run Fiber (punto a punto), Active Star Ethernet (punto a punto), y Passive Optical Network - PON (punto a multipunto). Para la implantación de fibra hasta el hogar es común encontrarse con redes de distribución PON (Passive Optical Network) (Figura 11).

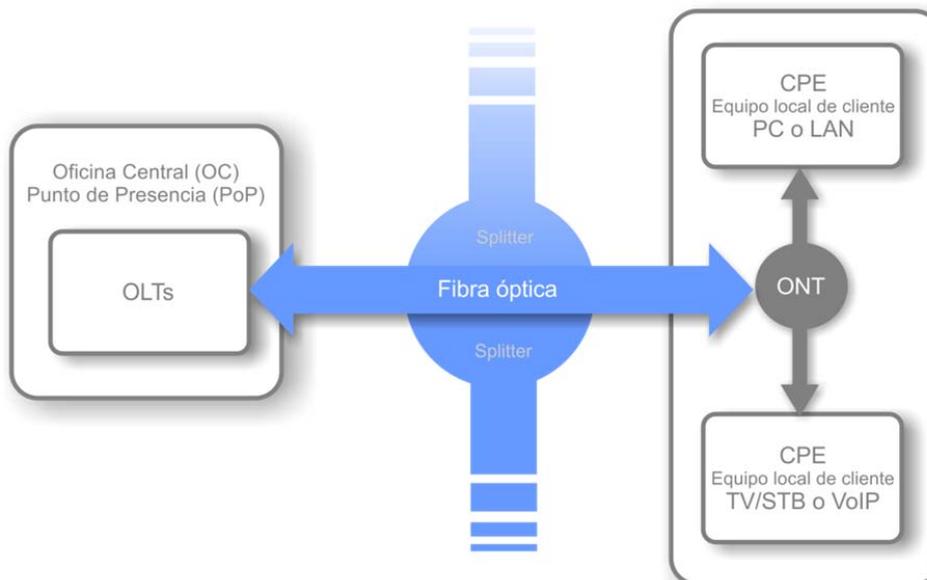


Figura 11 - Arquitectura de red FTTH

2.2.6.1 Características tecnológicas

Las redes FTTH ofrecen tasa de bits de hasta 2.5 Gbps en el flujo descendente y 1.25 Gbps en flujo ascendente soportando hasta 64 usuarios simultáneos. Con las redes de distribución punto a punto se pueden alcanzar distancias de hasta 80 km de la oficina central o punto de presencia, mientras que con las redes punto a multipunto se pueden alcanzar distancias de hasta 20 km.

Además, cuenta con varias ventajas propias del uso de la fibra óptica: inmunidad al ruido electromagnético, baja atenuación, banda de paso muy ancha, al tiempo que es un medio: ligero, flexible y resistente (temperatura, corrosión, mecánica).

2.2.6.2 Aplicabilidad

La fibra óptica es un medio único que provee unas ventajas muy deseables por encima de la mayoría de tecnologías de transmisión. La mejora en la fabricación de la fibra, la disminución de los costes de los equipos transmisores y las economías de escala ha llevado a la implantación en varios países y un uso más intensivo en las grandes metrópolis.

Por otro lado, usar fibra óptica implica, en casi todos los escenarios, realizar un tendido nuevo con este medio y en grandes distancias puede resultar muy costoso. Además los equipos de red aun siguen siendo costosos en comparación con los dispositivos electrónicos.

2.2.7 Satélite

La comunicación satelital está siendo usada desde los años 60, ha sido una tecnología que ha evolucionado en calidad y en disponibilidad, haciéndola una alternativa para muchos servicios. Generalmente quien desea brindar algún servicio de telecomunicaciones alquila un rango de frecuencias a las grandes compañías que son propietarias de los satélites.

Es especialmente apreciada para las tecnologías de radiocomunicación en broadcast que desean tener grandes zonas de coberturas o llegar a lugares de difícil acceso. Esto se debe al hecho de que las transmisiones satelitales pueden ser consideradas como de naturaleza broadcast por la gran zona geográfica que cubren. A la zona geográfica que cubre mientras se desplaza (también hay satélites estacionarios) se le conoce como huella del satélite.

La arquitectura de un sistema de comunicaciones satelitales suele estar compuesta por el satélite que sirve como retransmisor, un proveedor de servicios enlazado con una antena satelital y los clientes que cuentan con una antena satelital y un modem (Figura 12).

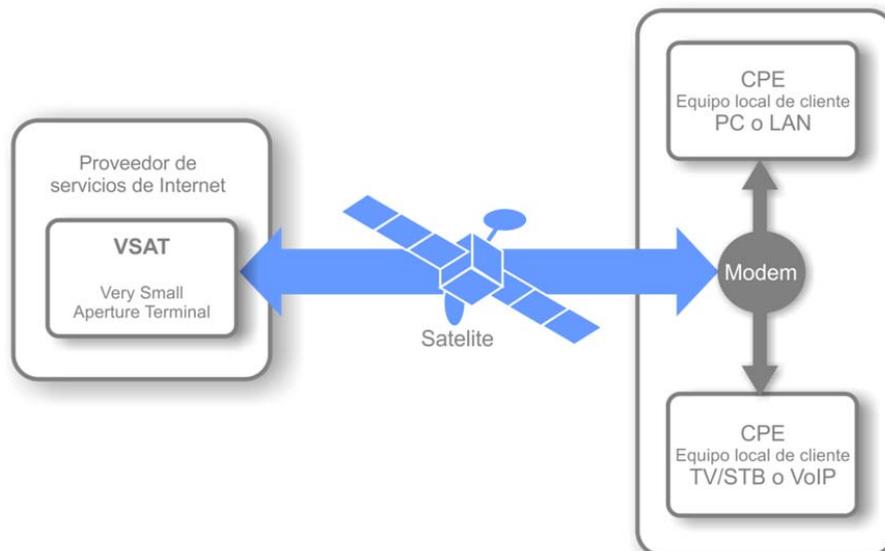


Figura 12 - Arquitectura básica de un sistema satelital

Los miembros del Digital Video Broadcasting Project – DVB definieron un estándar para el canal de retorno mediante comunicación satelital conocido como DVB-RCS (European Telecommunication Standard Institute, 2003) el cual ha suscitado mucho interés pero en el momento no ha tenido un gran despliegue.

2.2.7.1 Características tecnológicas

Las comunicaciones satelitales suelen realizarse en tres diferentes bandas de frecuencia (Tabla 4): banda C, banda Ku y banda Ka, las frecuencias empleadas en estas bandas y el principal inconveniente al que se enfrentan se pueden observar en la siguiente tabla:

Banda	Frec. Ascendente	Frec. Descendente	Problemas
C	5.926 – 6.425 GHz	3.7 – 4.2 GHz	Interferencia terrestre
Ku	14.0 – 14.5 GHz	11.7 – 12.2 GHz	Lluvia
Ka	27.5 – 30.5 GHz	17.7 – 21.7 GHz	Lluvia

Tabla 4 - Bandas de frecuencias en comunicación satelital

Debido a la distancia que la señal debe recorrer para ir hasta el satélite y volver a tierra, las comunicaciones satelitales suelen tener retardos cercanos a los 250 milisegundos, este hecho puede hacer que algunas comunicaciones sensibles al retardo deban emplear mecanismos que contrasten este comportamiento. Por otra parte, eficiencia espectral es del orden de 1 bps/Hz y la asignación de canales es dinámica.

2.2.7.2 Aplicabilidad

Las comunicaciones satelitales son especialmente útiles para dar servicios en zonas alejadas, entregando un buen ancho de banda y una baja tasa de errores. Además, logra un cubrimiento del 100% en la mayoría de países y permite escenarios de movilidad. En contraposición se puede considerar que el costo de implementar tecnologías satelitales suele ser mayor que el de otras tecnologías inalámbricas.

2.2.8 UMTS - Universal Mobile Telecommunications System

UMTS (European Telecommunications Standards Institute, 2010) es una tecnología celular considerada de tercera generación que permite el uso de datos y voz desde un terminal móvil, la principal cualidad de UMTS es el habilitar servicios de banda ancha (video, sonido, imágenes e internet) sobre terminales móviles.

UMTS se considera una evolución de las redes GSM/GPRS pero es más probable que haya sido una revolución al ofrecer mejoras en aspectos diferentes a la capacidad de transmisión que era el camino que estaban siguiendo las anteriores evoluciones de GSM/GPRS. UMTS por su parte ha sufrido sus propias evoluciones: High-Speed Packet Access (HSPA), Evolved HSPA, High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) y High-Speed Uplink Packet Access HSUPA (European Telecommunications Standards Institute, 2012).

La arquitectura básica de una red UMTS (Figura 13) está compuesta por tres partes: el núcleo de la red, la red de acceso radio y el equipo de usuario. El núcleo se encarga de las funciones de transporte, movilidad, interconexión y señalización, además del plano de inteligencia que incluye la lógica y el control de servicios de red. Por su parte, la red de acceso radio, conocida como UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network) permite la interconexión entre los equipos de usuario y el núcleo de la red, y se compone en dos subsistemas (Radio Network Subsystem - RNS): los controladores de la red de radio (Radio Network Controller - RNC), encargado de controlar la red de acceso radio, y los nodos B, que son las estaciones base. Finalmente se encuentra el equipo de usuario, compuesto del terminal móvil y su módulo de identidad (Universal Subscriber Identity Module - USIM).

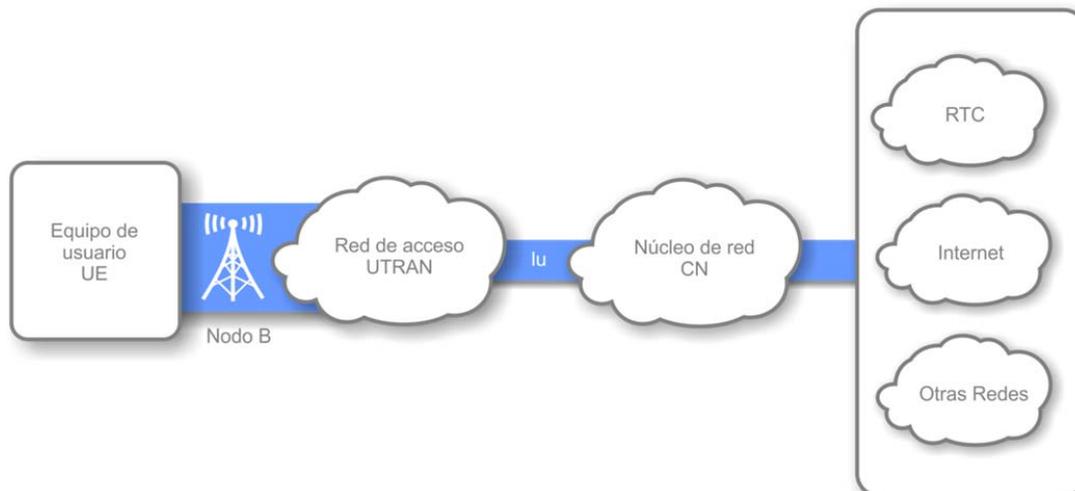


Figura 13 - Arquitectura básica de UMTS

Existen muchas más tecnologías asociadas al esquema celular y en especial a UMTS, varias de estas ya han sido nombradas: GSM/GPRS, HSPA, Evolved HSPA, HSDPA y HSUPA. Además, de esta se encuentran las nuevas tecnologías asociadas con la cuarta generación de comunicaciones móviles Long Term Evolution - LTE.

2.2.8.1 Características tecnológicas

UMTS ofrece tasas de bit de hasta 2 Mbps, logrando hasta 672 Mbps con una variante de HSPA+ versión 11 de 3GPP, esta tasa depende en gran medida de la distancia de la estación base y de la malla celular desplegada por el operador. Los datos de tasa de bits según la distancia para la tecnología UMTS se puede observar en la siguiente tabla (Tabla 5):

Tipo de célula	Ámbito de la cobertura	Movilidad	Tasa de bit
Picocélula	Edificio, cuadra (10-50 m)	Baja (< 10 km/h)	2048 kbps
Microcélula	Urbano (300 – 500/2 – 4 km)	Media (< 150 km/h)	384 kbps
Macrocélula	Rural (5-6 km)	Alta (< 500 km/h)	144 kbps

Tabla 5 - Tasa de binaria según distancia para tecnología UMTS

Además de la tasa de bit que ofrece un sistema UMTS, también es destacable la capacidad de soportar varias conexiones simultaneas (poder recibir una llamada mientras se mantiene una conexión a internet), coexistencia e interconexión con satélites (ideado originalmente para ampliar la cobertura celular pero poco utilizado) y transmisión de datos síncrona y asimétrica bajo conmutación de paquetes o de circuitos.

2.2.8.2 Aplicabilidad

La tecnología UMTS y sus posteriores evoluciones han sido ampliamente aceptadas en el mercado y son la tecnología de transmisión de datos de más rápido y amplio crecimiento en el mundo. En la actualidad tienen gran expansión en países en vías de desarrollo que no contaban anteriormente con una red cableada y ofrecer servicios de banda ancha móvil. Es una excelente opción para brindar servicios de telefonía y de internet, dado las tasas binarias aceptables y la poca infraestructura que hay que instalar.

Como punto en contra se encuentra con el hecho que la instalación de nodos B puede resultar costosa en poblaciones donde las personas se encuentren muy dispersas o en sitios de difícil acceso. Además, el área de cobertura puede ser pequeña para alcanzar poblaciones lejanas que no justifican el montaje de un nodo B para ellas solas.

2.2.9 WiMAX - Worldwide Interoperability for Microwave Access

WiMAX (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009) es el nombre comercial de la tecnología inalámbrica de banda estandarizada por el IEEE 802.16. En la actualidad el estándar soporta servicios de tráfico de datos y de voz, y movilidad. Este sistema está en constante evolución⁹ y en la actualidad es considerado una red inalámbrica de cuarta generación (4G).

La arquitectura básica de una red WiMAX se puede apreciar en la Figura 14. Esta arquitectura está compuesta por las estaciones móviles (Mobile Stations - MS) que son los equipos que utiliza el usuario para acceder a la red, el acceso a los servicios de red (The access service network - ASN) compuesto por las estaciones base (Base station - BS) y las puertas de acceso a los servicios de red (Access service network gateway - ASN-GW) que en conjunto brindan el acceso a la red, y el servicio de conectividad de red (Connectivity Service Network ICSN) que interconecta con otras redes y da los servicios de inteligencia de la red.

⁹ La evolución del estándar WiMAX incluye: 802.16.2 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2004), 802.16h (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010), 802.16j (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009), 802.16k (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2007) y 802.16m (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011)

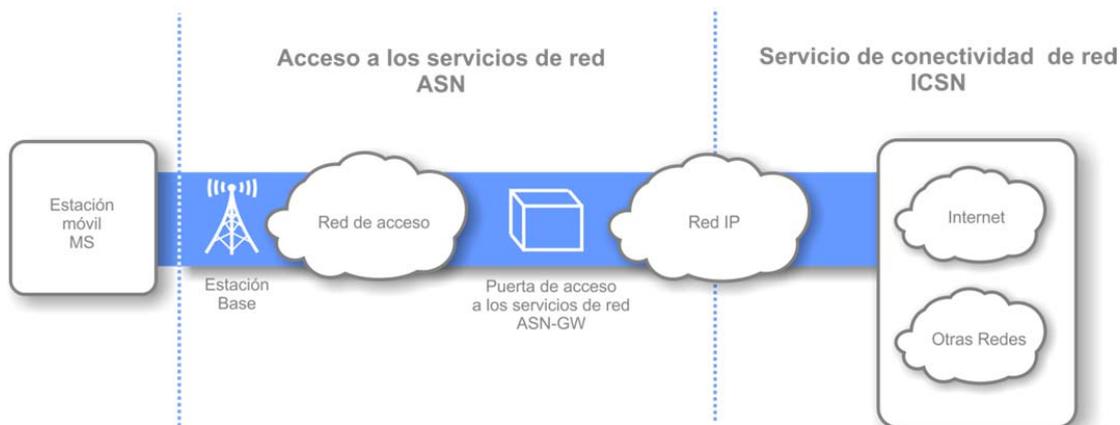


Figura 14 - Arquitectura de una red WiMAX

Una tecnología que también hace parte de la familia IEEE 802 es la tecnología WiFi IEEE 802.11 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012) la cual ha sido ampliamente aceptada para la implementación de redes de área local inalámbricas. En constante desarrollo ha logrado alcanzar los 600 Mbps (teóricos – IEEE 802.11n (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009)) de tasa de bit sin embargo en la actualidad están pensadas para dar servicios a distancias inferiores a un kilómetro (existen soluciones que alcanzan hasta los 5 km pero son muy poco empleadas). Existen nuevas propuestas que exigen seguir revisando la evolución de esta tecnología como: 7 Gbps de tasa de bit (IEEE 802.11ac (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012) – IEEE 802.11ad (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011)), uso de espacios en blanco (White Spaces IEEE 802.11af (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012)) y coberturas de mas de un kilómetro.

2.2.9.1 Características tecnológías

En la actualidad el WiMAX puede alcanzar una tasa de bit de hasta 75 Mbps, 1 Gbps en reposo para el estándar 802.16m, y unas distancias de hasta 10 km. Inicialmente operaba en la banda de frecuencia de 10 a 66 GHz con línea de vista (Line Of Sight - LOS) pero con la evolución del estándar en la actualidad contempla el rango de frecuencias entre 2 y 11 GHz sin línea de vista (Non Line Of Sight - NLOS). El rendimiento de las capacidades de WiMAX depende del ancho de banda del canal utilizado. WiMAX proporciona una opción de ancho de banda de canal configurable en el rango de 1.25 MHz a 20 MHz, lo que permite un despliegue flexible (Hernández López & Avilez Rosas, 2009).

WiMAX emplea OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – Multiplicación por división de frecuencia ortogonal) que divide el canal de información en canales de velocidad más baja los cuales se transmiten de forma paralela, esta técnica potencia la capacidad de trabajar en ambiente NLOS. Para el OFDM WiMAX divide el canal en 52 subportadoras de 300 kHz usando 48 de estos para transferencia de datos y 4 para corrección de errores.

2.2.9.2 Aplicabilidad

WiMAX es una tecnología que ha pasado por varios ciclos de aceptación y en la actualidad ha tenido gran auge en Estados Unidos como tecnología de cuarta generación. Brinda tasa de bits aceptables y soporta movilidad, voz y datos. Al ser inalámbrica no requiere de grandes inversiones para crear la red de distribución, sin embargo e igual que ocurre con UMTS, las estaciones base pueden llegar a ser costosas en regiones de difícil acceso o con población muy dispersa.

2.2.10 WRAN - Wireless Regional Area Networks

WRAN es uno de los estándares más recientes que ha propuesto el IEEE y hace parte de la familia de estándares 802, específicamente está definido en los estándares IEEE 802.22 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011) y IEEE 802.22.1 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010). Estaba basado en el uso de los espacios en blanco (frecuencias no usadas en una ubicación geográfica determinada) de la televisión digital. Está diseñado para soportar movilidad y portabilidad bajo una topología punto-multipunto.

Al ser tan reciente, en la actualidad no sigue una arquitectura compleja de implementación bien definida, únicamente se plantea la existencia de dos entidades: el equipo de usuario (Customer Premise Equipment - CPE) y las estaciones base (Base Station - BS).

Un estándar promovido por el Digital Video Broadcasting Project – DVB que asemeja al estándar IEEE 802.22 es el DVB-RCT (European Telecommunications Standards Institute, 2002), el cual alcanza distancias de hasta 65 km trabajando en las bandas UHF y VHF con anchos de banda de 1, 3, 4 y 8 MHz y con diversos esquemas de modulación en QPSK, 16QAM y 64QAM. Lastimosamente, este estándar no ha tenido la aceptación esperada y no hay despliegues en la actualidad pese a llevar casi 10 años publicado.

2.2.10.1 Características tecnológicas

WRAN ofrece tasa de bit de hasta 22 Mbps y áreas de coberturas de hasta 100 km de distancia entre el CPE y la BS. Es un estándar que puede usar diferentes anchos de banda: 6,7 y 8 MHz (similares a los usados en televisión a nivel mundial), que alcanza eficiencias espectrales entre 0.5 bit por Hz hasta 5 bit por Hz y que adopta un esquema asimétrico entre los flujos de subida y bajada.

Este estándar trabaja en la banda de 54 – 862 MHz con modulación OFDMA (con 48 subcanales) y puede usar modulaciones QPSK, 16 QAM y 64 QAM para brindar un servicio diferenciado. Además, permite una característica interesante de agregación de canales, lo cual permite multiplicar el ancho de banda disponible.

2.2.10.2 Aplicabilidad

WRAN es un estándar nuevo por lo que en el momento no se sabe que aceptación tendrá a nivel mundial y por lo tanto el impacto de las economías de escala es aún desconocido. Sin embargo, es una excelente alternativa debido a sus prestaciones como red de acceso de banda ancha y las grandes áreas de cobertura que brinda.

IEEE 802.22 puede ser ideal en casos de tener una población muy dispersa o de difícil acceso debido a que las bandas de frecuencias empleadas tienen una excelente propagación y que el área que cubren puede ser grande. No obstante, en poblaciones densamente pobladas o con necesidades de una tasa de bit más elevada otras tecnologías pueden resultar más idóneas de emplear.

2.2.11 El uso de las tecnologías de acceso como canal de retorno

En secciones anteriores se han explorado diferentes tecnologías de acceso y se han planteado la funcionalidad de un canal de retorno. Sin embargo, es necesario aclarar que el uso del canal de retorno sobre televisión digital terrestre, en especial en tecnología DVB, es muy limitado a nivel mundial.

Existen pocos casos de éxito de la puesta en marcha de sistemas de interactividad sobre DVB y aun son menos lo que emplean canal de retorno. Aunque los estándares DVB sean los más extendidos a nivel mundial y la cantidad de receptores de los que dispone la población sea el más elevado, la interactividad ha sido muy poco desarrollada, quedándose en muchos países con tan solo implementaciones de EPG (electronic program guide – guía electrónica de programas). Sin aplicaciones interactivas que lo demanden, el canal de retorno carece de interés y por tanto las implementaciones reales se limitan a algunos casos puntuales.

Se requiere puntualizar en la función del canal de retorno como un vía de comunicación que requiere de tres elementos para que resulte de interés: aplicaciones interactivas que se ejecuten dentro del equipo de usuario, equipos de usuario que soporten la ejecución de aplicaciones interactiva y que provean las interfaces de comunicación para el canal de retorno, y contenido televisivo que aproveche la interactividad. La existencia de las tres son esenciales para que el canal de retorno sea un factor importante pero además de esto se requiere que exista una cantidad crítica de las mismas y que la calidad sea la exigida por los usuarios.

Teniendo en mente la situación de la interactividad en conjunción con el estándar DVB-T se pueden citar tres países que han realizado incursiones en aplicaciones interactivas con uso de canal de retorno, a saber: Italia, Alemania y Reino Unido. En los tres países se han vendido equipos de usuario (en este caso Set Top Box) que tienen una interfaz Ethernet para el canal de retorno. Lo más común es que las personas usen una red local en sus hogares y a través de estas conecten sus

equipos para brindar el canal de retorno. A su vez las redes locales de los hogares utilizan una tecnología de acceso de banda ancha de un proveedor regional. En los tres casos se emplearon las redes de acceso que ya existen para el acceso a internet de banda ancha y no se desplegó ninguna red nueva para uso exclusivo del canal de retorno. Conociendo las tecnologías de acceso que se emplean mayormente en estos países (Figura 15 - (European Commission, 2011)) se puede concluir que el canal de retorno empleado en los tres países ha sido, en su mayoría, xDSL o Cable Modem.

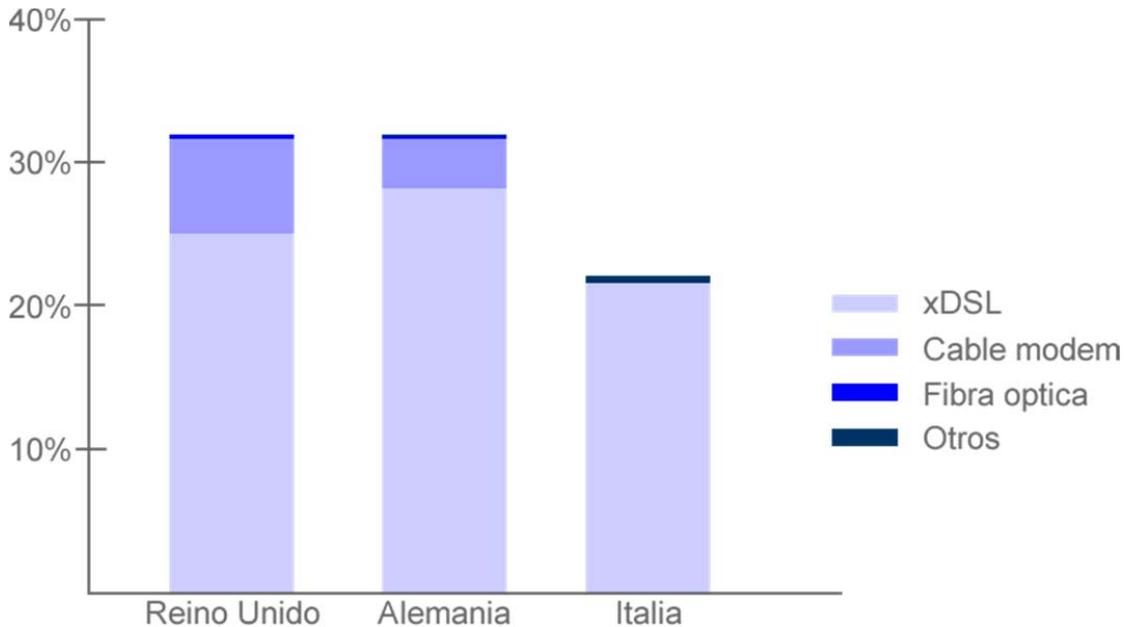


Figura 15 - Penetración por tecnología de acceso

Aunque las implementaciones de éxito en entornos reales son limitadas, el trabajo académico e investigativo que se viene realizando respecto al uso de diferentes tecnologías de acceso ha sido grande. A continuación se hace un repaso sobre los trabajos más relevantes sobre el uso de tecnologías de acceso, diferentes al xDSL y el cable modem.

2.2.11.1 SAMBA

SAMBA¹⁰ (System for Advanced interactive digital television and Mobile services in Brazil) (Polo, Hirakawa, & Junior, PLC as a return channel for interactive digital TV, 2007) (Martucci, Riyuiti Hirakawa, & de Oliveira Jatoba, 2008) (Polo, Maia, Martucci, & Hirakawa, 2009) es un proyecto europeo/brasileño realizado dentro del sexto programa marco de la unión europea (FP6) entre los años 2007 y el 2009, cuyo objetivo principal es:

¹⁰ Página web: <http://www.ist-samba.eu/>

“crear un framework que permita a las comunidades locales a utilizar los Canales de Acceso Comunitario iDTV y a los ciudadanos, incluidos los de bajos ingresos de la población, participar con ellos y utilizar sus servicios. Los recursos de la plataforma SAMBA permiten el desarrollo de innovadoras aplicaciones interactivas centradas en las comunidades locales: servicios, creados localmente, podrían ir desde lo puramente informativo a lo interactivo, incluyendo las aplicaciones con un fuerte enfoque social, tales como eLearning, eGovernment y eHealth”(Hirakawa, Martucci, Zoeschg, & Bensi, 2007)

Como se vislumbra del objetivo principal, el proyecto SAMBA abarca un espectro amplio de frentes tecnológicos, uno de estos frentes es brindar conectividad para el canal de retorno en un ambiente tropical y con las condiciones socioeconómicas de Brasil; para lo cual, proponen como canal de retorno el uso de PLC. El uso de esta tecnología obedece a la penetración de más del 95% de la población que tiene el servicio de electricidad en el país, acompañada de una visión de inclusión social en las localidades más pobres del país. El proyecto incluye una prueba a pequeña escala dentro de la localidad de Barreirinhas.

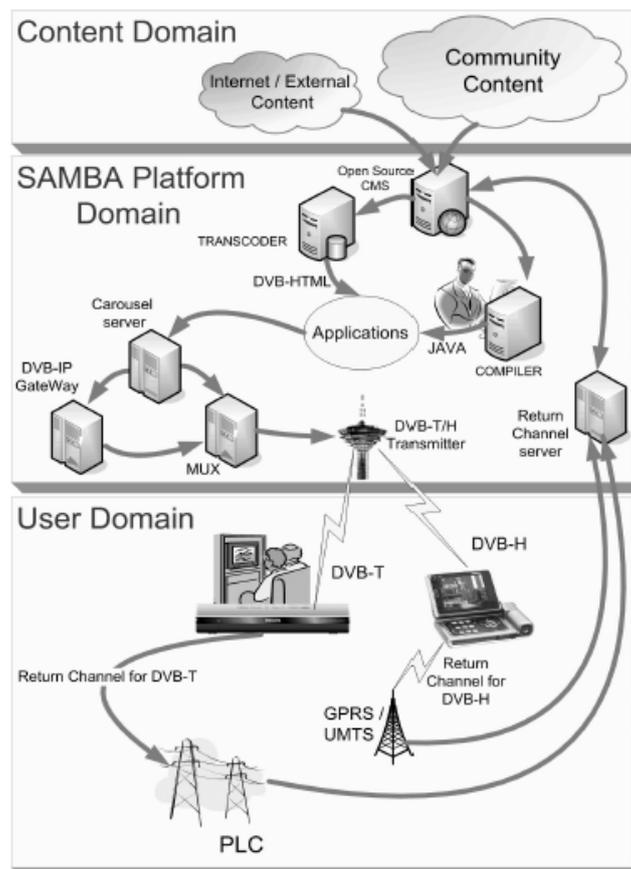


Figura 16 - Visión general del proyecto SAMBA

Una visión general del proyecto SAMBA puede revisarse en la Figura 16 (Mayora Ibarra, Gabos, Furtado, Cavaliere, Pascalicchio, & Filev Maia, 2007), mientras que la arquitectura del mismo se encuentra en la Figura 17 (Mayora Ibarra, Gabos, Furtado, Cavaliere, Pascalicchio, & Filev Maia, 2007), de las dos figuras se puede dilucidar que el proyecto es una propuesta integral sobre los contenidos, los medios y la inclusión social, además se aprecia que la propuesta incluye el uso como canal de retorno de las redes móviles celulares sobre GPRS/UMTS, sin embargo, el desarrollo del proyecto se enfocó en la red PLC, en este aspecto cabe resaltar que la documentación del proyecto deja abierta la posibilidad al uso de redes GPRS/UMTS, xDSL, WiMAX y satelital como opciones más “sofisticadas” para el canal de retorno (Mayora Ibarra, Gabos, Furtado, Cavaliere, Pascalicchio, & Filev Maia, 2007).

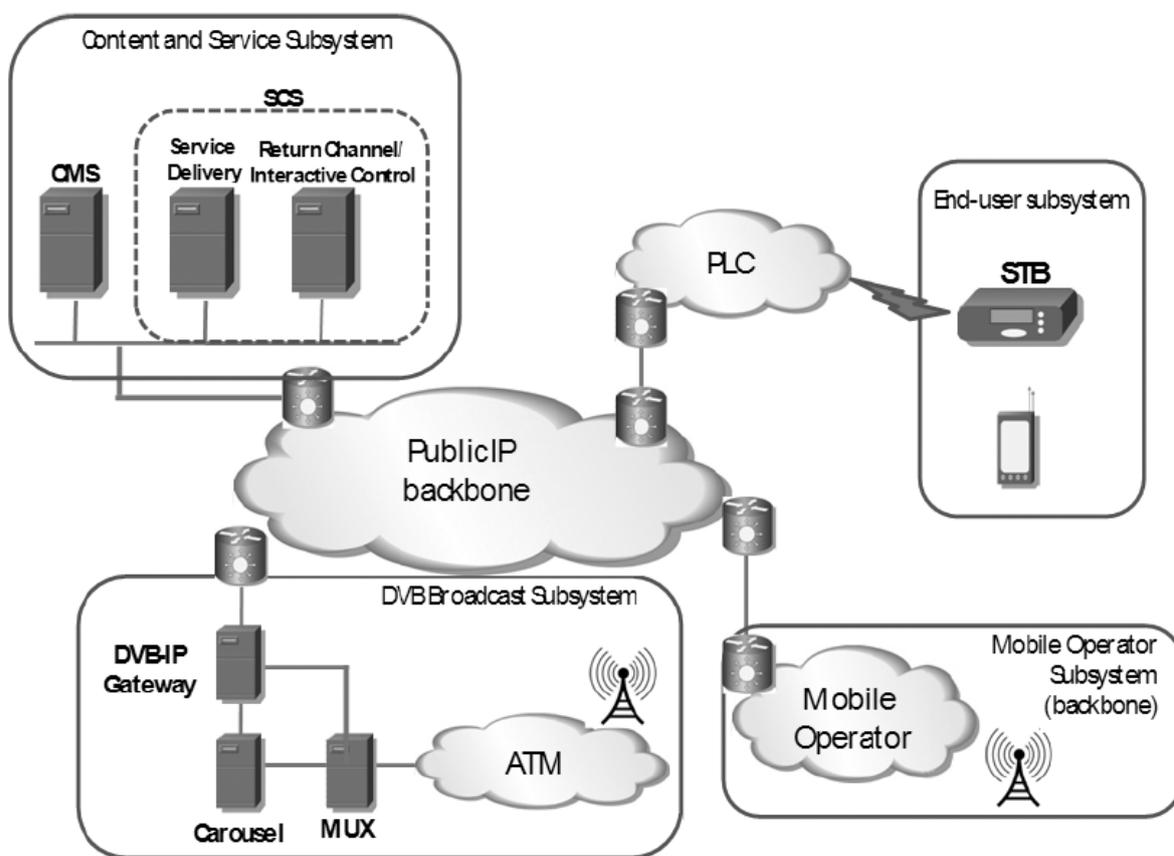


Figura 17 - Arquitectura del proyecto SAMBA

2.2.11.2 CARIMBÓ

CARIMBÓ (Return Channel with Interactivity Mechanism Management by a Continuous Signalization Process Oriented to QoS) (Coutinho, Lisboa Frances, & Costa, 2005) es un framework propuesto en Brasil para priorizar la interconectividad en la interacción basado en dos aspectos: los recursos de infraestructura del área en el cual se iba a instalar y los requerimientos y

necesidades del usuario. Propone utilizar diferentes tecnologías para el canal de retorno ajustándose en cada caso a la disponibilidad en área determinada y buscando siempre mantener un énfasis de inclusión social (Margalho, Teles, Ribeiro, Frances, & Weyl, 2006).

La arquitectura visión general del proyecto CARIMBÓ se puede observar en la Figura 18 (Margalho, Teles, Ribeiro, Frances, & Weyl, 2006), de la cual se puede puntualizar el uso de tecnologías PLC, Wireless, GPRS/EDGE y xDSL como propuestas de canal de retorno. El proyecto CARIMBÓ no se consolidó como un proyecto real, pero es una fuente interesante para la revisión de la implementación del canal de retorno y en especial la propuesta del uso de PLC como tecnología de acceso para lugares apartados.

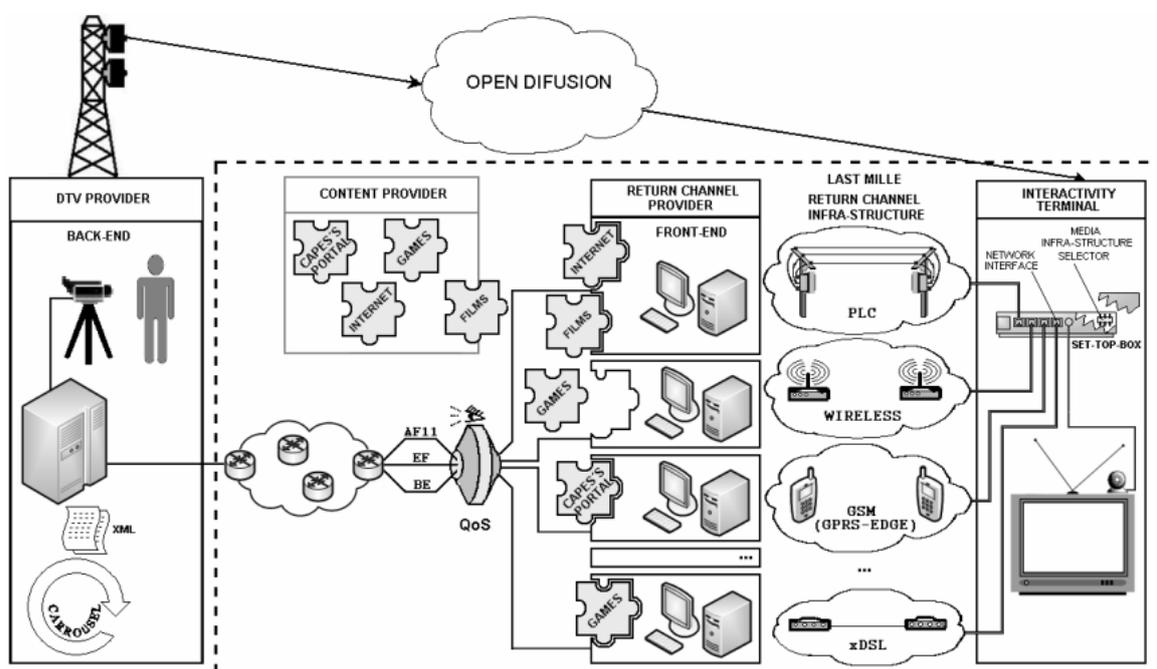


Figura 18 - Visión general del proyecto CARIMBÓ

2.2.11.3 SATMODE

SATMODE (SATellite MODEM) es un proyecto conjunto de la Agencia Espacial Europea (European Space Agency - ESA), SES ASTRA, Canal Satellite, Canal+ Technologies, NEWTEC, STMicroelectronics y Thomson, que desarrolló un canal de comunicación bidireccional de bajo costo por satélite para los usuarios de televisión satelital, entre los años 2003 y 2005.

Con este canal de comunicación se buscaba conectar a los usuarios de la televisión digital por satélite con: los proveedores de contenido, otros usuarios, otras infraestructuras de red, en tiempo real, en todo momento y en cualquier

lugar. Este producto llegó a pruebas comerciales pero no logró aceptación en el mercado, motivo por el cual la infraestructura desplegada se empleó para otras actividades.¹¹

La arquitectura del proyecto se ve representada en la Figura 19¹¹, donde se aprecia que el canal de retorno estaba planteado de forma satelital o un híbrido con otras tecnologías.

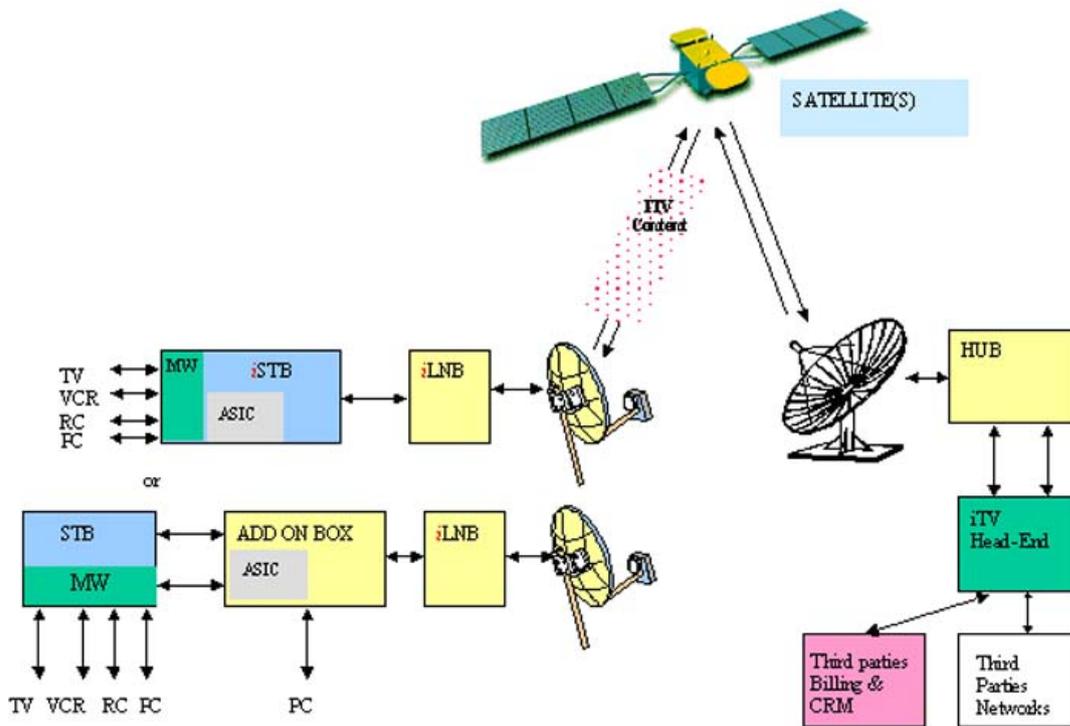


Figura 19 - Arquitectura del proyecto SATMODE

El proyecto SATMODE sirvió de base para la estandarización del DVB-RCS/S2 y algunos otros proyectos del espacio europeo.

2.2.11.4 DIGISAT

DIGISAT Advanced Digital Satellite Broadcasting and Interactive Services es un proyecto financiado dentro de la Unión Europea el cual tenía cuatro objetivos principales:

- demostrar las aplicaciones útiles sobre una arquitectura de distribución en antena colectiva (SMATV)

¹¹ Fuente web: <http://telecom.esa.int/telecom/www/object/index.cfm?fobjectid=11843>

- desarrollar la tecnología necesaria para el establecimiento de un canal de retorno vía satélite (con satélites existentes que operan en banda Ku) con el fin de proporcionar funciones interactivas a los usuarios SMATV
- llevar a cabo pruebas de campo con un grupo de usuarios que demuestra la etapa preoperativa de los servicios de DVB en Europa, especialmente los basados en sistemas SMATV
- contribuir a los organismos de normalización, principalmente en el campo deservicios interactivos, configuraciones e interfaces

La arquitectura propuesta por DIGISAT se muestra en la Figura 20¹², en ella se puede observar el canal bidireccional vía satélite y la infraestructura cableada y la compartida, propia de los sistemas SMATV.

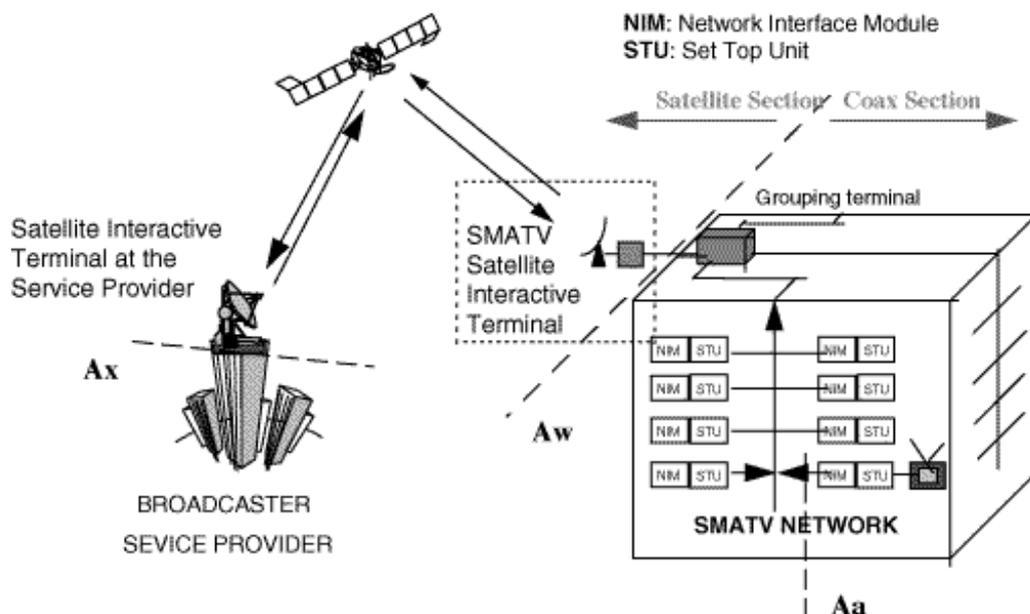


Figura 20 - Arquitectura del proyecto DIGISAT

2.2.11.5 PORTIVITY

PORTIVITY (PORTable InteractiVITY) es un proyecto financiado por la Unión Europea el cual integra la recepción móvil DVB-H con un canal de comunicaciones bidireccional mediante UMTS, el objetivo del proyecto PorTiVity es desarrollar y experimentar una plataforma de extremo a extremo que ofrece servicios de interactivos de televisión para dispositivos portátiles y móviles.

¹² Fuente Web: <http://cordis.europa.eu/infowin/acts/rus/projects/ac061.htm>

El proyecto se centro en el desarrollo en nivel de aplicación, incluyendo una herramienta de autor de apoyo a la posproducción de televisión que se encarga de anotar objetos dentro de un video y hace uso de la infraestructura DVB-H y UMTS en los dispositivos móviles. La arquitectura del proyecto se puede observar a continuación¹³:

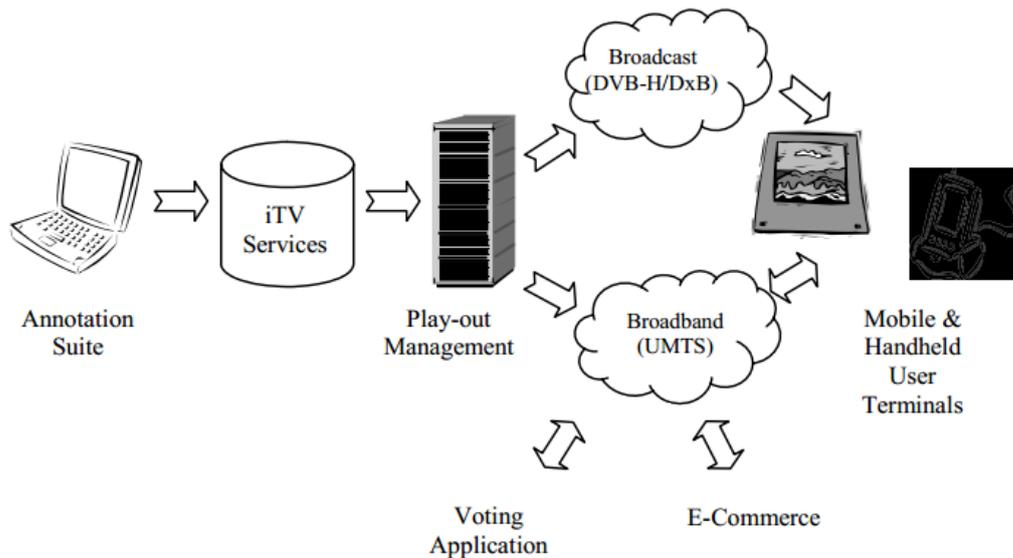


Figura 21 - Arquitectura del proyecto PORTIVITY

2.2.11.6 SUIT

SUIT¹⁴ (Scalable, Ultra-fast and Interoperable Interactive Television) es un proyecto patrocinado dentro del sexto programa marco (FP6), con una duración de 27 meses que inicio en febrero de 2006. El proyecto busca la convergencia entre DVB-T, DVB-H y WiMAX, como redes de difusión y aprovecha la tecnología WiMAX como canal de retorno.

La propuesta incluye mantener una fuente de video escalable que permita un despliegue multidispositivo mediante las tres redes de difusión simultáneamente. Además, propone que los equipos de usuario puedan hacer el cambio entre las diversas redes de difusión según lo requiera (por ejemplo para mejorar la calidad de la imagen) y que se aproveche la red WiMAX como medio para los servicios interactivos sobre televisión.

¹³ Referencia Web: ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/ist/docs/ka4/au_fp6_portivity_en.pdf

¹⁴ Pagina web: <http://suit.av.it.pt/>

2.2.11.7 Otros proyectos

Existen algunas otras propuestas para canal de retorno, este apartado entrega una lista de las propuestas y los proyectos más interesantes que por estar en estado temprano de investigación y por ser proyectos algo antiguos no se han detallado.

Existen dos proyectos de investigación en estado temprano que resultan de especial interés y que pueden lograr una implementación exitosa en el futuro, estas son:

- WiMAX perfil 700 (Meloni, 2008)
- DVB-UMTS(Cucej, 2008)

Finalmente, este listado incluye otros tres proyectos que pueden ser de interés:

- S3M - Digital Interactive Satellite Terminal for Master Antenna Systems in the Third Millennium
- INTERACT
- DIGISMATV

2.2.12 El estándar IEEE 802.22

Dado que la tecnología WRAN es la utilizada en este trabajo como tecnologías de acceso para el canal de retorno, en este apartado se profundiza un poco más sobre su funcionamiento.

Como ya se menciona, WRAN es uno de los estándares más recientes que ha lanzado el IEEE, oficialmente ha sido estandarizada en las norma: IEEE 802.22 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011) el año 2011 y hace parte de la familia de estándares 802 (Figura 22). Estaba basado en el uso de los espacios en blanco mediante radio cognitiva y está pensada para ser usada en zonas rurales o apartadas.

Los espacios en blanco son frecuencias no usadas en una ubicación geográfica determinada sin importar que estén asignadas o no a un servicio u operador específico, es una forma de optimizar el uso del espectro mediante una asignación dinámica de frecuencias. Para explotar el uso de los espacios en blanco WRAN emplea radio cognitiva, que en este caso censa el espectro radio eléctrico y determina que frecuencias puede utilizar para realizar la comunicación inalámbrica sin causar interferencias o sin deteriorar un servicio que sea tenga el uso licenciado de la frecuencia.

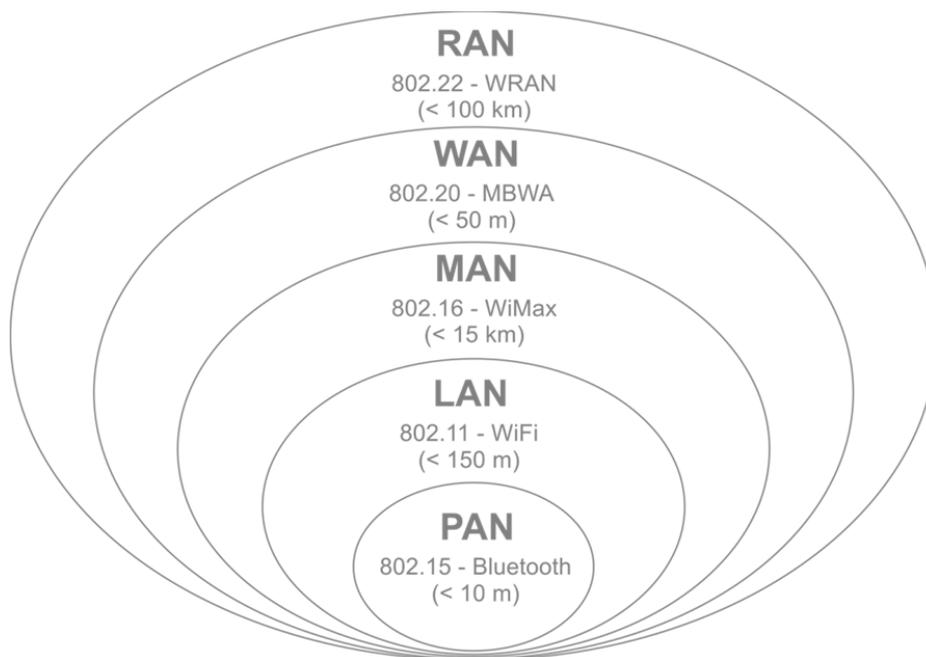


Figura 22 - Familia de estándares IEEE 802

El estándar WRAN define dos entidades: el equipo de usuario (Customer Premise Equipment - CPE) y las estaciones base (Base Station - BS). Además, está diseñado bajo una topología punto-multipunto, soporta movilidad de hasta 114 km/h sin hand-off y trabaja en la banda de 54 – 862 MHz con canalizaciones a 6, 7 y 8 MHz. En estados unidos las bandas habilitadas para 802.22 son: 54-60, 76-88, 174-216, 470-608 y 614-698 para un total de 282 MHz o 47 canales disponibles.

“Una estación base (BS) que cumpla la norma 802.22 deberán ser capaz de proporcionar servicio de internet de alta velocidad hasta a 512 equipos de usuario (fijo o portátil) o grupos de equipos dentro de su área de cobertura, asumiendo diferentes calidades de servicio (QoS), mientras sigue cumpliendo con los requisitos reglamentarios para la protección de los titulares de las frecuencias de trabajo” (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011).

Además, las celdas pueden alcanzar un radio de hasta 100 km para lo cual la estación base puede emplear antenas omnidireccionales o sectorizadas, mientras que el equipo de usuario emplea dos antenas diferentes: una antena direccional con 14 dB de ganancia para la transmisión y recepción y otra omnidireccional para el censado del canal. Por su parte, el umbral de recepción del equipo de usuarios es de -97 dBm, mientras que la potencia máxima a la que puede transmitir las estaciones base y los equipos de usuario en Estados unidos es de 4W EIRP (Effective Isotropic Radiated Power), en otros países este límite puede ser mayor.

La arquitectura de referencia (Figura 23, Figura 24, fuente:(Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011)) revela la existencia de tres planos diferentes: plano de datos, plano de gestión y control, y plano cognitivo.

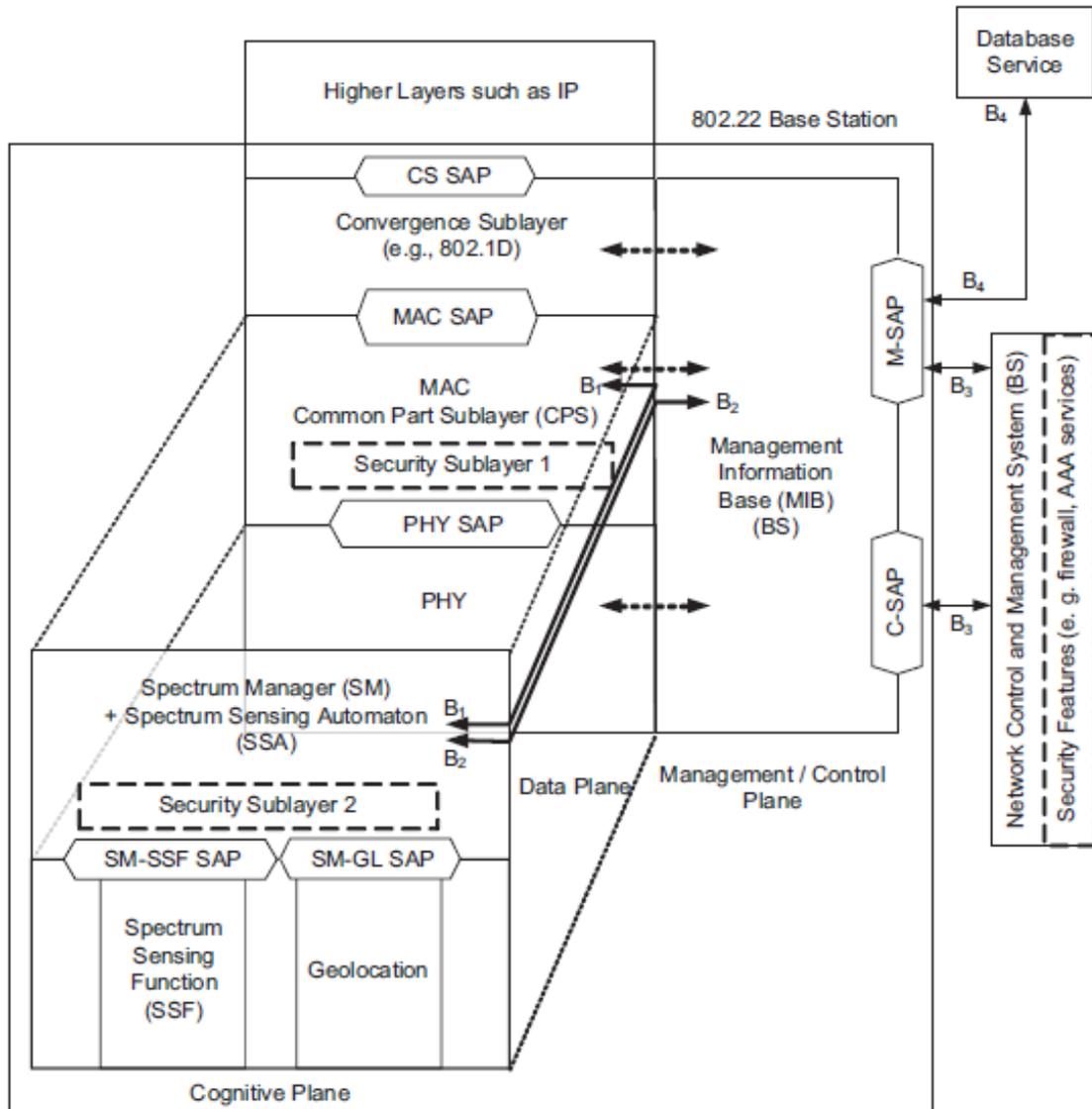


Figura 23- - Arquitectura de referencia de la estación base IEEE 802.22

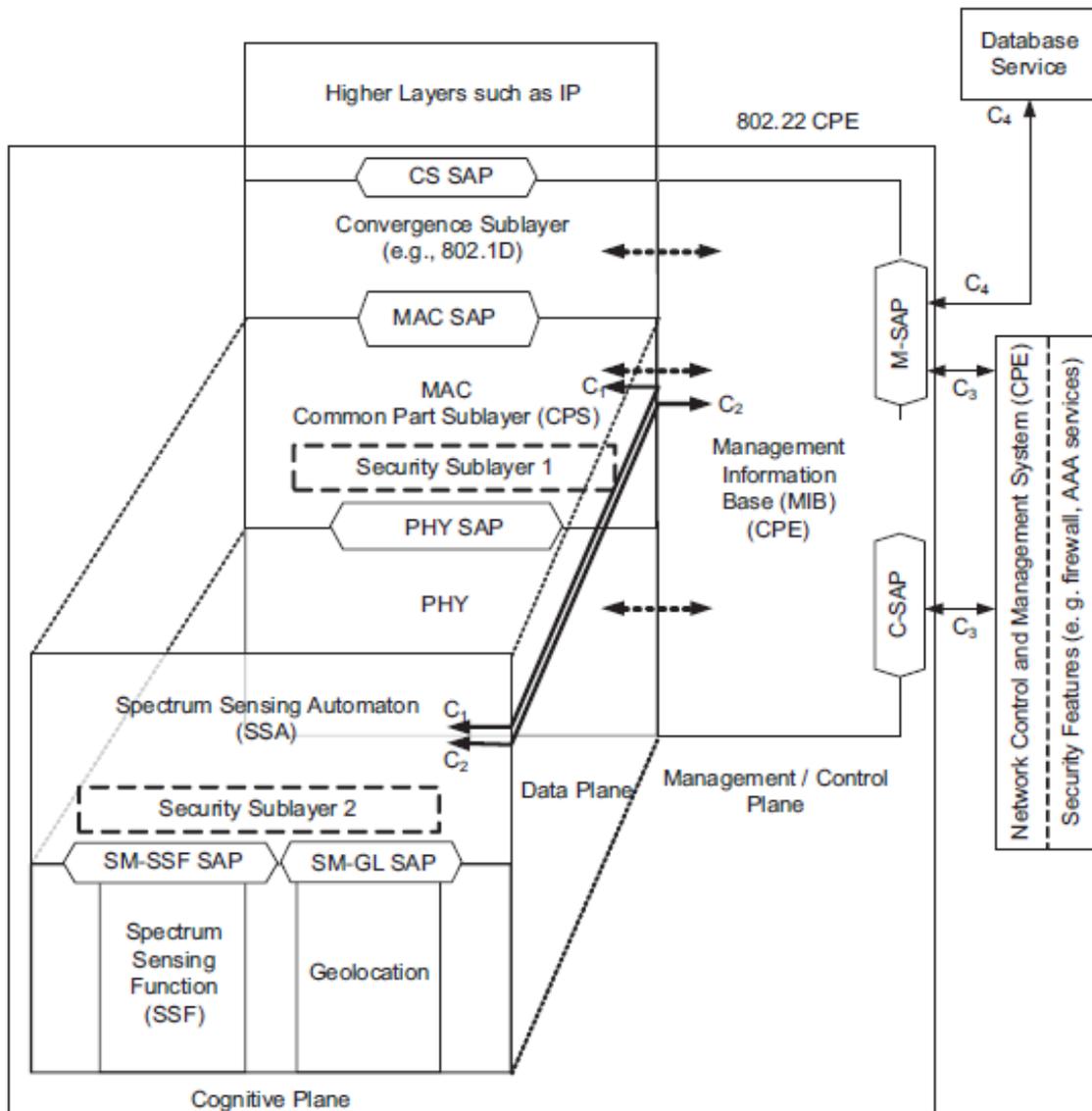


Figura 24 - Arquitectura de referencia del equipo de usuario IEEE 802.22

El plano de datos se compone de la capa física (Physical Layer - PHY), la capa de control de acceso medio (Medium Access Control - MAC) y la subcapa de convergencia (Convergence sublayer - CS). Puntos de acceso al servicio (Service Access Points - SAP) se añaden entre estas capas para permitir la modularización del sistema en sus diferentes componentes. Un SAP está provisto de una interfaz bien definida o un conjunto primitivas para intercambiar información, en virtud de que estos componentes diferentes pueden comunicarse entre sí (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011).

Por su parte, el plano de gestión y control está compuesto por la base de información de gestión (Management Information Base MIB). Para interactuar con

ella se utiliza el protocolo SNMP (Simple Network Management Protocol) y algunas de sus primitivas se usan para gestionar las entidades de red (BS, CPE, switches, routers, etc.). Las primitivas pueden ser usadas sobre la MIB para la configuración del sistema, las estadísticas de monitoreo, las notificaciones, los eventos (triggers), CPE y gestión de sesiones, Radio Recursos de gestión (Radio Resources Management - MRR), la comunicación con el servicio de base de datos, detección de espectro y los reportes de geolocalización. Los datos MIB se pueden obtener ya sea de la red, pre-definido dentro del sistema u obtenidos de otro dispositivo (por ejemplo, BS) después de un intercambio de información usando SNMP a través del medio de comunicación (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011).

De la misma forma, el plano cognitivo está compuesto por la función de censado del espectro (Spectrum Sensing Function - SSF), la función de geolocalización (Geolocation -GL) y el administrador de espectro / autómata de censado de espectro (Spectrum Manager/Spectrum Sensing Automaton - SM/SSA). La SSF implementa los algoritmos de detección de espectro y el módulo de GL debe proporcionar la información para determinar la ubicación del dispositivo de IEEE 802.22 (BS o CPE) (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011).

Finalmente, en la Tabla 6 se listan las características principales de la tecnología IEEE 802.22.

	WRAN - IEEE 802.22
FEC	Convolucional, Turbo, LDPC
Transporte	OFDM/OFDMA
Modulación	QPSK, 16QAM, 64QAM
Canalización	6, 7, 8 MHz
Eficiencia espectral	0.5 – 5 bit/Hz
Banda de frecuencia	54 – 862 MHz
Máxima capacidad	22 Mbps

Tabla 6 - Características técnicas de IEEE 802.22

2.3 Aportes al estado del arte

El estándar 802.22 ha sido liberado hace menos de seis meses con lo que las pruebas de simulación aquí aportadas están dentro de las primeras a nivel mundial. En especial, al considerar que estas son aplicadas a entornos tropicales montañosos característicos de Colombia pero aplicables a buena parte del mundo.

Además, para lograr la simulación dentro de Omnet++ se extendió una de las librerías de código libre que se ofrecen sobre Omnet: Inet y en el momento se está buscando que haga parte de la versión pública de la misma, facilitando que otras personas puedan extenderla, usarla y mejorarla.

CAPÍTULO III – Herramientas

La evaluación de una tecnología de telecomunicación requiere de un proceso de ingeniería de varias etapas: análisis, conceptualización, definición tecnológica, viabilidad, diseño, simulación, prototipado, pruebas en entornos controlados, pruebas a mediana escala, pruebas a gran escala e implementación en productos. Como un ejemplo de las etapas que se pueden seguir.

Para determinar si una tecnología se adapta a un entorno es necesario realizar simulaciones computarizadas que permitan, con un bajo coste, establecer los parámetros adecuados y la viabilidad de una implementación en pruebas o real de la tecnología. Por lo tanto, dentro del proyecto se ha optado por realizar una simulación para una red IEEE 802.22 bajo unos escenarios de simulación.

La simulación se presenta en dos instancias: la primera, determina la cobertura sobre algunas poblaciones determinadas, y la segunda, establece el throughput que brinda la tecnología. Con estas dos instancias se busca obtener una guía sobre la viabilidad técnica de la implementación de una red WRAN sobre unas características poblacionales determinadas.

Para lograr hacer estas simulaciones se requiere de una o varias herramientas de software que permitan obtener valores para las dos instancias, escoger las herramientas no es un proceso trivial y puede tener un alto impacto en el tiempo empleado y en la calidad de los resultados, por tal motivo este capítulo describe los criterios tenidos en cuenta y las opciones que se valoraron al momento de escoger la herramienta.

3.1 Características deseables

Para determinar la herramienta adecuada se hace necesario definir unas características deseables para poner en marcha la implementación. En este caso son:

- Uso de parámetros geográficos del país
- Configuración de los parámetros del canal
- Configuración de los parámetros de propagación
- Configuración de los parámetros de los transmisores
- Configuración de los parámetros de los receptores
- Configuración de la capa MAC
- Configuración de la capa Física
- Configuración de la distribución de los receptores
- Implementación de los algoritmos de propagación adecuados
- Disponibilidad y acceso a la herramienta
- Familiaridad previa del implementador
- Aproximación conceptual con los conocimientos previos del implementador
- Usabilidad de la herramienta

3.2 Alternativas y escogencia

Existen muchas herramientas de simulación que se pueden emplear para lograr los objetivos trazados y obtener en mayor o menor medida las características deseables. Por lo tanto, no se realizó una comparación exhaustiva de todas las herramientas que existen en la actualidad. Además, se realizó un primer filtro basado en la disponibilidad y acceso a las herramientas de las cuales disfruta el autor, de forma que, se evaluaron herramientas libres o con licenciamiento de uso con fines educativos.

Por otra parte, algunas de las características deseables como la “aproximación conceptual con los conocimientos previos del implementador”, la “familiaridad previa del implementador” y la “usabilidad de la herramienta” fueron medidas de forma subjetiva. Esta anotación es relevante debido a que estas tres características se consideran de gran importancia, teniendo en cuenta que su impacto en el tiempo empleado y la calidad de la implementación es significativo.

Además, las características que no fueron medidas de forma subjetiva se consideraron como características dicotómicas de existencia (provee o no la característica). Esta actuación buscaba acotar de forma rápida la cantidad de herramientas y establecer las dos más adecuadas y realizar en estas ejemplos de implementación con lo cual definir la plataforma de simulación.

3.2.1 OMNET++

OMNET ++ (Objective Modular Network Testbed in C++) es un simulador de redes de eventos discretos, está construido sobre módulos orientados a objetos, en su mayoría escritos en lenguaje C++ y que se relacionan mediante el lenguaje NED (Network Description). Las principales aplicaciones de OMNET++ son:

- Modelado de tráfico
- Modelado de redes de telecomunicaciones
- Simulador de colas
- Modelado de protocolos
- Modelado de multiprocesadores
- Sistemas distribuidos

Un módulo en OMNET++ hace parte de una jerarquía, implementada bajo el concepto de herencia, la profundidad de esta jerarquía es ilimitada y puede estar relacionada con la estructura de una red real. Además, los módulos pueden estar compuestos por otros módulos, dando origen a dos tipos de módulos:

1. Modulo compuestos: son agrupaciones de dos o más módulos simples y/o compuestos

2. Módulos simples: son elementos activos, cuya funcionalidad suele programarse en C++ y son los que en última instancia realizan el procesamiento de los mensajes

Los módulos se comunican entre sí mediante el paso de mensajes, estos comúnmente representan tramas o paquetes de una red y pueden contener diferentes estructuras de datos. Los mensajes pueden ser enviados por conexiones predeterminadas, emplear puertas y conexiones o quedar autocontenidos en el módulo (usado generalmente para implementar temporizadores y eventos asíncronos).

“Las puertas son el método de conexión de cada módulo con el exterior, y son el punto por el que llegan los mensajes. Se pueden definir tantas puertas como se quiera, y son de dos tipos, de salida (output) o de entrada (input). A cada puerta le corresponde una conexión, en la que se enlaza la puerta de salida de un módulo con la de entrada de otro. Las conexiones pueden ser de módulo simple a simple, simple a compuesto, o compuesto a simple. Las conexiones establecidas entre módulos simples reciben el nombre de “rutas” y hay que destacar que los módulos compuestos actúan de forma transparente con respecto a los mensajes” (Núñez Clemente, 2006).

“Los módulos además pueden tener parámetros asignables desde el fichero de configuración de la ejecución denominado omnetpp.ini. Esta opción permite al usuario una gran flexibilidad a la hora de simular redes con diferentes parámetros y diferentes resultados. Se puede simular por ejemplo una red con diferentes grados de congestión, observando los resultados a la salida” (Núñez Clemente, 2006).

Como ya se menciona, los módulos son programados en C++ usando la librería de simulación de C++, sin embargo, existen algunas utilidades que permiten el uso de otros lenguajes de programación, como Java, para desarrollar la funcionalidad de los módulos. Por su parte, para describir la estructura de los módulos, incluyendo las puertas y las conexiones, se emplea el lenguaje NED, que es un lenguaje estructurado y fuertemente tipado. Además, para los archivos de configuración .ini se emplea un formato plano de texto con una estructura clave valor.

Para desarrollar en OMNET++ tan solo es necesario un compilador de C++ (como Dev C++, G++, Xcode o CodeWarrior C++), las librerías oficiales de OMNET y un editor de texto. Sin embargo, OMNET++ provee un entorno integrado de desarrollo (IDE) basado en Eclipse¹⁵. Este IDE permite la ejecución por lotes y mediante ejecuciones interactivas, además, provee las herramientas para el desarrollo de los módulos en C++ y de los descriptores en NED con validación sintáctica. También incorporan un compositor gráfico para NED, herramientas de visualización en tiempo de simulación y un editor para observar los archivos

¹⁵ Sitio web: <http://eclipse.org/>

resultados de las simulaciones. En la Figura 25 se puede apreciar una captura del IDE de OMNET++.

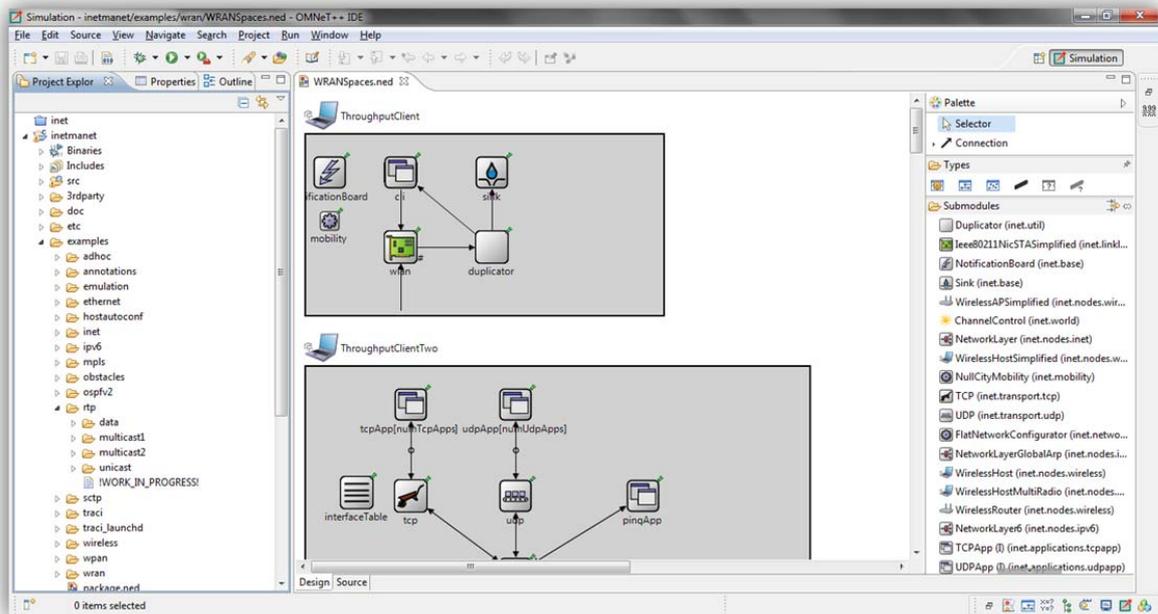


Figura 25 - Entorno Integrado de Desarrollo OMNET++

Finalmente, OMNET++ permite la simulación distribuida y paralela. Además, OMNET ++ es gratuito para uso académico y dispone de una versión de pago bajo el nombre de OMNEST

3.2.2 NS-2

NS-2 (Network Simulator Version 2) es un simulador de eventos discretos orientado a redes, escrito en C++ con programación orientada a objetos, el cual es comúnmente empleado simular:

- Redes alámbricas, inalámbricas y satelitales
- Un amplio número de protocolos de red
- Fuentes de tráfico (telnet, web, Constans Bit Rate, Variable Bit Rate)
- Elementos de red

Uno de los aspectos más importantes de NS-2 es la manera como fue diseñada su arquitectura interna la cual está formada por una amplia estructura de clases C++ que brindan una gran potencia a la aplicación. Estas clases son de código abierto y permiten la extensión y la modificación.

La estructura interna de NS-2 está formada por dos lenguajes de programación: OTcl, lenguaje interpretado para los scripts de simulación y C++, que es un

lenguaje compilado para la programación de la funcionalidad de los elementos de red. Otcl se usa para generar el escenario de simulación y todos los aspectos de la misma como: nodos, parámetros de los enlaces, ubicación de los nodos, protocolos, modelos de tráfico, tiempos de ejecución y demás aspectos relevantes de la infraestructura de la red.

Al compilar las clases C++, estas pasan a estar disponibles para el interprete OTcl mediante un mecanismo de vinculación de objetos conducido como linkage, de esta forma OTcl puede ejecutar las funciones descritas en C++. El uso de C++ permite una ejecución eficiente mientras que OTcl aumenta la flexibilidad y la rapidez de despliegue.

Al ejecutar una simulación los resultados se guardan en archivos de registro en formato “.tr”, de forma que cada paquete enviado durante la simulación genera una línea en el archivo de registro donde se describen todos los parámetros del paquete como: tamaño, tiempo de inicio, tipo, tiempo de vida, nodo de partida, y nodo de llegada. Dentro de los archivos de registro se pueden guardar datos específicos de cada nodo o de toda la red al mismo tiempo, además es posible generar un archivo de registro especial, con formato “.nam”, que se usa para visualizar, de forma básica, el funcionamiento de la red que se ha simulado mediante la función NAM (Network AniMator).

Para utilizar NS-2 se requiere de un compilador de C++, las librerías de NS y un editor de texto, sin embargo, NS-2 provee una herramienta para trabajar gráficamente con los archivos OTcl y una ventana de visualización para las simulaciones mediante NAM.

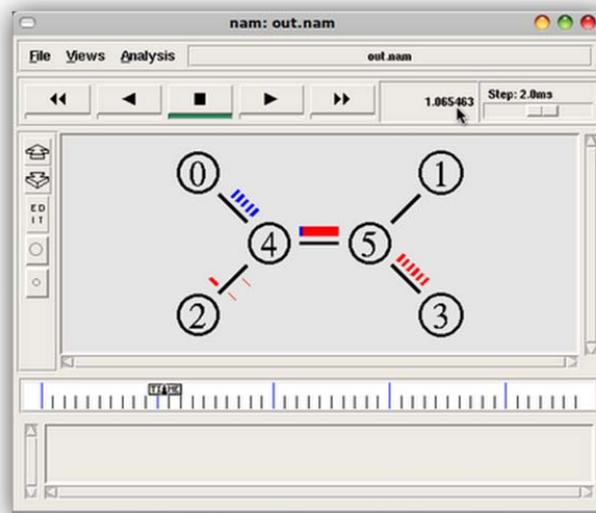


Figura 26 - Visualizador grafico de archivos NAM en NS-2

NS-2 es gratuito y de código abierto, lo que lo convierte en una excelente opción para labores investigativas, es sin duda la herramienta de simulación de mayor uso a nivel mundial, sin embargo, las herramientas de apoyo al desarrollo son bastante limitadas, el consumo de procesamiento y memoria es bastante alto y no escala en núcleo, procesadores ni máquinas teniendo así un muy pobre aprovechamiento de paralelismo.

3.2.3 GloMoSim

GloMoSim (Global Mobile System Communication Library) es una plataforma de simulación de eventos discretos paralela, está escrito en los lenguajes de programación C y Parsec. Se compone de una colección de librerías de módulos, cada una de las cuales simula un pila de protocolos de comunicación específica. Se usa comúnmente para:

- Simular redes con movilidad
- Simulación de redes Ad-hoc
- Simulación de redes de sensores
- Cálculos de propagación de la señal
- Simulación de redes alámbricas e inalámbricas
- Pruebas de protocolos

El canal está manejado por una entidad principal, llamada GLOMO, que posee una matriz donde todas las interfaces de los nodos están conectadas. Así se crea un canal compartido al que se le puede aplicar un modelo de propagación y de pérdidas de trayectoria.

Para desarrollar en esta herramienta se necesita un compilador Parsec, un compilador C, un editor de texto y las librerías GloMoSim. Algo importante es que se debe tener conocimiento del lenguaje Parsec.

GloMoSim es de código abierto con licenciamiento gratuito para uso educativo e investigativo. Escala en núcleos con un excelente comportamiento en procesamiento paralelo, disminuyendo los tiempos de procesamiento, aunque se ha limitado artificialmente en favor de la versión comercial Qualnet.

3.2.4 OPNET

OPNET es una herramienta completa (Figura 27) para la ejecución de simulaciones de eventos discretos. Está fuertemente integrada a su entorno de desarrollo permitiendo de forma gráfica configurar gran parte de las funcionalidades de la simulación. Además, es de código abierto y se puede obtener una versión de uso académico. Suele ser empleada para:

- Simulación de flujos de datos

- Mensajes de flujo de control
- Caída de enlaces
- Simulación de redes alámbricas e inalámbricas
- Simulación de colas
- Simulación de protocolos
- Cálculos de propagación de la señal

OPNET permite mediante librerías la simulación de nodos con diversas características y la comunicación de los mismos con diferentes tipos de enlaces, proveyendo un lenguaje de simulación orientado a las comunicaciones, y dando la posibilidad de obtener de cada simulación el rendimiento extremo a extremo y mediciones de calidad de servicio.

Para utilizar OPNET, se debe tener en cuenta que éste cuenta con una jerarquía que define la manera de establecer el modelo de simulación, por lo tanto, de no tenerse en cuenta en el diseño, la simulación no funcionaría. La jerarquía incluye tres niveles: El primer nivel está formado por el modelo de red, donde se define la estructura de la red y la definición de las subredes. El segundo nivel el modelo de nodos donde se define la estructura interna de cada uno de los componentes (nodos) de las redes. Finalmente el nivel de procesos constituido por los estados que definen la función de cada nodo. Este último es la base del sistema y permite programar las funciones de cada nodo en lenguaje C++.

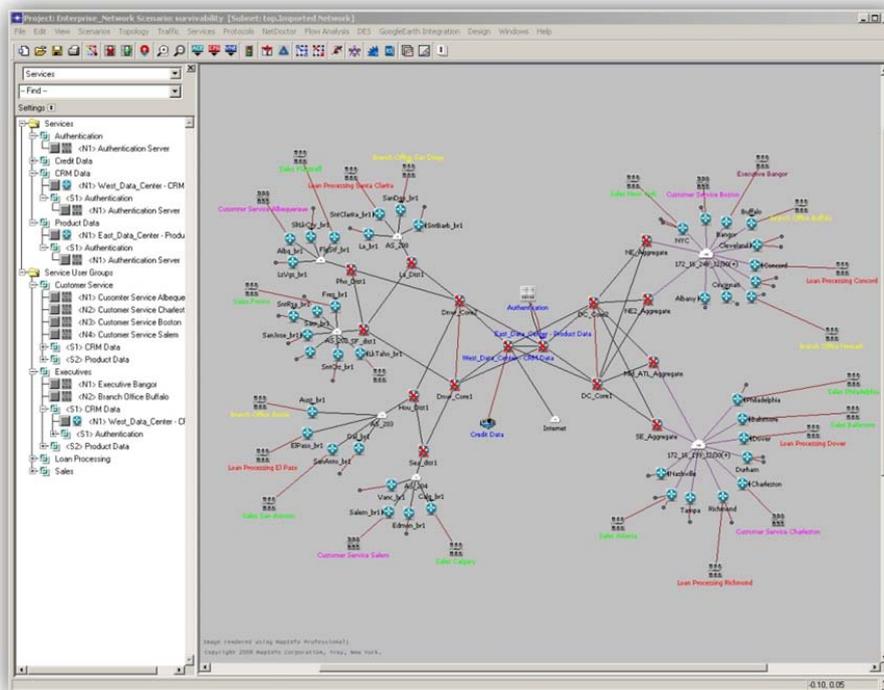


Figura 27 - Entorno Integrado de Desarrollo OPNET

3.2.5 NCTuns

NCTuns es simulador de redes de alta fidelidad, capaz de simular varios protocolos usados en redes cableadas e inalámbricas. Su núcleo está basado en una nueva metodología de entrada inventada por el profesor S. Y. Wang en su tesis doctoral en la universidad de Harvard. Puede ser usado también como emulador, dado que usa directamente la pila de protocolos TCP/IP implementada en Linux/Unix para generar resultados bastante veraces. Además, puede simular los protocolos característicos de las redes inalámbricas y los modelos de propagación de la señal en entornos inalámbricos.

Esta herramienta provee la capacidad de que las aplicaciones reales puedan intercambiar paquetes a través de una red simulada por medio de NCTuns sin necesidad de modificaciones, re-compilaciones ó procesos de interconexión adicional. Además permite que los resultados puedan ser repetibles porque el organizador de procesos de UNIX en el kernel ha sido modificado para controlar de manera precisa el orden de ejecución de la máquina de simulación NTCTuns.

NCTuns está fuertemente integrada con un entorno de desarrollo (Figura 28) que permite la creación de las redes, los nodos y las funcionalidades de forma grafica, además permite hacer la configura de las simulaciones desde el mismo entorno. Si se desea extender las funcionalidades de los nodos se pueden programar nuevos comportamientos en lenguaje C++. La herramienta se encuentra disponible para ser usada de forma gratuita con fines educativos.

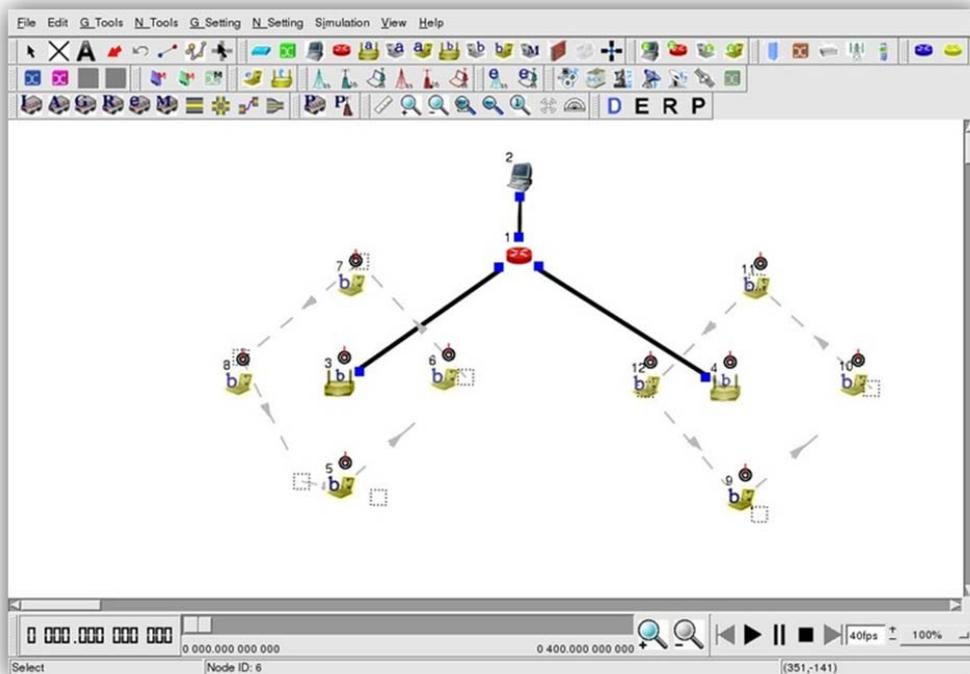


Figura 28 - Entorno Integrado de Desarrollo NCTuns

3.2.6 Radio mobile

Radio mobile es una aplicación de acceso gratuita para la simulación de redes inalámbricas que permite obtener valores de cobertura basadas en el modelo Longley-Rice. Es poco potente comparada con versiones comerciales que realizan labores similares como: ICS Telecom, CelPlanner o Atoll, sin embargo, es una herramienta sencilla que brinda resultados aceptables en el entorno que se está evaluando y que permite el uso automático de mapas gratuitos como el DEM GTOPO30/SRTM30 y SRTM DTED.

Esta herramienta es un planificador gráfico (Figura 29) orientado a comandos y no permite la extensión de las funcionalidades, pero provee la posibilidad de importar y exportar resultados en algunos formatos usados por otras herramientas de análisis. Radio Mobile es sin duda una herramienta muy básica y al mismo tiempo es útil en ciertos casos específicos. Las características de esta herramienta incluyen:

- Permite trabajar con frecuencias de entre 20 MHz y 20 GHz
- Hace uso del modelo de propagación Longley-Rice
- Permite el acceso a una amplia base de datos de mapas de elevación que se pueden combinar con fotografías por satélite
- Se puede tener acceso a precisión de mapas de elevación de 30, 100 o 1000 metros, dependiendo de la fuente de datos escogida
- Posibilita la simulación de diferentes tipos de redes
- Es altamente configurable mediante parámetros como: sensibilidad, patrones de antenas, potencias, etc.,
- Permite plantear diferentes escenarios y topologías de red

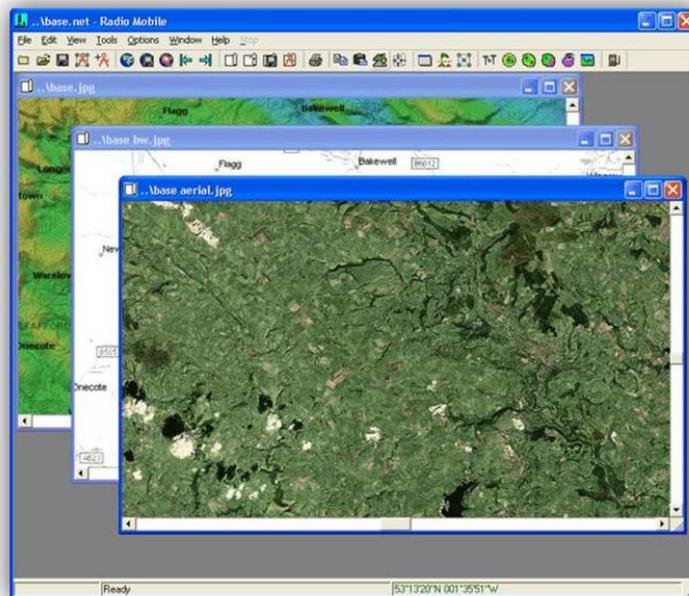


Figura 29 - Entorno de Radio Mobile

3.3 Comparativa según características deseables

Para tomar una decisión sobre la herramienta o herramientas a utilizar primero se evalúan que características deseables son configurables dentro de cada una de las herramientas, teniendo presente que la posibilidad de configurar estas características puede asegurar el futuro éxito de la implementación. En la Tabla 7 se marca con una “X” el caos en el que dentro de la herramienta se puede configurar la característica.

Características de config	Omnet++	NS-2	GloMoSim	OPNET	NCTuns	Radio mobile
Geodata						X
Canal	X	X	X	X	X	X
Propagación	X		X	X		
Transmisores	X	X	X	X	X	X
Receptores	X	X	X	X	X	X
Capa MAC	X	X	X	X	X	
Capa física	X	X	X	X	X	X
Distribución	X	X		X	X	

Tabla 7 - Características de configuración de las herramientas

Observando la evidencia que no hay ninguna herramienta que cumpla al 100% con las características deseables de configuración por lo que se precisa el uso de dos herramientas diferentes para lograr unos resultados completos. Siendo Radio Mobile una de ellas al ser la única que permite la configuración de diferentes capas de datos geográficos empleadas en los cálculos de cobertura y su visualización.

A continuación (Tabla 8), se establecen algunos criterios subjetivos sobre el uso de las herramientas por parte del autor considerando este factor como definitivo al momento de realizar las simulaciones dentro del tiempo de desarrollo estipulado.

Características de preferencia	Omnet++	NS-2	GoMoSim	OPNET	NCTuns	Radio mobile
Disponibilidad	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Familiaridad	90%	0%	0%	90%	50%	100%
Usabilidad	100%	50%	60%	100%	80%	100%
Aproximación ¹⁶	100%	60%	60%	60%	60%	100%

Tabla 8 - Características de preferencia de las herramientas

De la tabla anterior se aprecia la preferencia del implementador por las herramientas Omnet++ y OPNET, diferenciándose a favor de Omnet++ debido al uso de IDE basado en eclipse cuya estructura y manejo ha sido profundizado anteriormente por el implementador.

¹⁶ Hace referencia a la cercanía conceptual con los conocimientos previos del implementador

De esta forma las dos herramientas escogidas son Radio Mobile y Omnet++. En Radio Mobile se plantea la carga dinámica de datos geográficos, la ubicación de las estaciones base en relación a los sitios sobre los que se quiere brindar el servicio, la ubicación de los usuarios, las configuraciones de los equipos transmisores y receptores y la configuración del modelo Logley-Rice que es adecuado para el rango de frecuencia empleado, la resolución de los datos geográficos y los parámetros tecnológicos. Por su parte en Omnet++ se realizará la simulación bajo eventos discretos que describan el comportamiento en términos de tráfico de datos sobre una red representativa.

CAPÍTULO IV – El canal de comunicación

El canal de comunicación es esencial en el análisis tecnológico de las tecnologías inalámbricas. Para lograr un entendimiento cabal sobre el tema se requiere una indagación profunda que excede el objetivo de este capítulo, por lo tanto el capítulo se ha centrado en los modelos de propagación que son los empleados para obtener cálculos de cobertura y que están ampliamente difundidos en herramientas de planificación inalámbrica como Radio Mobile.

4.1 Modelos de propagación

Los modelos de propagación son aproximaciones matemáticas que buscan describir de forma aproximada la forma como una señal se propagara en un entorno determinado. Se define como el conjunto de expresiones matemáticas que se utilizan para predecir la pérdida de una señal inalámbrica o señal RF (siglas de radio frecuencia) en la trayectoria de un recorrido entre una estación base emisor y un cliente receptor fijo o móvil. Las pérdidas de la señal se expresan en decibeles (Camargo Olivares & Hornillo Mellado, 2011).

Al emplear los modelos de propagación se busca predecir la forma como se comportara el canal para determinar la viabilidad técnica y las especificaciones de configuración de un proyecto; de tal manera, que sirva como base para definir si un sitio puede ser implementado, bajo qué condiciones y con cuáles equipos.

4.1.1 Clasificación de los modelos de propagación

Existen muchos modelos de propagación y diversas formas de clasificarlos, algunas de estas son: diferenciar los modelos según se pueda aplicar en macrocélulas o en microcélulas, distinguir modelos outdoor e indoor, diversificar si son bidimensionales o tridimensionales, o definir si son empíricos, semiempíricos, deterministas o semideterministas; una aproximación similar a la planteada en el último caso es la que se evaluara en esta sección.

Así, los modelos de propagación generalmente se clasifican en los siguientes tipos: empíricos o estadísticos, teóricos o deterministas y en una combinación de estos dos llamados semiempíricos (Ishak, 2006). La Figura 30 explica gráficamente la clasificación de los modelos de propagación bajo esta aproximación.

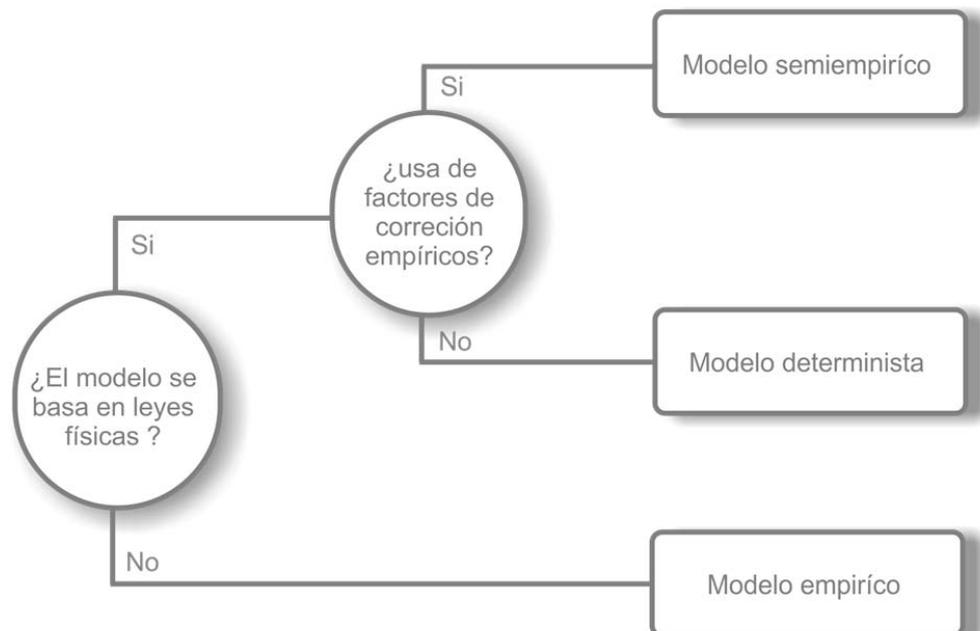


Figura 30 - Clasificación de los modelos de propagación

4.1.1.1 Modelos empíricos

Estos modelos se basan en la extrapolación estadística de mediciones previamente realizadas en laboratorio, modelos a escala o terreno, bajo condiciones medianamente controladas. Cuentan como ventaja la rapidez de cálculo computacional y la integración implícita de factores de propagación dependientes del entorno. Su precisión depende de la similitud del entorno analizado con el que se realizaron las medidas. Modelos representativos de esta categoría son: Okumura, Okumura-Hata y Cost 231.

4.1.1.2 Modelos deterministas

Predicen el comportamiento de la señal basándose en principios físicos fundamentales, como por ejemplo el comportamiento de las ondas electromagnéticas. El uso de estos modelos maneja algoritmos complejos computacionalmente y requiere de datos geográficos precisos para tener una buena aproximación al canal real. Modelos representativos de este tipo son: dos rayos y espacio libre.

4.1.1.3 Modelos semiempíricos

Están basados sobre principios físicos pero se aplican factores de corrección empíricos que adaptan el modelo a situaciones específicas. Buscan obtener resultados realistas como los que pueden arrojar los modelos deterministas pero con un costo computacional inferior y con una mayor libertad en la precisión de los

datos geográficos. Modelos de esta categoría son: Walfisch-Ikegami, Walfisch-Bertoni y Longley Rice.

4.1.2 Modelo de propagación en espacio libre (Modelo de Friis)

El modelo de propagación en espacio libre (Free Space Path Loss Model - FSPL) es empleado cuando existe línea (Line Of Sight - LOS) de vista entre transmisor y receptor, como en los radioenlaces de microondas y los enlaces satelitales. Se fundamenta en un decaimiento de la potencia recibida en función de la distancia de separación entre el transmisor y el receptor.

La propagación en espacio libre depende de la distancia entre receptor y transmisor. El cálculo se hace mediante la Ecuación 1 (Amarasinghe, Thelisinghe, Warnakulasuriya, & Samarasingue, 2009):

$$P_L(dB) = 32.44 + 20 \log (d) + 20 \log (f)$$

Ecuación 1 - Modelo de propagación en espacio libre

Donde:

$P_L(dB)$: pérdidas de propagación en dB

f : frecuencia en MHz

d : distancia entre transmisor y receptor en km

4.1.3 Modelo de propagación de dos rayos (reflexión terrestre)

Este modelo se basa en óptica geométrica y considera la transmisión directa y una componente de propagación reflejada en la tierra entre el transmisor y el receptor. Es especialmente útil en escenarios con grandes distancias y terreno llano, teniendo presente en los cálculos que la altura mínima del transmisor es de 50 metros. En la Figura 31 puede observarse el esquema fundamental del modelo de dos rayos y en Ecuación 2 se puede conocer la formulación matemática.

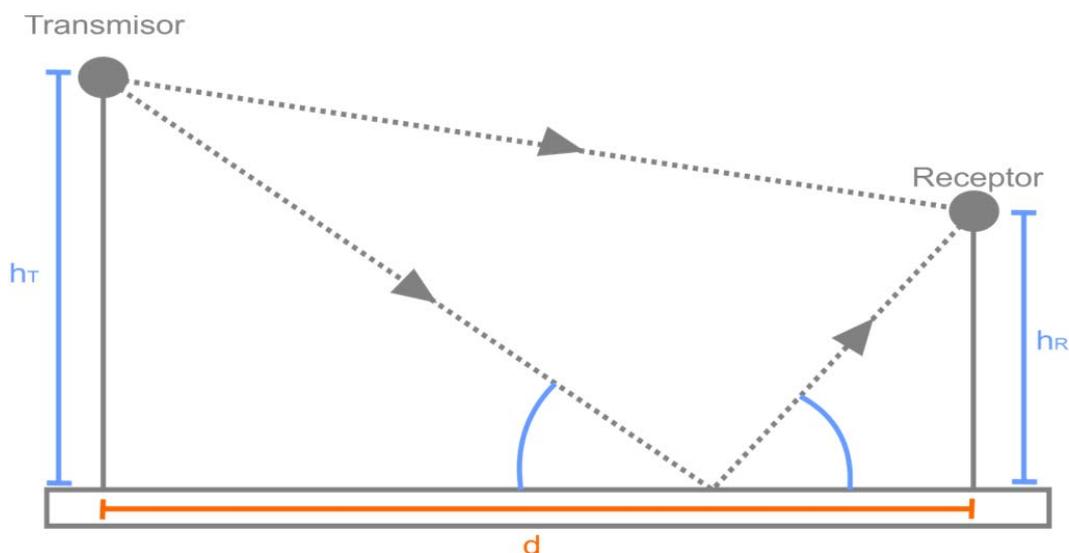


Figura 31 - Esquema de modelo de dos rayos

$$P_L(dB) = 40 \log(d) - (10 \log(G_T) + 10 \log(G_R) + 20 \log(h_T) + 20 \log(h_R))$$

Ecuación 2- Modelo de propagación de dos rayos

Donde:

- $P_L(dB)$: pérdidas de propagación en dB
- G_T : Ganancia de la antena transmisora en dB
- G_R : Ganancia de la antena receptora en dB
- h_T : Altura de la antena transmisora en metros
- h_R : Altura de la antena receptora en metros

4.1.4 Modelo de propagación Okumura

Es la base para varios de los modelos más ampliamente utilizados para predicciones de propagación en áreas urbanas. Se puede usar en el rango de frecuencias que va desde los 150 MHz hasta los 1.920 MHz (bandas VHF y UHF), aunque también se ha logrado extrapolar a frecuencias por encima de los 3 GHz, los transmisores pueden estar en una altura de entre 30 y 1000 metros y las distancias entre transmisor y receptor se encuentran entre 1 y 100 km.

Okumura describió un conjunto de curvas que grafican la atenuación relativa al espacio libre para una zona urbana sobre terreno llano. Los valores fueron obtenidos con extensas mediciones usando antenas verticales y omnidireccionales en receptor y transmisor. Estas curvas se pueden apreciar en la Figura 32¹⁷.

¹⁷ Fuente: Material del curso de Comunicaciones Móviles. Universidad Politécnica de Valencia

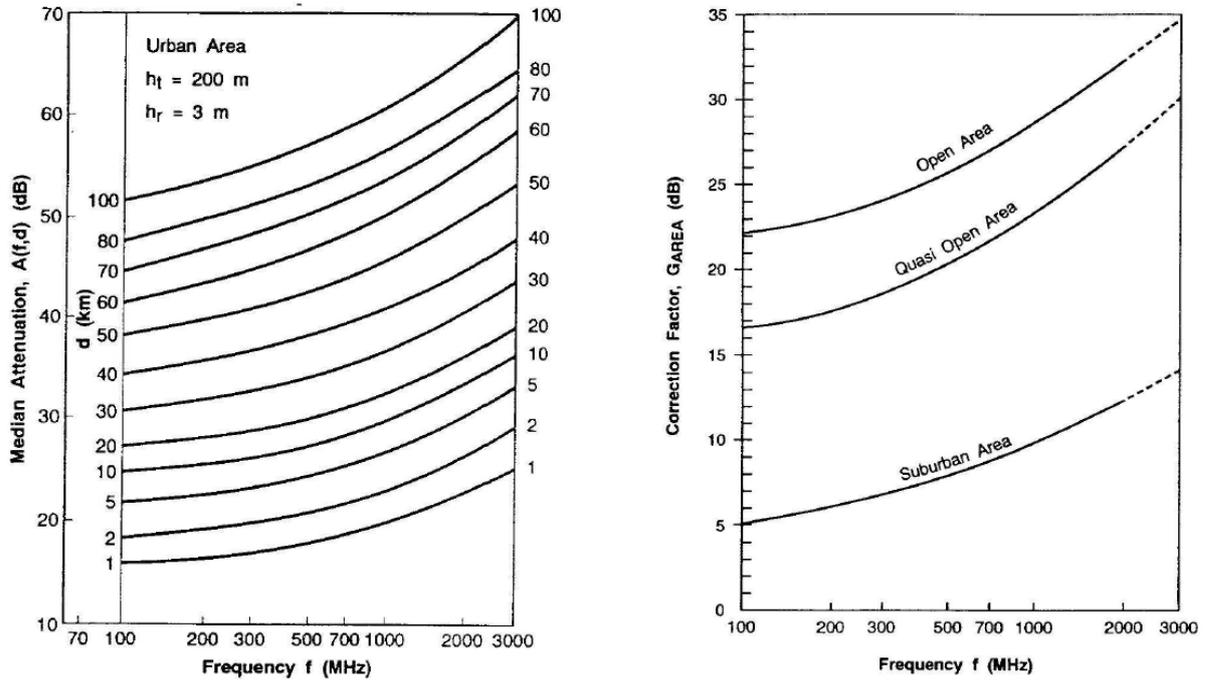


Figura 32 - Curvas del modelo Okumura

La formulación del modelo Okumura viene dada por:

$$P_L(dB) = L_F + A_{mu} - G(h_T) - G(h_R) - G_{area}$$

Ecuación 3 - Modelo de propagación Okumura

Donde:

$P_L(dB)$: pérdidas de propagación en dB

L_F : Atenuación por espacio libre

A_{mu} : Atenuación relativa promedio

$G(h_T)$: Ganancia de la altura de la antena transmisora

$G(h_R)$: Ganancia de la altura de la antena receptora

G_{area} : Ganancia debido al tipo de ambiente

Okumura encontró que $G(h_T)$ tiene una variación de pérdidas de 20dB/década y que $G(h_R)$ tiene una variación de 10 dB/década para alturas menores de 3m, siendo:

$$G(h_R) = 10 \log\left(\frac{h_T}{3}\right) \text{ para } h_T < 3 \text{ m}$$

$$G(h_R) = 20 \log\left(\frac{h_T}{3}\right) \text{ para } 3 \text{ m} < h_T < 10 \text{ m}$$

$$G(h_R) = 20 \log\left(\frac{h_T}{200}\right) \text{ para } 30 \text{ m} < h_T < 100 \text{ m}$$

El modelo Okumura y sus ampliaciones (Okumura-Hata y Cost 231) son modelos simples y adecuados para sistemas móviles celulares y sistemas de radio terrestre en ambientes poblados, obteniendo errores con una desviación estándar del orden de los 10 a 14 dB.

4.1.5 Modelo de propagación Okumura-Hata

Es una formulación empírica sobre las curvas presentadas por Okumura, siendo válido en el rango de frecuencias de los 150 MHz a los 1.500 MHz (bandas VHF y UHF) con altura de transmisor entre 30 y 200 metros y altura de receptor entre 1 y 10 metros.

$$P_L(dB) = 69.55 + 26.16 \log(f) - 13.82 \log(h_T) - a(h_R) + (44.9 - 6.55 \log(h_T)) \log(d)$$

Ecuación 4 - Modelo de propagación Okumura-Hata

Donde:

$P_L(dB)$: pérdidas de propagación en dB

f : Frecuencia de la portadora en MHz

h_T : Altura de la antena transmisora en metros

h_R : Altura de la antena receptora en metros

d : Distancia entre el transmisor y el receptor en kilómetros

$a(h_R)$: es el factor de corrección por la altura efectiva del receptor

La variable que difiere de la formulación de Okumura es el factor de corrección por altura efectiva del receptor $a(h_R)$ que es función del tipo de área de servicio. Este puede tomar diferentes valores dependiendo del entorno que se esté evaluando, estos puede ser:

- Para ciudades pequeñas y medianas: $a(h_R) = (1.1 \log(f) - 0.7)h_R - (1.56 \log(f) - 0.8)$
- Para ciudades grandes con $f < 300 \text{ MHz}$: $a(h_R) = 8.29 (\log(1.54 h_R))^2 - 1.1$
- Para ciudades grandes con $f > 300 \text{ MHz}$: $a(h_R) = 3.2 (\log(11.75 h_R))^2 - 4.97$

Para ambientes suburbano y rural se utilizan formulas diferentes que incluyen la Ecuación 4 teniendo el factor de corrección por altura efectiva del receptor como si fuera una ciudad pequeña o mediana, en estos casos la expresión es:

- Para zonas suburbanas: $P_{L2}(dB) = P_L(dB) - 2 \left(\log\left(\frac{f}{28}\right) \right)^2 - 5.4$
- Para zonas rurales: $P_{L3}(dB) = P_L(dB) - 4.78 (\log(f))^2 + 18.33 \log(f) - 40.94$

4.1.6 Modelo de propagación Cost 231

Es una extensión del modelo Okumura-Hata realizada por la Cooperativa Europea para investigación científica y técnica (EURO-COST), el cual aumenta el rango de frecuencias hasta los 2 GHz y considera pérdidas por dispersión. La Ecuación 5 define el modelo Cost 231.

$$P_L(dB) = 46.3 + 33.9 \log(f) - 13.82 \log(h_T) - a(h_R) + (44.9 - 6.55 \log(h_T)) \log(d) + C_M$$

Ecuación 5 - Modelo de propagación Cost 231

Donde:

$P_L(dB)$: pérdidas de propagación en dB

f : Frecuencia de la portadora en MHz

h_T : Altura de la antena transmisora en metros

h_R : Altura de la antena receptora en metros

d : Distancia entre el transmisor y el receptor en kilómetros

$a(h_R)$: es el factor de corrección por la altura efectiva del receptor que sigue las mismas expresiones que el modelo original de Okumura-Hata

C_M : es un factor de corrección para adecuar el modelo extendiendo el rango de frecuencias y tiene un valor de 0 dB para ciudades pequeñas, medianas y áreas suburbanas y 3 dB para ciudades grandes

4.1.7 Modelo de propagación Walfisch-Bertoni

Este modelo(Walfisch & Bertoni, 1988)considera los efectos físicos que producen en la señal las edificaciones, concretamente las alturas y los techos, para determinar el nivel de señal a la altura del suelo. Está pensado para usarse en núcleos formados por edificios de gran altura, que están dispuestos en filas casi paralelas, en el cual los edificios están separados por un ancho menor al de los propios edificios y en donde el transmisor se encuentra por encima de los edificios.

$$f+38\log d-18\log H+A-18\log(1-\frac{d}{217H})$$

Ecuación 6.

$$P_L(dB) = 89.55 + 21 \log(f) + 38 \log(d) - 18 \log H + A - 18 \log \left(1 - \frac{d^2}{17 H}\right)$$

Ecuación 6 - Modelo de propagación Walfisch-Bertoni

Donde:

P_L (dB): pérdidas de propagación en dB

f : Frecuencia de la portadora en MHz

d : Distancia entre el transmisor y el receptor en kilómetros

H : Altura promedio de la antena con respecto a la altura de los edificios

A : Factor de influencia de los edificios en la señal

El factor A puede describirse como:

$$A = 5 \log \left[\left(\frac{b}{2} \right)^2 + (h_b - h_r)^2 \right] - 9 \log(b) + 20 \log \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{2(h_b - h_r)}{b} \right] \right\}$$

Donde:

b : es el espacio entre edificios en metros

h_b : es la altura del edificio en metros

h_r : es la altura del receptor en metros

En la Figura 33 se puede apreciar el esquema del modelo Wlafisch-Bertoni

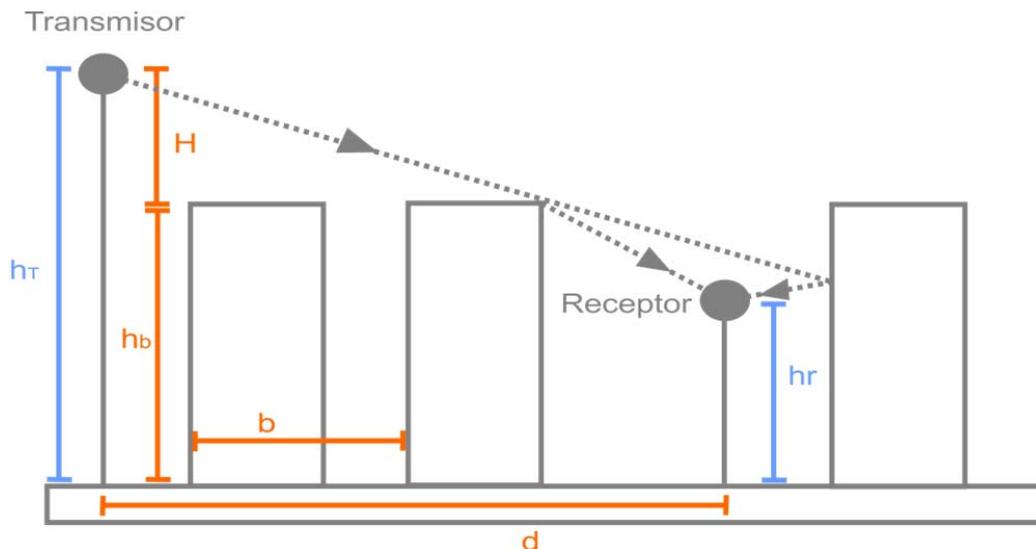


Figura 33 - Esquema del modelo Walfisch-Bertoni

4.1.8 Modelo de propagación Walfisch-Ikegami

Es un modelo mucho más complejo que tiene en cuenta parámetros como la densidad de edificios en ambientes urbanos, altura promedio de los edificios, sentido de la calle con respecto a la trayectoria directa entre transmisor y receptor. Es comúnmente utilizado para cálculos de sistemas microcelulares y puede ser usado en bandas UHF y SHF. Este modelo tiene una variación comúnmente utilizada que es las Cost 231 Walfushch-Ikegami (Commission of the European Communities and COST Telecommunications, 1999).

Este modelo combina el modelo de Walfisch-Bertoni con el modelo de Ikegami (Ikegami, Takeuchi, & Yoshida, 1991) para considerar la difracción descendente hasta el nivel de las calles y permite adicionar parámetros del ambiente urbano como son (Figura 34): alturas de edificios (h_b), separación de los edificios (b) y ancho de las calles (W).

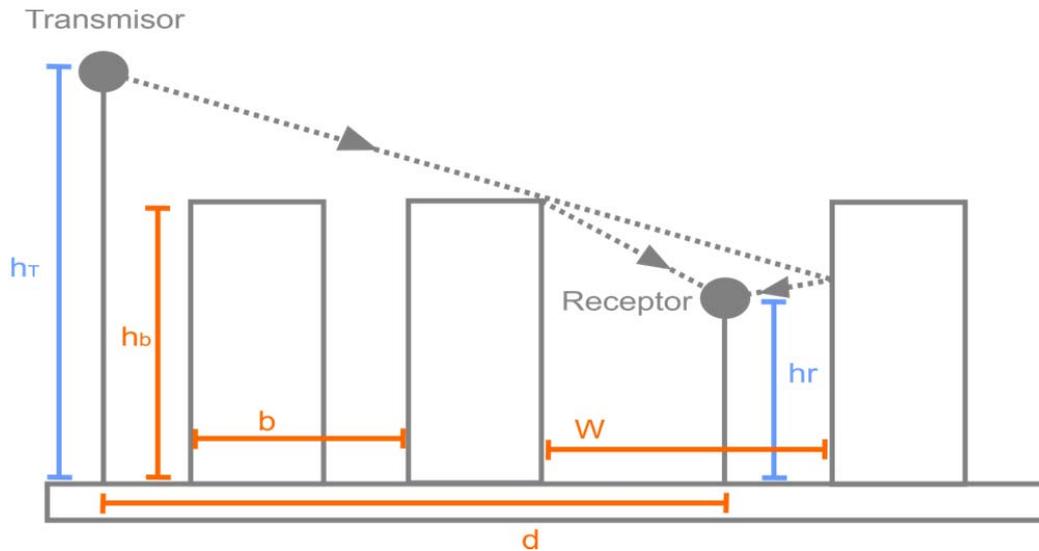


Figura 34- Esquema del modelo Walfisch-Ikegami

El modelo puede describirse por la Ecuación 7

$$P_L(dB) = 42.6 + 26 \log(d) + 20 \log(f) \text{ con línea de vista (LOS)}$$

$$P_{L2}(dB) = L_0 + L_{rts} + L_{msd} \text{ sin línea de vista (NLOS)}$$

Ecuación 7- Modelo de propagación Walfisch-Ikegami

Donde:

$P_L(dB)$: pérdidas de propagación en dB

f : Frecuencia de la portadora en MHz

d : Distancia entre el transmisor y el receptor en kilómetros

L_0 : pérdidas por espacio libre

L_{rts} : pérdidas por refracción en múltiples filos de cuchillo antes del tejado final

L_{msd} : pérdidas debido a una única difracción final cuando la onda se propaga hacia la calle

Las pérdidas en espacio libre, L_0 , están dadas por:

$$L_0(dB) = 32.4 + 20 \log(d) + 20 \log(f)$$

El valor de L_{rts} se basa en el modelo de Ikegami junto con el ancho de las calles y la orientación de estas con respecto a las antenas transmisoras. Sin embargo, el

Cost 231 aplica otra función de orientación para las vías diferente a la de Ikegami, dando como resultado:

$$L_{rts} = -16.9 - 10 \log(W) + 10 \log(f) + 20 \log(\Delta h_R) + L_{ori}$$

Donde:

W : es el ancho de las calles en metros

$\Delta h_R = h_b - h_r$, en metros donde h_b es la altura de los edificios y h_r la altura del receptor

L_{ori} : término dependiente del ángulo de la orientación de las calles en la señal directa entre transmisor y receptor, este término viene dado por:

$$L_{ori} = -10 + 0.354 \phi, \text{ para } 0^\circ < \phi < 34^\circ$$

$$L_{ori} = 2.5 + 0.075 (\phi - 35), \text{ para } 35^\circ < \phi < 54^\circ$$

$$L_{ori} = 4 - 0.114 (\phi - 55), \text{ para } 55^\circ < \phi < 90^\circ$$

Por otra parte las pérdidas del término L_{msd} son calculadas como:

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log(d) + k_f \log(f) + 9 \log(b)$$

Donde:

f : Frecuencia de la portadora en MHz

d : Distancia entre el transmisor y el receptor en kilómetros

b : Distancia entre edificios en metros

Mientras el resto de parámetros se describen matemáticamente a continuación:

$$L_{bsh} = -18 \log(1 + \Delta h_T), \text{ para } h_T > h_b$$

$$L_{bsh} = -18 \log(1 - \Delta h_T), \text{ para } h_T \leq h_b$$

$$k_a = 54, \text{ para } h_T > h_b$$

$$k_a = 54 - 0.8 \Delta h_T, \text{ para } h_T \leq h_b \text{ y } d \geq 0.5 \text{ km}$$

$$k_a = 54 - 0.8 \Delta h_T (d/0.5), \text{ para } h_T \leq h_b \text{ y } d < 0.5 \text{ km}$$

$$k_d = 18, \text{ para } h_T > h_b$$

$$k_d = 18 - 15 (\Delta h_T / h_b), \text{ para } h_T \leq h_b$$

$$k_f = 0.7 \left[\left(\frac{f}{925} \right) - 1 \right], \text{ para ciudades medianas y centros suburbanos con mediana densidad de arboles}$$

$$k_f = 1.5 \left[\left(\frac{f}{925} \right) - 1 \right], \text{ para centros metropolitanos}$$

$$\Delta h_T = h_T - h_b$$

El término k_a representa el incremento de pérdidas en la trayectoria debido a una antena de radio base ubicada a una altura menor a la de los techos de los edificios adyacentes. Los términos k_d y k_f controlan la dependencia de las pérdidas por difracción debidas a múltiples filos de cuchillo contra la distancia y la frecuencia de radio, respectivamente (Treviño Cortés, 2003).

4.1.9 Modelo de propagación Longley-Rice

Este modelo utiliza información sobre la geometría del terreno entre el transmisor y el receptor, junto con las características refractivas de la troposfera. Es especialmente útil en frecuencias entre los 20 MHz y los 20 GHz (bandas VHF y UHF) sobre diferentes tipos de terrenos en distancias de entre 1 y 2.000 km.

Para determinar la potencia de la señal en el caso de línea de vista (LOS) utiliza principalmente el modelo de dos rayos, mientras que las pérdidas por difracción en obstáculos aislados son estimadas utilizando el modelo de "filo de cuchillo" (Knife Edge) de Fresnel-Kirchoff. Además, también analiza los fenómenos de dispersión troposférica para las distancias largas, mientras que las pérdidas por difracción en campo lejano a distancias del doble del horizonte son calculadas mediante el método de Van de Pol-Bremmer modificado. El método Longley-Rice trabaja en dos modos: con información de perfil de terreno (predicción punto a punto) o sin ella (predicción área).

El modelo Longley-Rice utiliza los siguientes parámetros:

- d : Distancia entre el transmisor y el receptor en kilómetros
- h_T : Altura de la antena transmisora en metros
- h_R : Altura de la antena receptora en metros
- k : Número de onda
- Δh : Parámetro de irregularidad del terreno
- N_S : Mínima refractividad superficial mensual media
- γ_e : Curvatura efectiva de la tierra
- Z_g : Transimpedancia de la superficie del suelo
- Clima radio: expresado cuantitativamente como uno de los climas tipificados

CAPÍTULO V – Escenarios de simulación

La simulación es una técnica que permite tener una idea aproximada de la forma como se comportará una red, además posibilita realizar diferentes configuraciones y compararlas de forma segura y con un coste bajo. Para establecer el comportamiento de una red IEEE 802.22 WRAN empleada como canal de retorno en DVB-T, aplicada al caso colombiano y teniendo en cuenta que el propósito es la disminución de la brecha digital del país, se ha planteado hacer una simulación de la red que tenga en cuenta los siguientes aspectos:

5.1 Diseño de la red

5.1.1 Zona de estudio

Colombia es un país emplazado en la zona noroccidente del continente sudamericano (coordenadas 4°00'00.0"N, 72°00'00.00"O) (Figura 35¹⁸) que cuenta con una área geográfica de 1'141.748 km² de los cuales el 8.8% es territorio marítimo y en el cual habitan cerca de 46'581.823 de colombianos.



Figura 35 – Ubicación de Colombia en el mundo

¹⁸ Fuente Web: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:COL_orthographic.svg?uselang=es

El territorio colombiano limita con Ecuador, Perú, Brasil, Venezuela, Panamá y los océanos Atlántico y Pacífico (Figura 35); y es atravesado por la Cordillera de los Andes, que en el país se bifurca en la Cordillera Oriental, la Cordillera Central y la Cordillera Occidental (Figura 36¹⁹).



Figura 36 - Mapa de relieve de Colombia

¹⁹ Fuente Web: http://es.wikipedia.org/wiki/Geograf%C3%ADa_de_Colombia

En su distribución política el país cuenta con 1.122 municipios agrupados en 33 departamentos (Figura 37²⁰). Siendo Bogotá la capital del país.

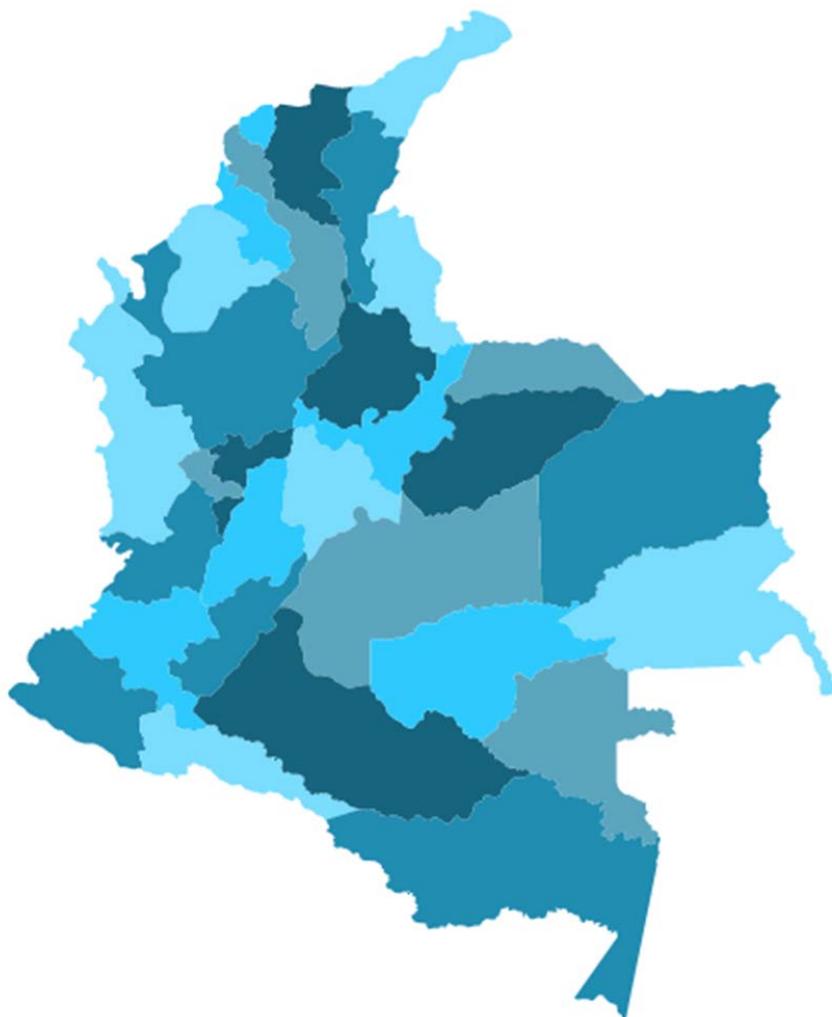


Figura 37 – Distribución política de Colombia

Según un análisis realizado a partir del informe de “estimaciones de población 1985-2005 y proyecciones de población 2005-2020 nacional, departamental y municipal por sexo, grupos quinquenales de edad” (DANE, 2010) al menos el 97% de los municipios en Colombia tienen menos de 230.000 ciudadanos, siendo 4 municipios los únicos con más de 1'000.000 de habitantes, 23 municipios entre 1'000.000 y 230.000 habitantes y 1.092 municipios con menos de 230.000 habitantes.

²⁰ Fuente Web: <http://www.uxgeek.co/recursos/mapa-politico-de-colombia-en-vectores.html>

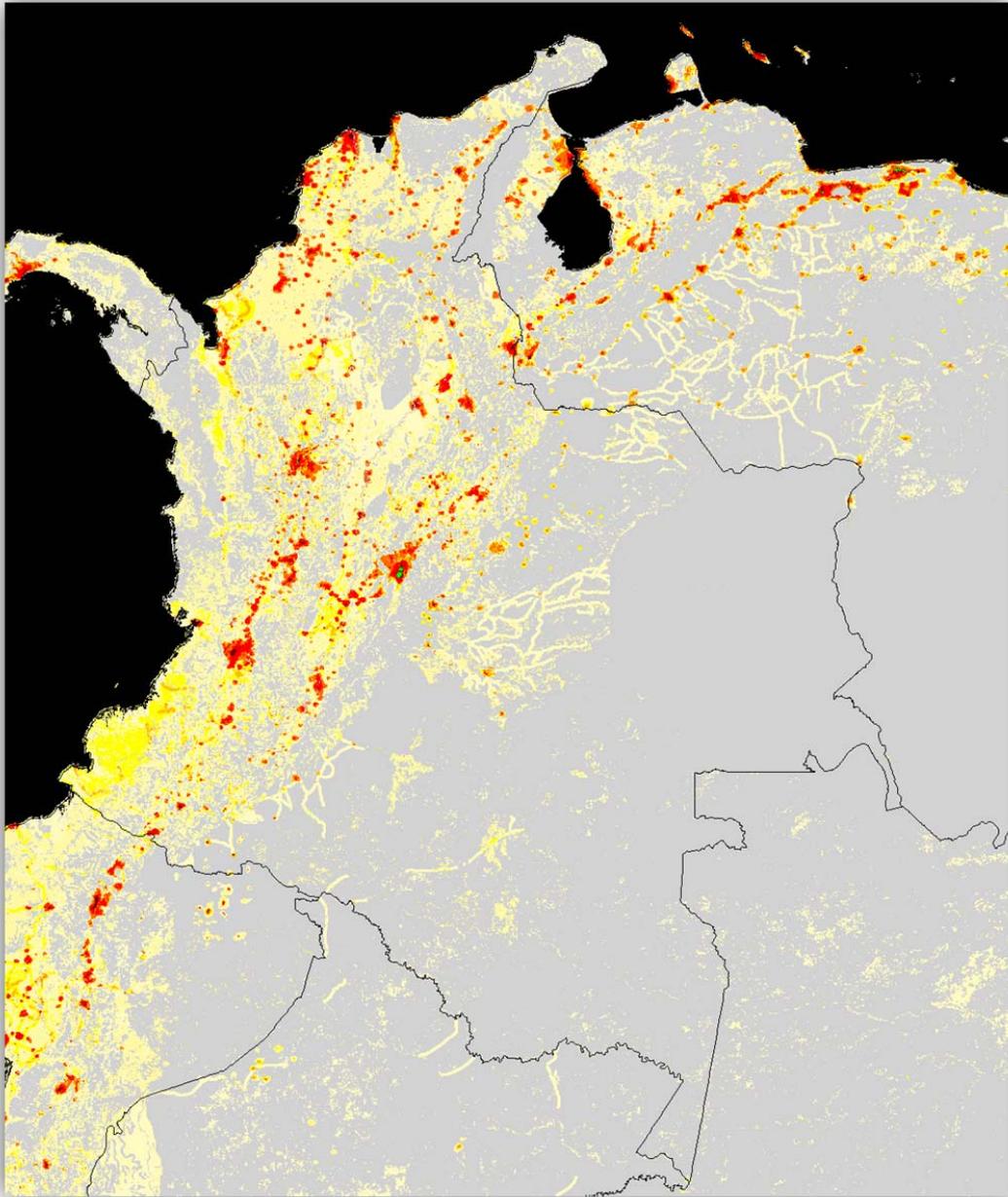


Figura 38 - Distribución poblacional de Colombia

La distribución poblacional (Figura 38²¹) indica que al menos el 25% (exactamente el 26,3172%) de la población colombiana vive en tres municipios (Bogotá, Medellín y Cali) y que el 50% de los colombianos viven en 28 municipios (que incluyen los tres primeros). Finalmente, según el censo general realizado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) realizado en 2005 (DANE, 2005) el 75% de los colombianos vive en las cabeceras municipales y el 25% en la zona

²¹ Fuente Web: http://es.wikipedia.org/wiki/Demograf%C3%ADa_de_Colombia

rural, además, el tamaño de una familia colombiana promedio es de 3.9 integrantes siendo el promedio de las cabeceras de 3.8 y el del resto 4.2.

5.1.2 Zonas de cobertura

Teniendo en cuenta los datos poblacionales y su distribución presentado en el apartado anterior, y bajo el propósito de disminuir la brecha digital, se seleccionó un grupo de 10 municipios del territorio colombiano, estos cumplían con el criterio de ser los primeros (en un orden descendente según población) diez municipios con menos de 100.000 habitantes.

Se considera que estos diez municipios logran ser representativos del conjunto de municipios a los cuales el uso de WRAN, como canal de retorno para televisión digital, es una opción viable y útil. Considerando que estos municipios no son cabecera, de forma que las alternativas de conexión por otro medio son pocas, y que tienen la suficiente cantidad de familias como para garantizar un uso intensivo de la red.

Los municipios seleccionados y datos importantes de los mismos se resumen en la Tabla 9 y su ubicación en el territorio colombiano se aprecia en la Figura 39.

Departamento	Municipio	Población	Familias	Latitud	Longitud
Norte De Santander	Ocaña	95.958	22.847	8°14'00,30"	73°20'59,86"
Atlántico	Sabanalarga	94.837	22.580	10°38'02,12"	74°55'08,01"
Córdoba	Tierralta	92.948	22.130	8°10'31,42"	76°03'48,87"
La Guajira	Manaure	92.232	21.960	11°46'39,41"	72°27'04,16"
Cesar	Aguachica	89.935	21.413	8°18'42,14"	73°37'03,77"
Cauca	Santander de Quilichao	89.267	21.254	3°01'00,22"	76°28'59,98"
Córdoba	Cereté	89.245	21.249	8°53'00,25"	75°48'00,05"
Córdoba	Sahagún	89.204	21.239	8°56'35,78"	75°25'52,06"
Arauca	Arauca	84.716	20.170	7°10'7,97"	70°45'4,48"
Norte De Santander	Villa del Rosario	82.450	19.631	7°49'52,64"	72°28'26,93"

Tabla 9 - Municipios seleccionados para la simulación



Figura 39 - Ubicación de los municipios escogidos

5.1.3 Ubicación de estaciones base

Las estaciones base se ubicaran en los sitios altos más cercanos a los municipios a los que se quiere brindar cobertura, el listado de los emplazamientos de las estaciones base con su respectiva ubicación se pueden observar en la Tabla 10.

Municipio	Transmisor		
	Localidad	Latitud	Longitud

Ocaña	Jurisdicciones	7°50'48.20"	73°13'32.20"
Sabanalarga	La Popa	10°25'13.50"	75°31'32.20"
Tierralta	Acandí	8°30'27.70"	76° 3'55.00"
Manaure	Manaure	11°46'39.41"	72°27'43.16"
Aguachica	Jurisdicciones	73°13'32.20"	73°13'32.20"
Santander de Quilichao	Munchique	2°31'1.90"	76°57'22.30"
Cereté	Acandí	8°30'27.70"	76° 3'55.00"
Sahagún	La Pita	9°38'13.40"	75°12'16.40"
Arauca	Arauca	7°10'7.97"	70°45'4.48"
Villa del Rosario	Cerro Tasajero	7°59'30.90"	72°27'43.20"

Tabla 10 - Localización de las estaciones base

5.1.4 Antenas sectoriales

Para lograr una mayor capacidad de la red y un uso más eficiente del espectro se plantea el uso de sectorización a 120° con antenas directivas. En los cálculos únicamente se emplearán las antenas que dan servicio a los municipios seleccionados y estarán direccionadas hacia el centro de los mismos.

5.1.5 Bandas de frecuencia

La tecnología IEEE 802.22 está diseñada para trabajar conjuntamente en el rango de frecuencias de la televisión digital. Esto lo logra, aprovechando los espacios en blanco que quedan en la red de difusión de televisión y teniendo algunos canales dedicados dentro del rango. Desde la concepción del estándar WRAN se ha determinado el uso de las frecuencias que van desde los 54 MHz hasta los 862 MHz, sin embargo en la actualidad se está negociando poder extender la banda desde los 48 MHz hasta los 916 MHz.

5.1.6 Ubicación de estaciones subscriptoras

Los requerimientos técnicos de 802.22 exige que las estaciones subscriptoras o equipos cliente estén en área de hasta 100 km de la estación base. Además, cada estación subscriptora requiere que las estaciones subscriptoras tengan dos antenas, una omnidireccional para la detección cognitiva del espectro y la otra direccional para comunicación con la estación base.

En este caso, las estaciones subscriptoras estarán dispersas dentro de los municipios seleccionados. Estas tendrán una distribución normal uniforme que tendrá como media la coordenada tomada para cada municipio, además, serán estaciones fijas y estarán al menos a tres metros del suelo (considerando que están en los tejados). La cantidad de familias y su localización se pueden observar en la Tabla 9 y en la Figura 39 respectivamente.

5.1.7 Usuarios de red

La determinación de la cantidad y las características de los usuarios se hace necesario para poder lograr un buen modelado de la red. En este caso se planea dar servicio a un promedio de 22.500 hogares por municipio, teniendo como referente un hogar medio de cuatro integrantes, lo cual implica que se tendrán usuarios de todas las edades, diferentes niveles de educación, con diversas ocupaciones y con un tiempo de uso de la red heterogéneo.

5.1.8 Tráfico de red

Como el sistema que se está modelando está planeado para ser usado como canal de retorno de televisión digital en lugares apartados de las cabeceras municipales se asume que en cada hogar habrá en promedio un televisor o equipo suscriptor.

El tipo de tráfico que circulara por la red puede ser muy variado, dependiendo de las aplicaciones y los contenidos que se estén accediendo en un momento determinado. Sin embargo, se puede clasificar este contenido en tres tipos: eventos (mensajes cortos, señales de respuesta, eventos de control, etc.), recursos (imágenes, sonidos, objetos de software, texto, etc.) y video (video en tiempo real y asíncrono).

Cada uno de los tipos de contenido tiene requerimientos diferentes, sin embargo se espera que el 70% de estos sean de tipo eventos, el 28% sean recursos y solo el 2% sea video. Esta estimación se hace con base en la experiencia y contacto con los contenidos disponibles en Colombia y en el mundo para canal de retorno en televisión digital terrestre (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2011).

A partir del conocimiento de la parrilla ofertada para estas regiones y de algunos hábitos de consumo se considera que la red estará en uso entre las 6:00 a.m. y las 10:00 p.m. (fuera de este horario el uso será muy bajo) con picos de tráfico a las 12:00 m y a las 8:00 p.m. Además, se estima que la población dispondrá de un máximo de 6 opciones de canales pero se hace hincapié en la preferencia de dos de estos, dando por sentado que en las horas de mayor tráfico se tendrá una distribución de consumo de contenido proporcional al 50% de la población para cada una de las dos opciones.

El hecho anterior es relevante cuando se establece la probabilidad de uso de la red por parte de los usuarios, dando como resultado la suposición de que en el momento de mayor tráfico, máximo el 50% de las estaciones subscriptoras usaran el sistema. Si a esto se le une el hecho de tener una conexión y desconexión dinámica según la necesidad de uso y que el 70% de los datos enviados

corresponderán a eventos de poco consumo de ancho de banda y de poca duración se obtiene que el uso de la red en periodos de máximo tráfico lo realizará el 0.5% de las estaciones subscriptoras de forma simultánea.

5.2 Procedimiento de simulación

La simulación consta de dos partes: simulación de la cobertura y simulación de la red. En la primera parte, se calcula el nivel de intensidad de señal que irradia cada uno de los transmisores en un radio máximo de 100 km (radio máximo de IEEE 802.22) y se clasifica mediante, un código de colores, el nivel intensidad de señal que recibiría un terminal dentro de esta zona, generando así un mapa de cobertura para los 10 municipios evaluados, donde el nivel de umbral de los terminales de usuarios marca el color más bajo en el código de colores. La segunda parte, se crea un escenario genérico que posiciona usuarios centrados en medio del espacio del escenario y distribuidos conforme una distribución estadística normal, posteriormente genera tráfico en tres escenarios diferentes: consulta de ping, acceso a un archivo mediante el protocolo ftp y visualización de un streaming de video. Los escenarios son ejecutados de forma independiente y describen el tráfico que generarían los usuarios realizando estas acciones. La simulaciones se realizaron para 100, 200, 300, 400 y 500 usuarios de la red.

Para la simulación de cobertura se sitúan y configuran cada uno de los sitios de forma que den cobertura al municipio evaluado y de ser posible su localización concuerde con emplazamientos comúnmente utilizado para el despliegue de estaciones base. Además, se posiciona como referente un equipo receptor en las coordenadas de cada municipio, esto ayuda a poder orientar las antenas en la posición correcta. La simulación se ejecuta transmisor a transmisor y se grafican de forma conjunta en una sola imagen que posteriormente se visualiza sobre Google Earth para obtener un referente visual conciso que determine si los municipios evaluados tienen cobertura y en qué porcentaje, este cálculo se hace de forma subjetiva, aunque por la forma en que se situaron y configuraron los transmisores se espera obtener coberturas del 100% por encima del umbral.

Por su parte, para la simulación de la red, se define un área de interés (Region of Interest ROI) como un cuadrado de longitud fija, donde se posiciona un transmisor en la esquina superior izquierda, este transmisor esta modelado como una estación base de 802.22, ha este transmisor se une una servidor mediante Ethernet de alta velocidad, simulando que existe una red de núcleo que une diferentes estaciones base y que a través de esta se pueden acceder servidores alojados dentro de la red del proveedor o en internet; la función del servidor es dar respuesta a las peticiones de los clientes. Además, de la estación base se sitúan equipos de usuario, que se corresponden con clientes para el canal de retorno de televisión digital (televisores o set top box), los clientes están situados en la mitad del área de interés y se distribuyen con una función estadística normal. Estos clientes están construidos como si fueran pequeños computadores con una interfaz 802.22. Al realizar las distintas simulaciones, correspondientes a los tres escenarios que se han descrito anteriormente, se almacenan datos del

funcionamiento, entre estos existe un parámetro común de throughput que posteriormente se evaluará como medida de viabilidad técnica de la red.

5.3 Simulación de cobertura

Para el cálculo de cobertura en enlace descendente desde las estaciones base se empleara el software Radio Mobile. En este se especificaran las diferentes estaciones base con sus parámetros característicos y se definirá una estación subscriptora estándar para determinar las áreas de cobertura de cada una de las estaciones base. El objetivo último, es determinar si los emplazamientos seleccionados y los parámetros de transmisión son los adecuados para dar servicio a cada uno de los municipios seleccionados.

5.3.1 Cartografía digital

Para realizar los cálculos de cobertura con el modelo Longley-Rice, modelo utilizado por Radio Mobile, se necesitan datos de elevación del terreno para esto la herramienta brinda la posibilidad de trabajar con datos geográficos libres de diferentes resoluciones. Para trabajar en bandas que van desde los 54 a los 862 MHz una resolución de 100 metros funciona sin ningún inconveniente, de forma que se emplean una de las opciones que integra la propia herramienta para así generar un mapa de alturas de terreno.

En los cálculos realizados se empleo el modelo SRTM DTED (Shuttle Radar Topography Mission – Digital Terrain Elevation Data) que se basa en los mismos datos recogidos en la misión SRTM de la NASA en febrero del año 2000. Estos datos geográficos ofrecen para Colombia una resolución de 3 segundos de arco (aproximadamente 100 m).

5.3.2 Modelo de propagación

El modelo de propagación que emplea Radio Mobile es el Longley-Rice, este modelo es idóneo para las radio comunicaciones en la banda de 54 a 862 MHz (banda donde trabaja la tecnología WRAN), dando valores aceptables que son un buen indicador de la cobertura real que tendrá un sitio. La configuración del modelo empleado en la simulación se puede encontrar en la siguiente tabla (Tabla 11):

Parámetro	Valor
Frecuencia mínima (MHz)	54
Frecuencia máxima (MHz)	862
Polarización	Vertical
Modo estadístico	Difusión
Refractividad de la superficie (Unidades-N)	301
Conductividad del suelo (S/m)	0.005
Permitividad relativa al suelo	15

Clima	Ecuatorial
Topología	Red de datos
Potencia del transmisor (W)	2.000
Umbral del receptor (dBm)	-97
Perdida de la línea (dB)	1.0
Tipo de antena	Corner (Figura 40)
Ganancia de antena (dBi)	10
Altura de antena (m)	100
Pérdida adicional cable (dB/m)	0.05

Tabla 11 - Parámetros de configuración Radio Mobile

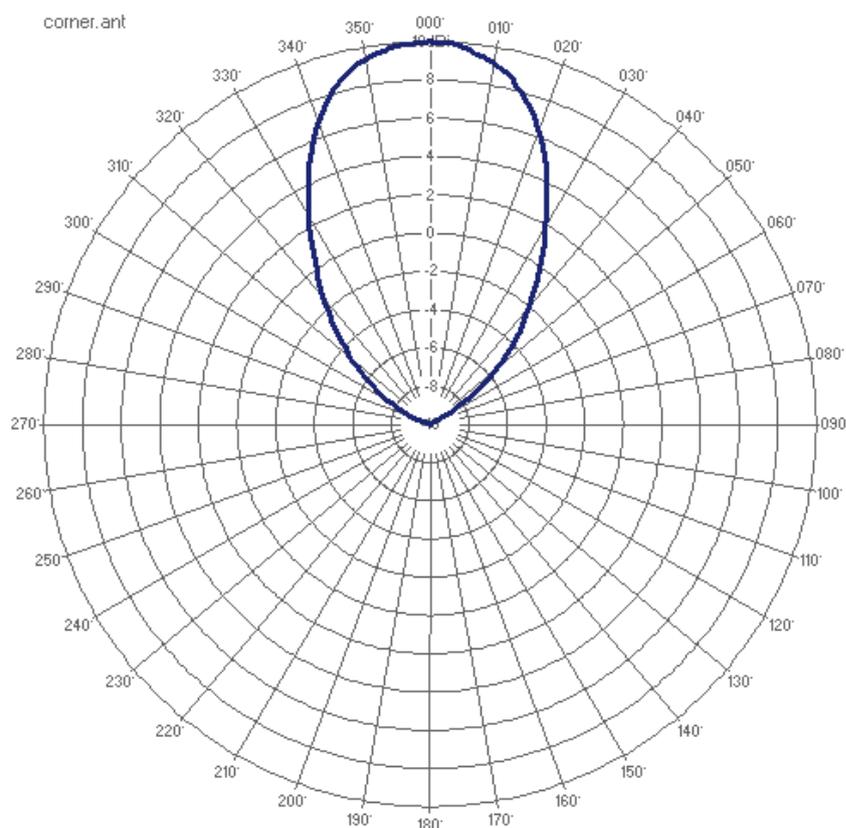


Figura 40 - Diagrama de radiación de antena

5.3.3 Configuración de la simulación

La simulación incluye la ejecución consecutiva de los cálculos de cobertura para cada uno de los transmisores asociados con los municipios, en todos ellos se empleó un cálculo de cobertura polar en la dirección descendente del enlace, en un área circular de 100 km de radio y usando una visualización de superficie en formato arcoíris con valores entre los -97 dBm (umbral de recepción de los receptores IEEE 802.22) y los -57 dBm.

5.4 Simulación de la red

Con el fin de estimar el comportamiento de la red en funcionamiento se plantea el uso de un simulador discreto de eventos: Omnet ++, en este programa, se configuraran los diferentes escenarios de transmisión para un municipio modelo. Esto considerando que los municipios seleccionados pueden ser provistos de mediante la red 802.22 sin generar interferencia con el resto de la red o con tecnologías coexistentes. Además, se considera que al cumplir con un nivel de señal aceptable y al estipular que son municipios similares en población y uso de la red, realizar un caso típico se aproxima al comportamiento que tendrán todas las estaciones base y sus subscriptores.

Dentro de la simulación en Omnet++ se tendrán en cuenta los siguientes criterios:

- La red empleada tiene una topología inalámbrica punto/multipunto
- Existen tres tipos de contenidos que se distribuyen por la red: eventos, recursos y video. Se modelaran los eventos como la realización de un ping sobre IP, mientras que los recursos se simularan como un acceso a un servidor FTP y el video como un servidor de streaming
- Los tres tipos de contenidos se evaluarán de forma independiente y el tráfico se observará en los enlaces ascendentes y descendentes de la red

Es importante recalcar que en términos de implementación sobre Omnet++ la red simulada y los componentes de ésta son iguales en los tres escenarios de simulación, también lo será el tamaño del área de interés, la distribución y la cantidad de usuarios y los parámetros de propagación de la señal. La diferencia radica en los archivos de configuración, más específicamente en el tipo de servicio al que acceden siendo: ping, ftp y streaming.

5.4.1 Movilidad

Dentro de la simulación el caso de movilidad no se evalúa, sin embargo es relevante destacar que Omnet++ provee algoritmos de movilidad y que IEEE 802.22 soporta movilidad para sus usuarios.

5.4.2 Distribución de usuarios y área de interés

Como se ha mencionado con anterioridad los usuarios se posicionaran de forma automática siguiéndola distribución estadística normal. En los tres escenarios la media de la distribución será el centro del área de interés y la desviación típica será un décimo de uno de los lados del área de interés. De esta forma se obtendrá una distribución poblacional similar a la que se encuentra en los municipios evaluados, concentrando la mayoría de los hogares en el centro del municipio.

El área de interés (Figura 41) se ha determinado como un cuadrado de 70 kilómetros de lado y se ha ubicado la estación transmisora en la esquina superior

izquierda, logrando así una distancia máxima entre usuarios y estación trasmisora de 100 km y como media una distancia de 50 kilómetros (que es una medida intermedia de las distancia de los diferentes transmisores a el centro de los municipios - Tabla 12). Además, se ha programado en Omenet++ un modulo que define una nueva forma de situar los diferentes clientes de manera automática para que sigan una distribución normal estándar centra en la mitad del área de interés y con desviación equivalente a un decimo de la misma.

Municipio	Transmisor	Distancia
Ocaña	Jurisdicciones	47.05 km
Sabanalarga	La Popa	71.44 km
Tierralta	Acandí	34.80 km
Manaure	Manaure	00.00 km
Aguachica	Jurisdicciones	68.41 km
Santander de Quilichao	Munchique	77.11 km
Cereté	Acandí	51.40 km
Sahagún	La Pita	77.22 km
Arauca	Arauca	00.00 km
Villa del Rosario	Cerro Tasajero	16.60 km

Tabla 12 - Distancia transmisor/municipio

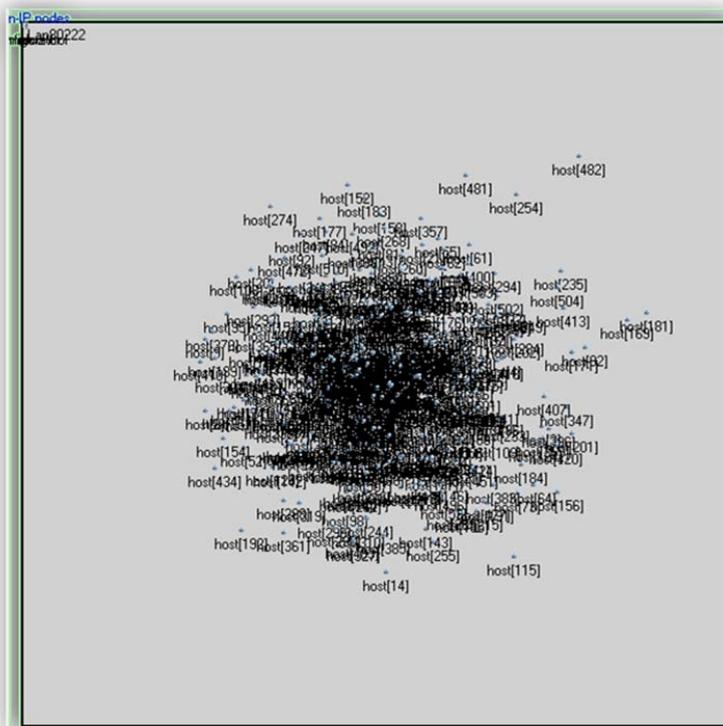


Figura 41 - Área de interés

5.4.3 Módulos desarrollados en Omnet++

Para lograr realizar la simulación se ha creado dentro del simulador Omnet++, estructuras que implementan las diferentes capas del modelo OSI (ISO, 1998) adaptadas a los requerimientos del estándar IEEE 802.22 las cuales se han unido para crear una red de simulación (Figura 42). Dentro de la simulación existen tres estructuras diferentes: la primera es el servidor (Figura 43), el cual se encarga de ofrecer los servicios de respuesta de ping, servidor ftp y servidor de streaming de video; la segunda representa los equipos de usuario (Figura 44), que se encargan de acceder a los contenidos mediante WRAN y finalmente la estación base (Figura 45) que implementa el nivel físico de IEEE 802.22 y que sirve de vínculo entre el servidor y los equipos de usuario.

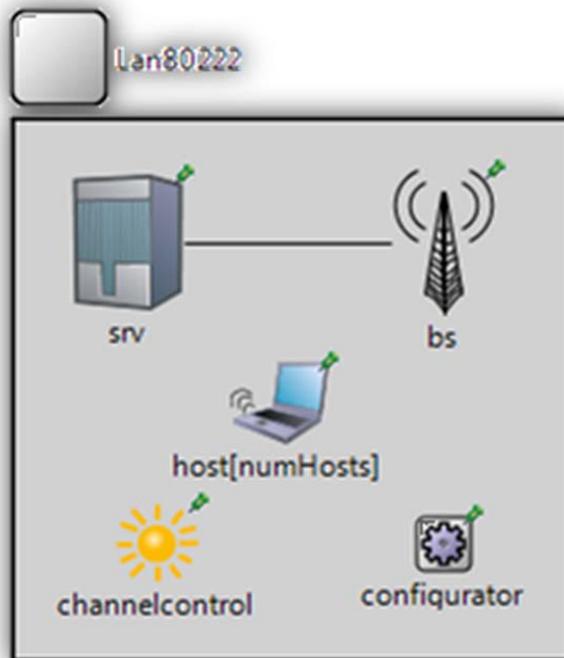


Figura 42 - Red de simulación

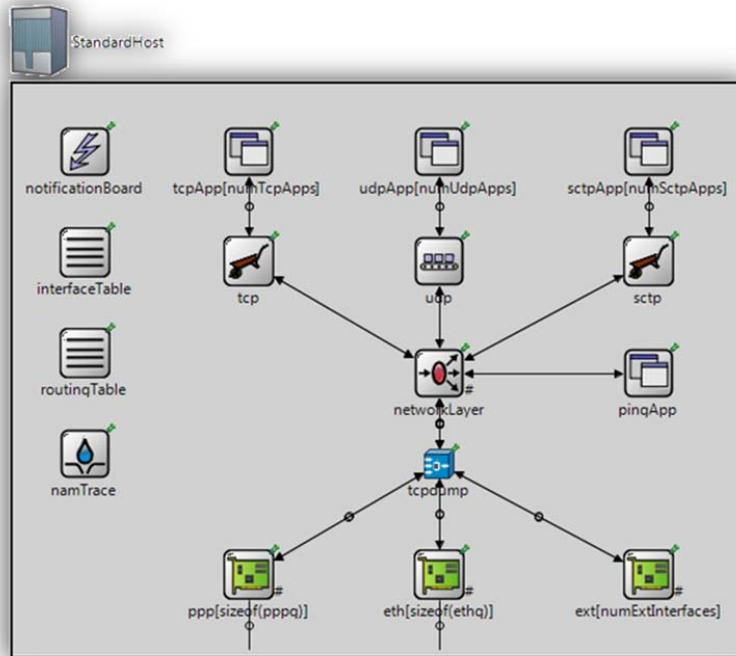


Figura 43 - Estructura del servidor

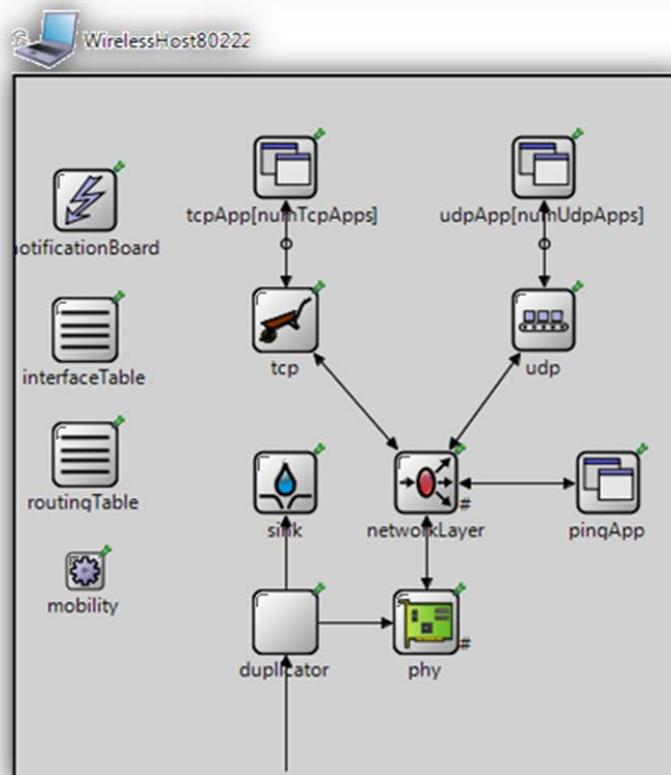


Figura 44 - Estructura del cliente

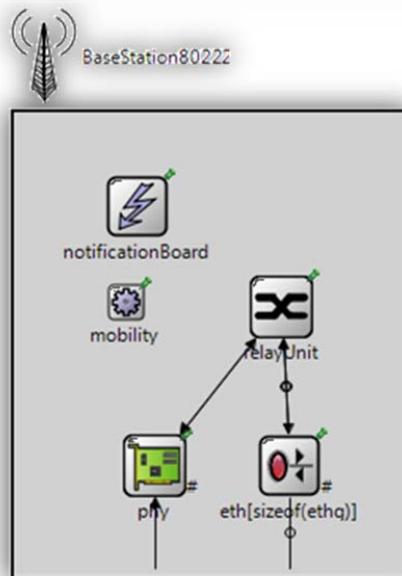


Figura 45 - Estructura de la estación base

5.4.4 Configuración de la simulación

La configuración de Omnet exige un gran número de parámetros que deben escribirse en el archivo .ini. Para cada uno de los escenarios se ha escrito un archivo .ini, los parámetros comunes más relevantes en los tres escenarios se pueden observar en la siguiente tabla (Tabla 13):

Parámetro	Valor
channelcontrol.propagationModel	RayleighModel
radio.attenuationModel	RayleighModel
radio.channelModel	AWGN
playgroundSizeX	70000
playgroundSizeY	70000
host*.mobilityType	NullCityMobility
channelcontrol.carrierFrequency	800MHz

Tabla 13 - Parámetros de configuración Omnet++

Las diferencias entre los tres escenarios hacen parte de la configuración de las simulaciones y se encuentran como parámetros en los archivos .ini. La Tabla 14 resume los diferentes parámetros empleados en cada uno de los escenarios. Estos parámetros son necesarios para el correcto funcionamiento de la simulación.

Escenario	Parámetro	Valor ²²
Ping	*.srv.pingApp.destAddr	
	.host[].pingApp.destAddr	srv
	**pingApp.interval	200ms
FTP	**srv.numTcpApps	1
	**srv.tcpAppType	TCPSinkApp
	**srv.tcpApp[0].port	1000
	**host*.numTcpApps	1
	**host*.tcpAppType	TCPSessionApp
	**host*.tcpApp[0].active	true
	**host*.tcpApp[0].connectAddress	srv
	**host*.tcpApp[0].connectPort	1000
	**host*.tcpApp[0].tOpen	0
	**host*.tcpApp[0].tSend	0
	**host*.tcpApp[0].sendBytes	100MB
	**host*.tcpApp[0].tClose	0
	**tcpApp[*].address	
	**tcpApp[*].port	-1
	**tcpApp[*].sendScript	
Streamming	**numUdpApps	1
	**srv.udpAppType	UDPVideoStreamSvr
	**srv.udpApp[*].videoSize	100MB
	**srv.udpApp[*].serverPort	388
	**srv.udpApp[*].waitInterval	10ms
	**srv.udpApp[*].packetLen	1000B
	**host*.udpAppType	UDPVideoStreamCli
	**host*.udpApp[*].serverAddress	srv
	**host*.udpApp[*].localPort	9999
	**host*.udpApp[*].serverPort	3088
**host*.udpApp[*].startTime	0	

Tabla 14 - Configuración de los escenarios en Omnet++

5.5 Mediciones

Dentro de las simulaciones se realizarán dos mediciones: el nivel de señal y el throughput; la primera determinará si en una determinada zona existe cobertura en el servicio y se expresará como un mapa de cobertura que mostrará los emplazamientos de las estaciones base y los municipios seleccionados, se encontrarán los parámetros de configuración adecuados para asegurar que hay cobertura en los diez municipios seleccionados, posteriormente y de forma subjetiva se evaluará el porcentaje de cobertura, que indica la cantidad de territorio evaluado (cada uno de los municipios) que tiene una cobertura por encima del umbral de recepción y el valor mínimo dentro de este territorio. La

²² Los valores vacíos indican que en la configuración deben ponerse de esta forma

segunda medida proporciona una estimación del desempeño de la red y será medido en tres escenarios diferentes de transmisión: eventos, recursos y video; para ello se registra el throughput en la estación base.

Para tener total claridad sobre las mediciones realizadas, las dos variables son entendidas en el contexto de este trabajo como:

Cobertura: Se refiere al área geográfica en la cual es posible acceder a un servicio de telecomunicaciones.

Throughput: Se define como el número de bytes o paquetes que se tramiten por unidad de tiempo. Se expresa en bits por segundo o en paquetes por segundo.

CAPÍTULO VI – Resultados de las simulaciones

A continuación se exponen los resultados obtenidos de la simulación de una red IEEE 802.22 WRAN para algunas poblaciones representativas ubicadas en Colombia. Además, se presentan la medición del comportamiento de la red en términos de cobertura y throughput, considerando estas dos variables como indicadores representativos de la viabilidad técnica de una implementación real.

Como se mencionó en el capítulo V se realizaron diversas simulaciones en dos entornos diferentes: RadioMobile y Omnet++; con el fin de obtener las mediciones de cobertura y throughput respectivamente.

6.1 Resultados de cobertura de los 10 municipios en Radio Mobile

Como se planteó en el capítulo anterior, se han escogido 10 municipios localizados en territorio colombiano que cumplen con características que los convierten en una muestra representativa de los municipios a los cuales una tecnología como IEEE 802.22 puede ofrecer un servicio viable. De la Tabla 9, se listan los municipios seleccionados como: Ocaña, Sabanalarga, Tierralta, Manaure, Aguachica, Santander de Quilichao, Cereté, Sahagún, Arauca y Villa del Rosario.

Para cada uno de los 10 municipios se ubicó un transmisor de forma que tuviera una cobertura del 100%, logrando en 8 de los 10 casos poder localizar transmisores en ubicaciones conocidas. Sin embargo, en dos de los casos, al no encontrar un emplazamiento conocido se optó por ubicar el transmisor en el centro del municipio manteniendo una cobertura del 100%

A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los municipios. La tabla que acompaña cada caso expone los atributos del transmisor, el porcentaje del área del municipio al cual se le puede dar cobertura (% de cobertura) y el nivel de señal mínimo dentro del área de cobertura.

Además, se complementa la tabla con dos gráficas que muestran el área de cobertura que brinda el transmisor sobre el municipio en representación cenital²³ y oblicua²⁴. La escala de colores empleada se puede observar en la Figura 46, ésta escala está medida en dBm y su valor mínimo, representado en azul, es de -97 dBm que representa el valor umbral para asegurar conectividad en los equipos de usuario de la tecnología IEEE 802.22.

²³ Cenital: perpendicular al suelo

²⁴ Oblicua: intermedia entre el plano horizontal y el vertical



Figura 46- Escala de colores para los mapas de cobertura

6.1.1 Consideraciones generales

Anteriormente se mencionó que en dos de los diez casos se ubicó la estación transmisora dentro del municipio al cual se le planteaba dar cobertura. Estos dos municipios son: Manaure y Arauca; es importante tener presente este hecho al visualizar los mapas de cobertura en vista oblicua de estos dos municipios, por que se encontrará un espacio circular de aproximadamente un kilómetro de radio sin cobertura, este hecho únicamente refleja una limitación del software de visualización empleado. De forma que es necesario conocer que en este espacio el nivel de señal suele ser bastante alto, teóricamente, debe ser superior al obteniendo en otras localizaciones.

Por otra parte el caso del municipio de Sahagún presenta otra peculiaridad. En este municipio se superponen dos coberturas dadas por dos transmisores distintos, a saber: Acandí y La Pita. Aunque La Pita es el transmisor que brinda servicio a este municipio es necesario recalcar que la tecnologías IEEE 802.22 se puede ver beneficiada de la posibilidad de contar con dos fuentes de señal útil, siempre y cuando estas estén sincronizadas, el análisis de este efecto no se incluye en este trabajo pero se considera como trabajo futuro a realizar.

Finalmente, se esclarece que las herramientas empleadas no brindan información estadística del porcentaje de cobertura o el nivel de señal mínimo, para obtener estos valores se superpuso un mapa vectorial que indicaba el contorno del municipio evaluado junto con el mapa de cobertura y de forma subjetiva se valoró el porcentaje de cobertura, cabe anotar que en todos los casos se encontró que en todo el municipio había una señal superior al umbral del receptor. Para obtener el nivel mínimo se observó una matriz de valores de señal de la cual se compone el mapa de cobertura y se determinó el valor mínimo presente dentro del contorno del municipio evaluado.

6.1.2 Ocaña

Municipio	Transmisor			Porcentaje de cobertura	Nivel de señal mínimo
	Localidad	Latitud	Longitud		
Ocaña	Jurisdicciones	7°50'48.20"	73°13'32.20"	100%	-93 dBm

Tabla 15 - Datos de cobertura Ocaña

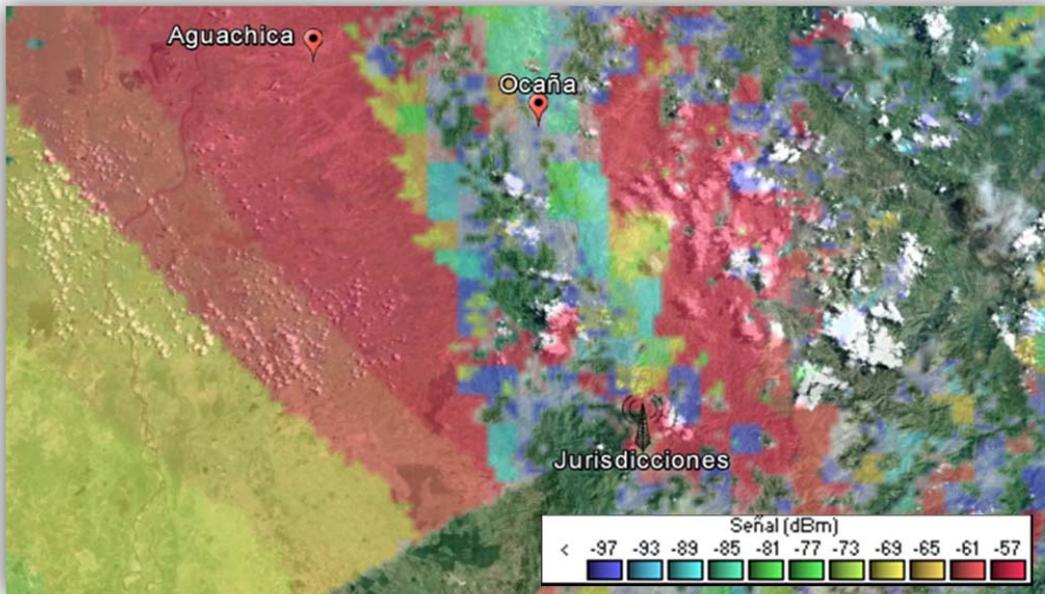


Figura 47 - Cobertura Ocaña cenital

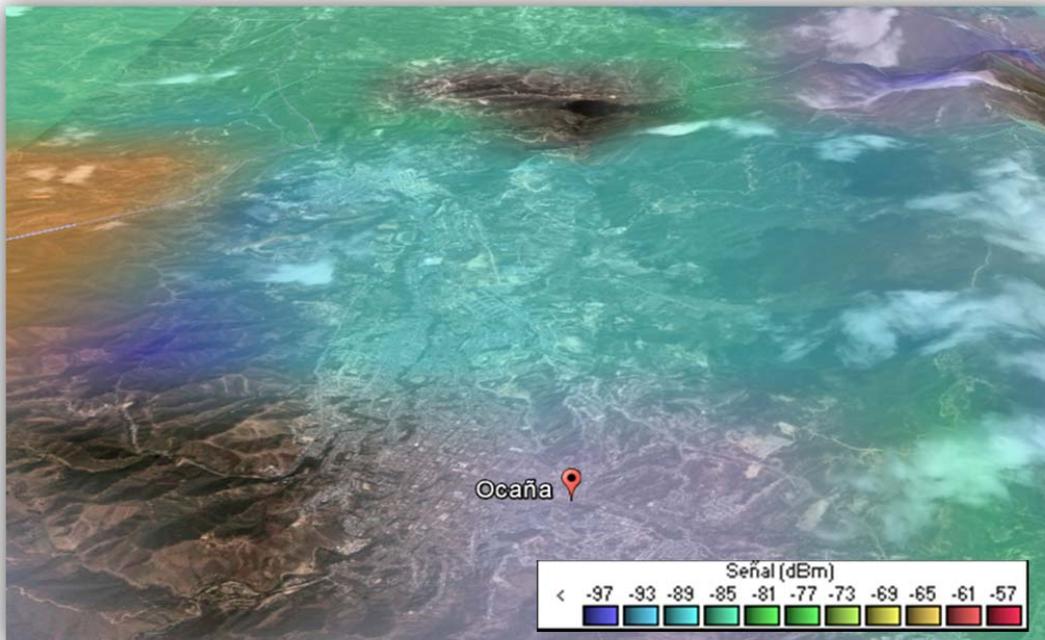


Figura 48 - Cobertura Ocañaoblicua

6.1.3 Sabanalarga

Municipio	Transmisor			Porcentaje de cobertura	Nivel de señal mínimo
	Localidad	Latitud	Longitud		
Sabanalarga	La Popa	10°25'13.50"	75°31'32.20"	100%	-84 dBm

Tabla 16 - Datos de cobertura Sabanalarga

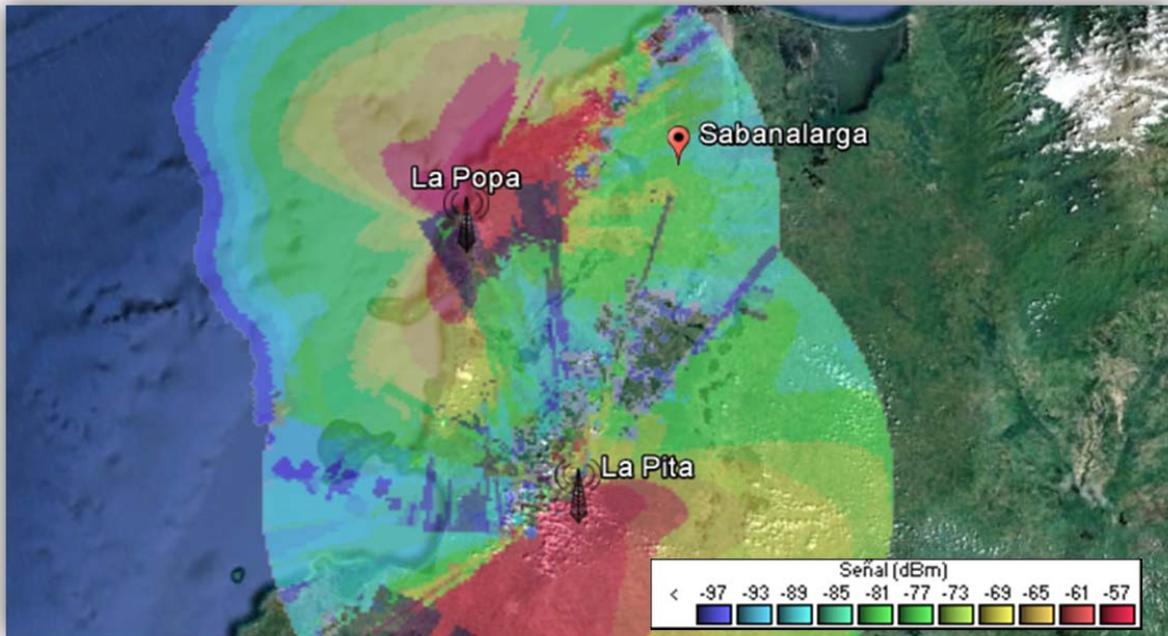


Figura 49 - Cobertura Sabanalarga cenital

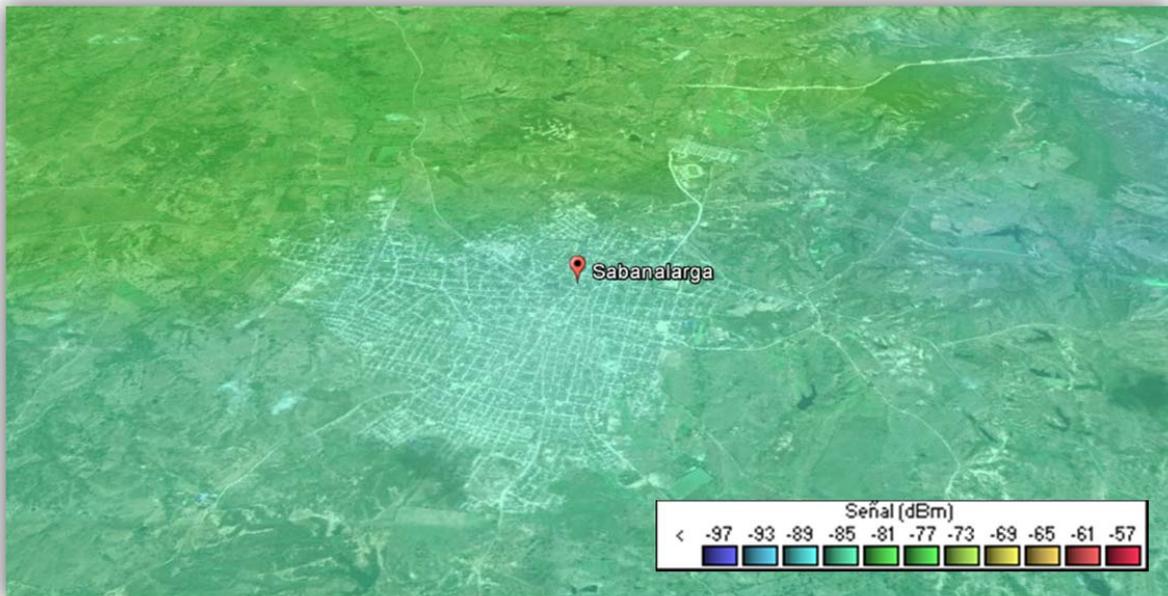


Figura 50 - Cobertura Sabanalarga oblicua

6.1.4 Tierralta

Municipio	Transmisor			Porcentaje de cobertura	Nivel de señal mínimo
	Localidad	Latitud	Longitud		
Tierralta	Acandí	8°30'27.70"	76° 3'55.00"	100%	-59 dBm

Tabla 17 - Datos de cobertura Tierralta

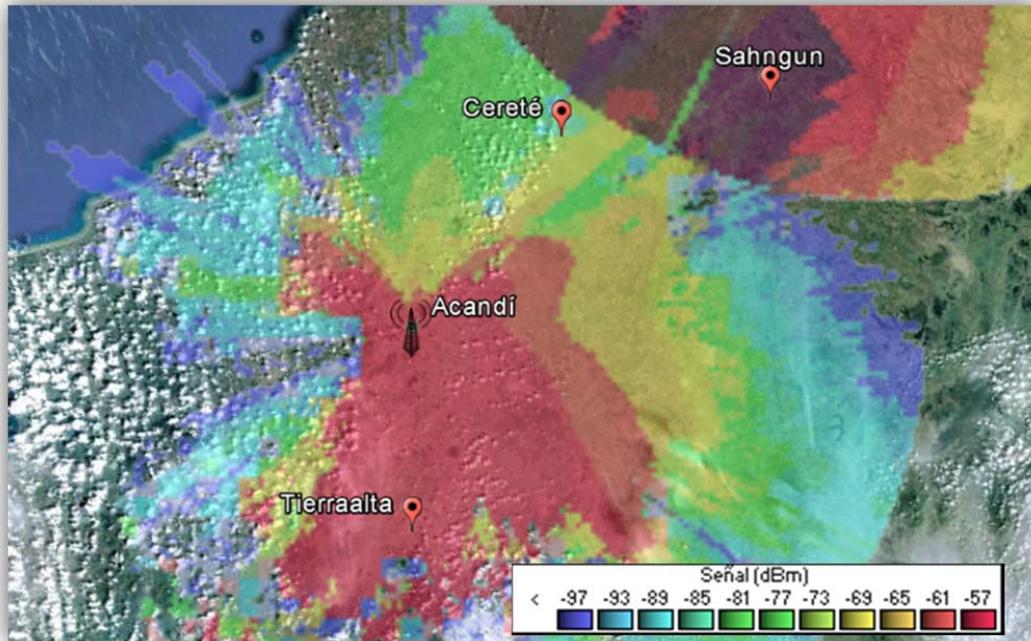


Figura 51 - Cobertura Tierralta cenital



Figura 52 - Cobertura Tierralta oblicua

6.1.5 Manaure

Municipio	Transmisor			Porcentaje de cobertura	Nivel de señal mínimo
	Localidad	Latitud	Longitud		
Manaure	Manaure	11°46'39.41"	72°27'43.16"	100%	-57 dBm

Tabla 18 - Datos de cobertura Manaure

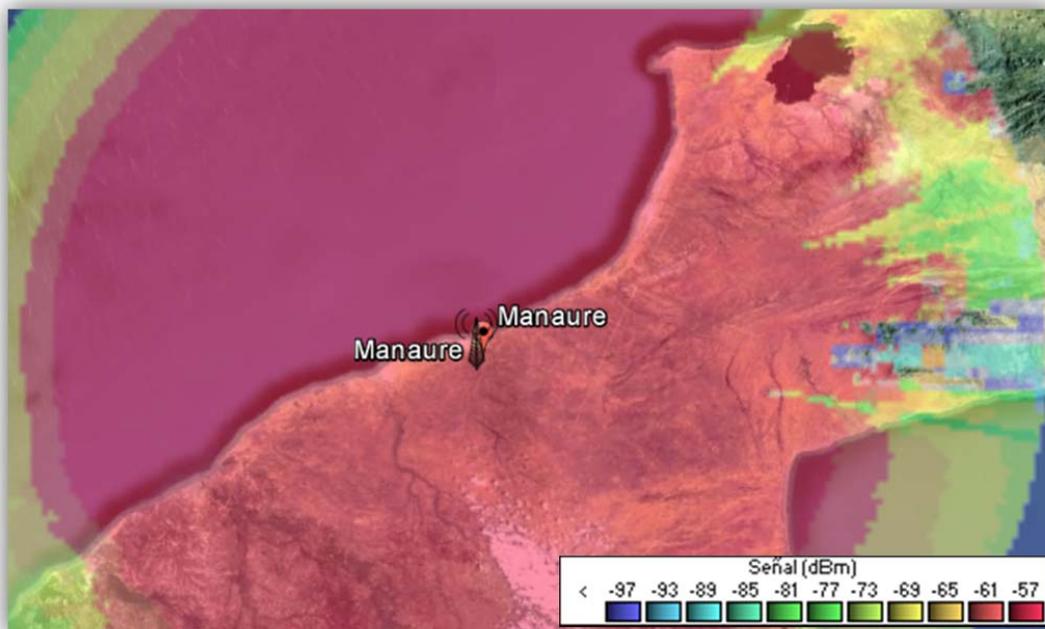


Figura 53 - Cobertura Manaure cenital



Figura 54 - Cobertura Manaure oblicua

6.1.6 Aguachica

Municipio	Transmisor			Porcentaje de cobertura	Nivel de señal mínimo
	Localidad	Latitud	Longitud		
Aguachica	Jurisdicciones	73°13'32.20"	73°13'32.20"	100%	-60 dBm

Tabla 19 - Datos de cobertura Aguachica

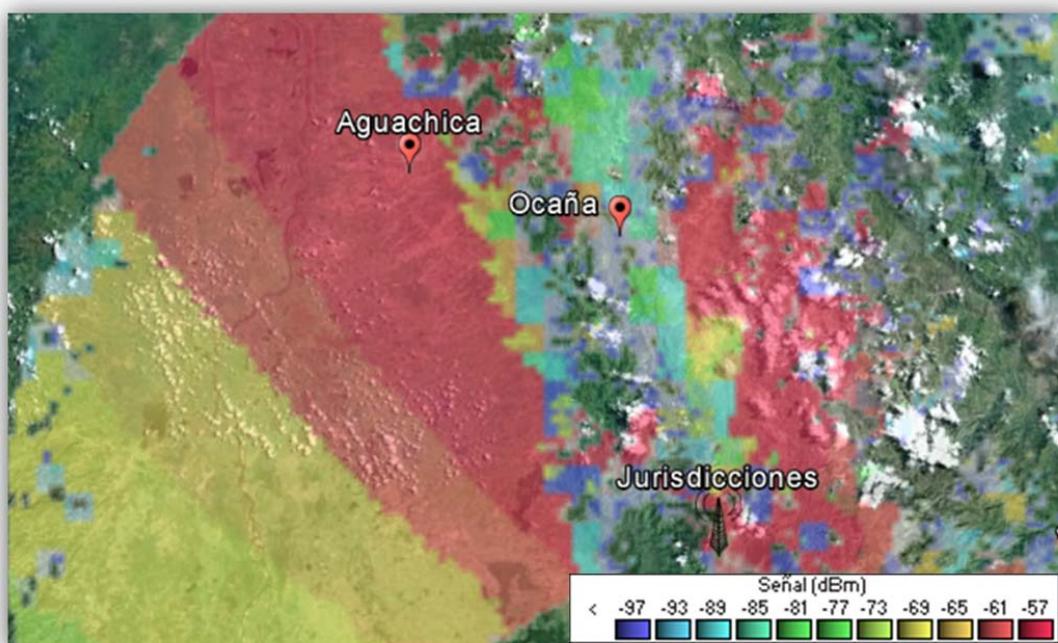


Figura 55 - Cobertura Aguachica cenital

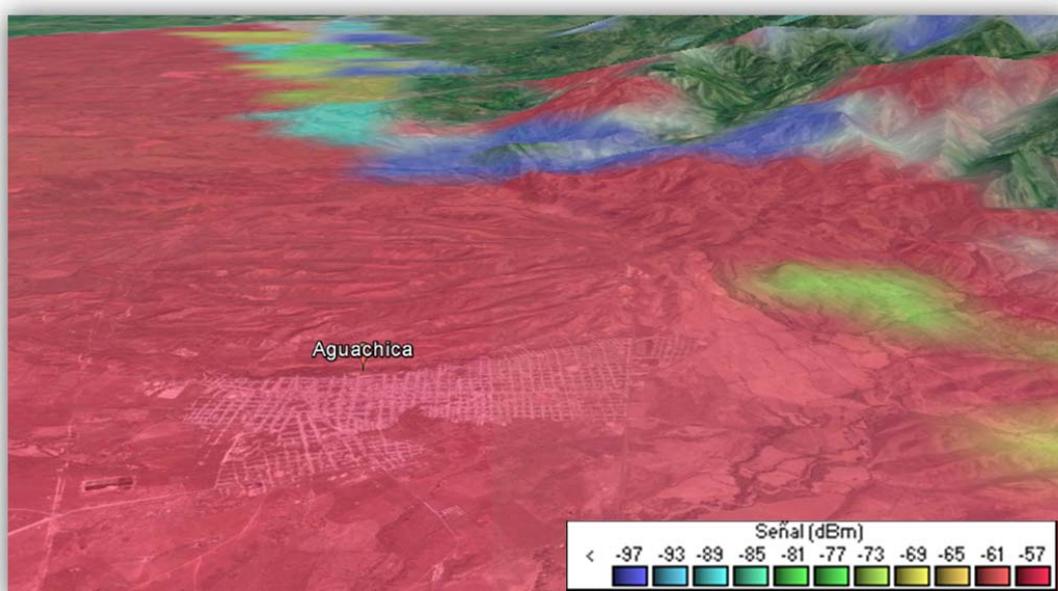


Figura 56 - Cobertura Aguachica oblicua

6.1.7 Santander de Quilichao

Municipio	Transmisor			Porcentaje de cobertura	Nivel de señal mínimo
	Localidad	Latitud	Longitud		
Santander de Quilichao	Munchique	2°31'1.90"	76°57'22.30"	100%	-93 dBm

Tabla 20 - Datos de cobertura Santander de Quilichao

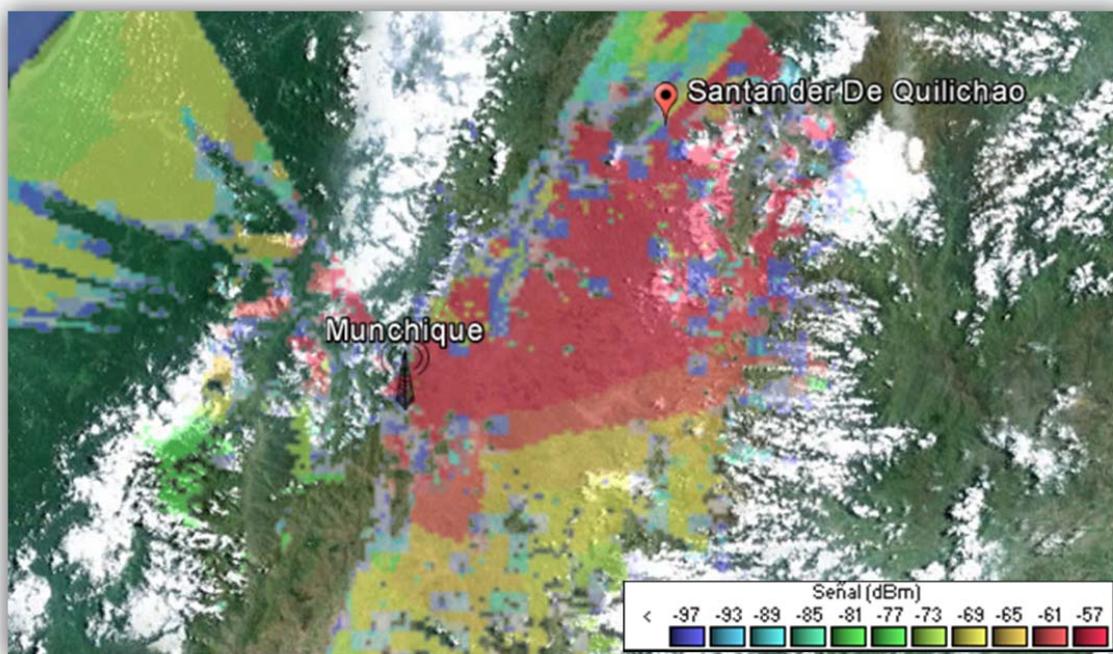


Figura 57 - Cobertura Santander de Quilichao cenital

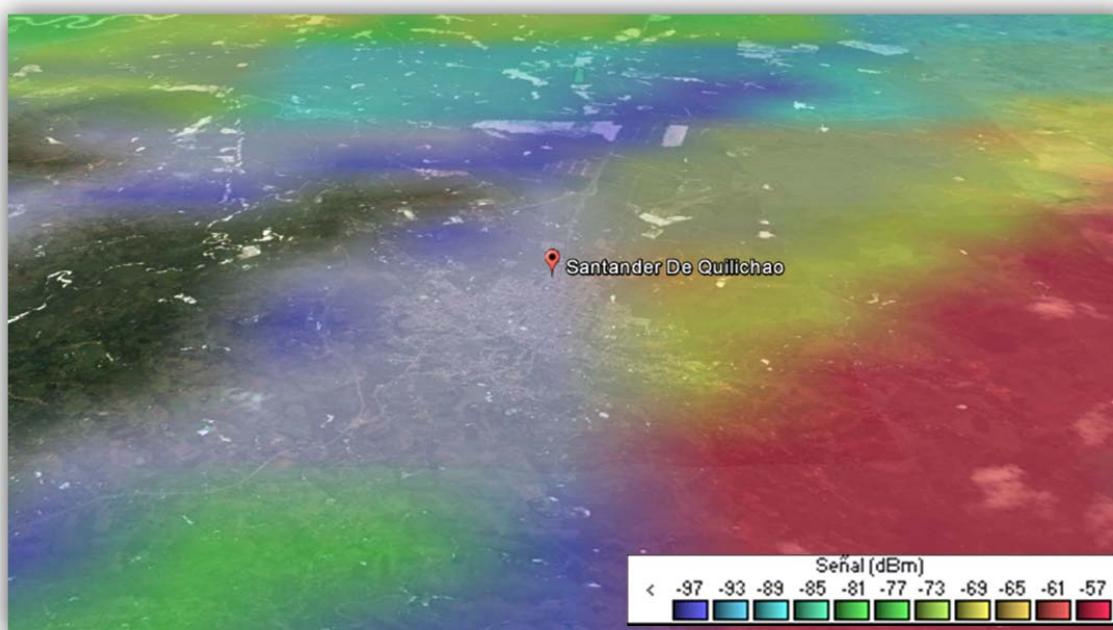


Figura 58 - Cobertura Santander de Quilichao oblicua

6.1.8 Cereté

Municipio	Transmisor			Porcentaje de cobertura	Nivel de señal mínimo
	Localidad	Latitud	Longitud		
Cereté	Acandí	8°30'27.70"	76° 3'55.00"	100%	-81 dBm

Tabla 21 - Datos de cobertura Cereté

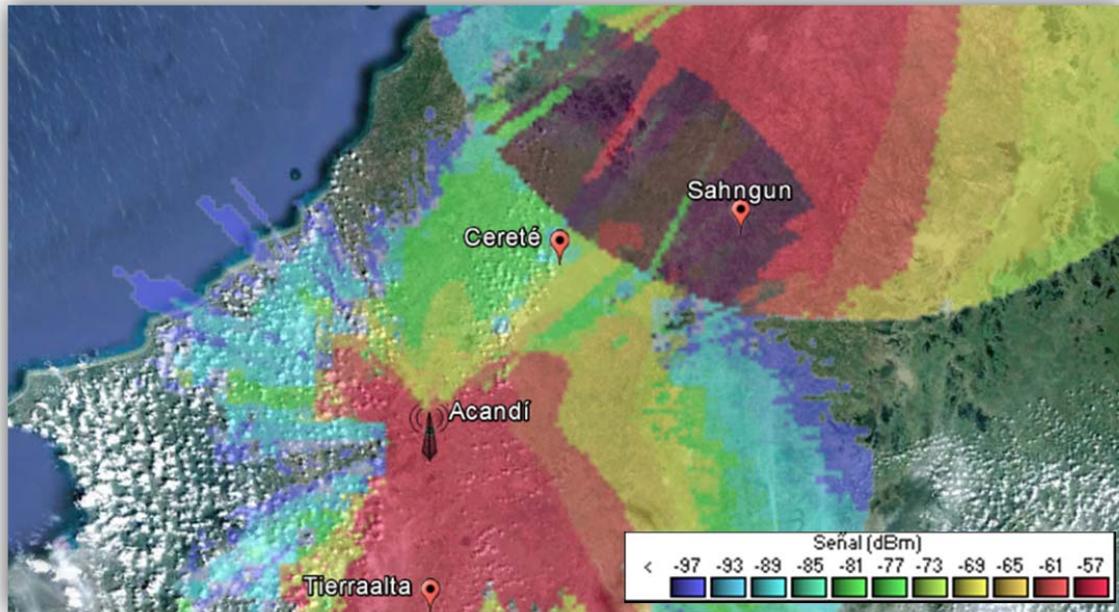


Figura 59 - Cobertura Cereté cenital

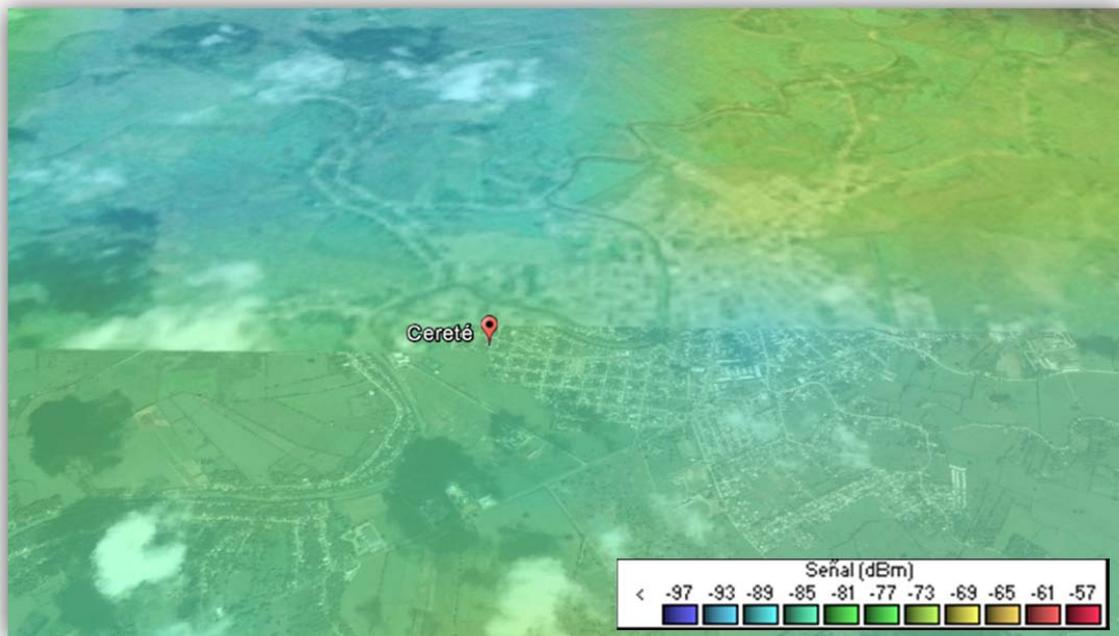


Figura 60 - Cobertura Cereté oblicua

6.1.9 Sahagún

Municipio	Transmisor			Porcentaje de cobertura	Nivel de señal mínimo
	Localidad	Latitud	Longitud		
Sahagún	La Pita	9°38'13.40"	75°12'16.40"	100%	-60 dBm

Tabla 22 - Datos de cobertura Sahagún

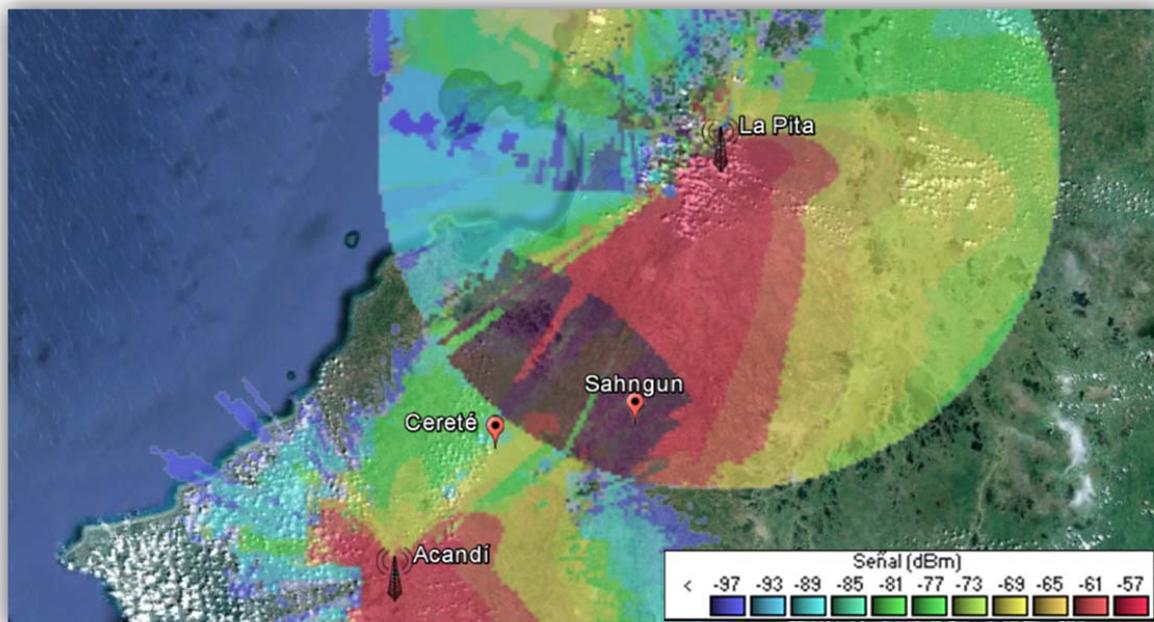


Figura 61 - Cobertura Sahagún cenital

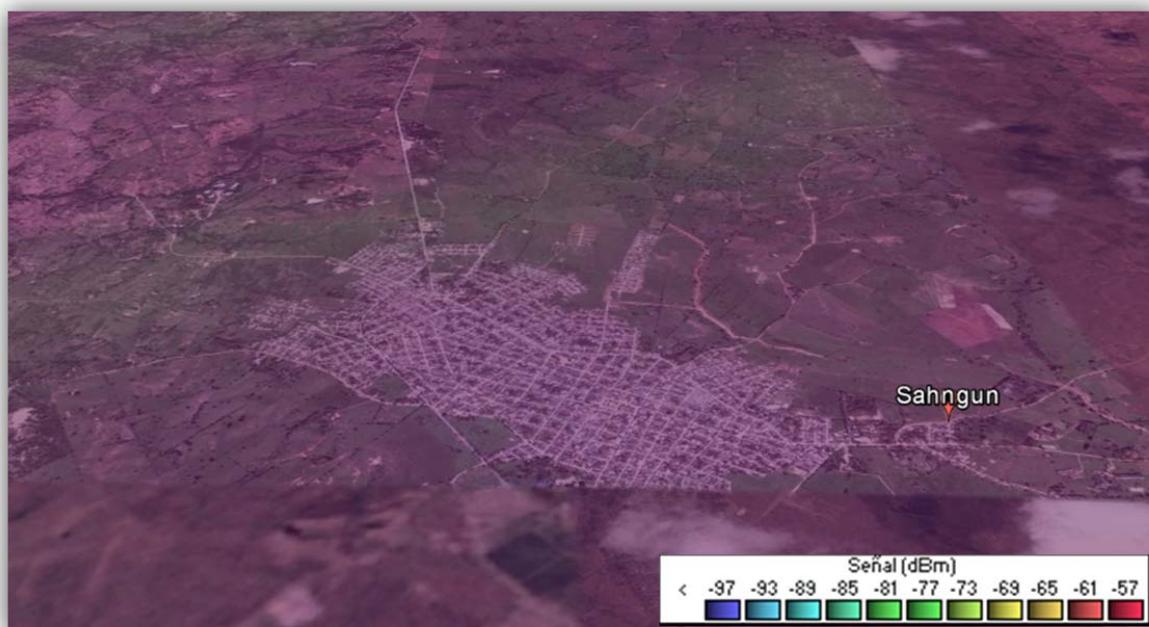


Figura 62 - Cobertura Sahagún oblicua

6.1.10 Arauca

Municipio	Transmisor			Porcentaje de cobertura	Nivel de señal mínimo
	Localidad	Latitud	Longitud		
Arauca	Arauca	7°10'7.97"	70°45'4.48"	100%	-57 dBm

Tabla 23 - Datos de cobertura Arauca

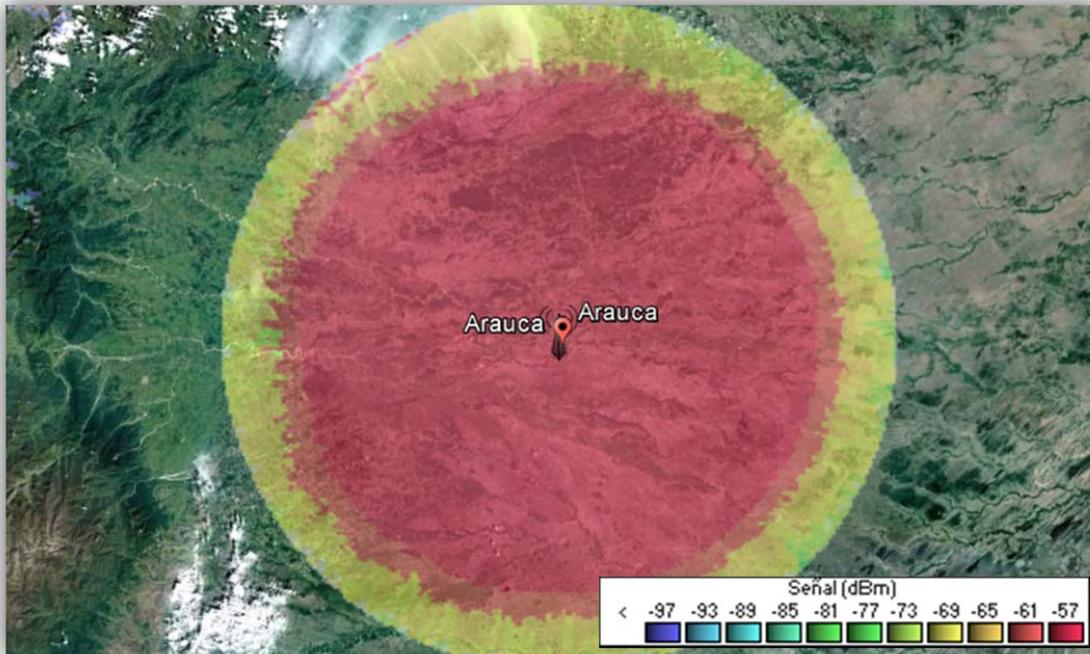


Figura 63 - Cobertura Arauca cenital

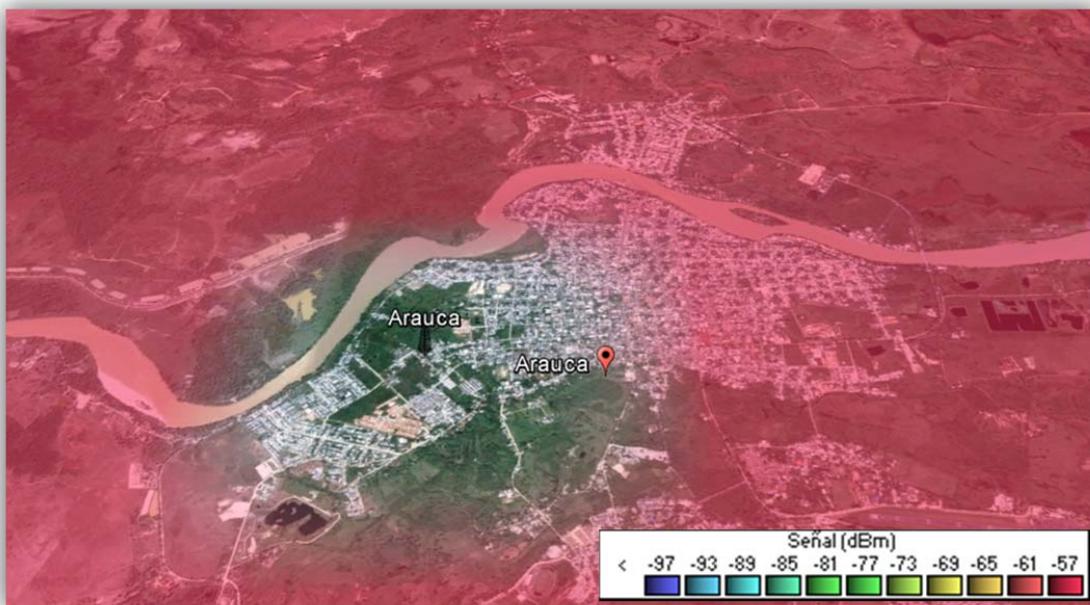


Figura 64 - Cobertura Arauca oblicua

6.1.11 Villa del Rosario

Municipio	Transmisor			Porcentaje de cobertura	Nivel de señal mínimo
	Localidad	Latitud	Longitud		
Villa del Rosario	Cerro Tasajero	7°59'30.90"	72°27'43.20"	100%	-61 dBm

Tabla 24 - Datos de cobertura Villa del Rosario

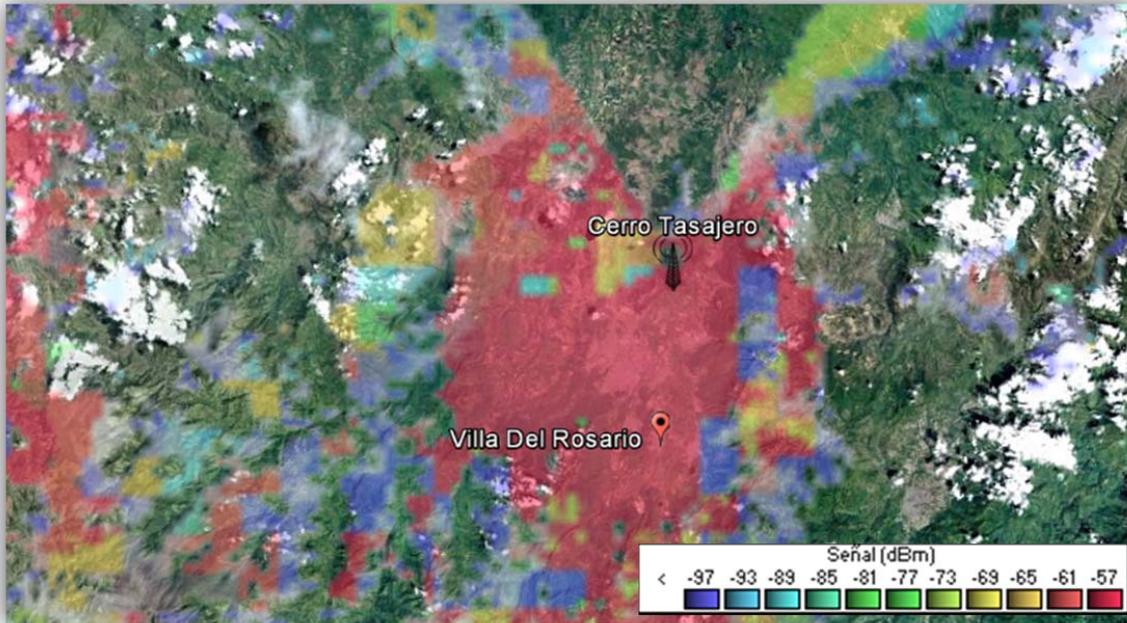


Figura 65 - Cobertura Villa del Rosario cenital

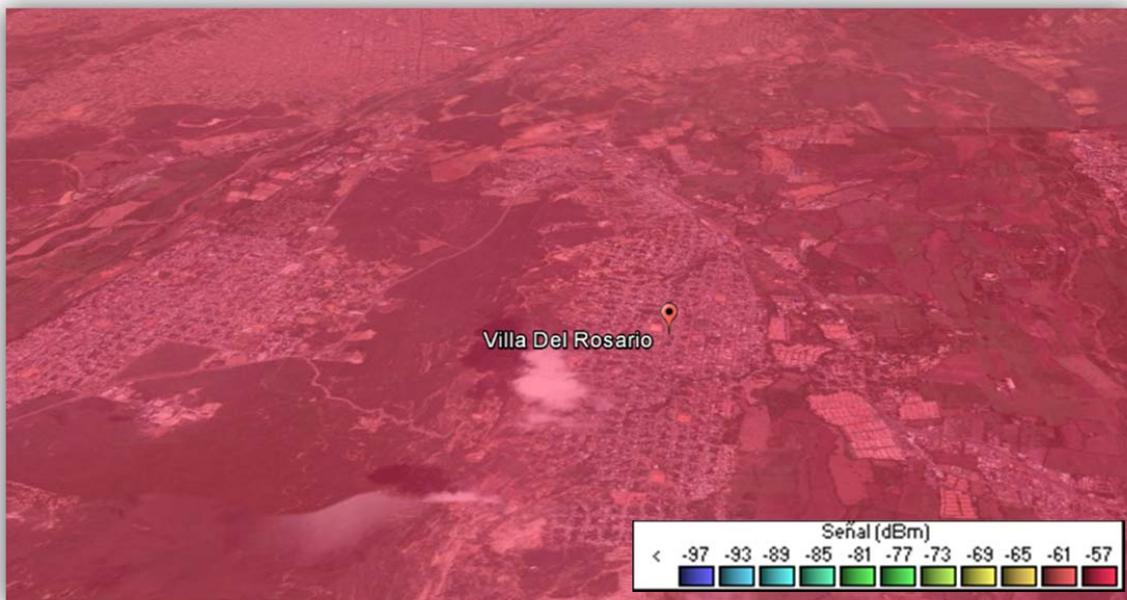


Figura 66 - Cobertura Villa del Rosario oblicua

6.1.12 Resultados consolidados

A modo de resumen se presentan los resultados consolidados en Tabla 25 y Figura 67

Municipio	Transmisor			Porcentaje de cobertura	Nivel de señal mínimo
	Localidad	Latitud	Longitud		
Ocaña	Jurisdicciones	7°50'48.20"	73°13'32.20"	100%	-93 dBm
Sabanalarga	La Popa	10°25'13.50"	75°31'32.20"	100%	-84 dBm
Tierralta	Acandí	8°30'27.70"	76° 3'55.00"	100%	-59 dBm
Manaure	Manaure	11°46'39.41"	72°27'43.16"	100%	-57 dBm
Aguachica	Jurisdicciones	73°13'32.20"	73°13'32.20"	100%	-60 dBm
Santander de Quilichao	Munchique	2°31'1.90"	76°57'22.30"	100%	-93 dBm
Cereté	Acandí	8°30'27.70"	76° 3'55.00"	100%	-81 dBm
Sahagún	La Pita	9°38'13.40"	75°12'16.40"	100%	
Arauca	Arauca	7°10'7.97"	70°45'4.48"	100%	-57 dBm
Villa del Rosario	Cerro Tasajero	7°59'30.90"	72°27'43.20"	100%	-61 dBm

Tabla 25- Resultados de la simulación de cobertura consolidados



Figura 67 - Resultados de la simulación de cobertura consolidados

6.2 Resultados de throughput en los 3 escenarios en Omnet++

Como se indicó en el capítulo anterior se han planteado tres escenarios de simulación correspondientes con los tres tipos de tráfico que se espera que circulen por la red, estos son: eventos, recursos y videos .Haciendo un símil con estos tres tipos de tráfico se configuran dentro de la simulación servicios con requerimientos de red similares a estos, a saber: ping, ftp y streaming de video. Cada uno de los escenarios se mantuvo en ejecución por un período de veinticinco horas antes de obtener las estadísticas del funcionamiento.

Los escenarios comparten la misma red simulación (Figura 42) y área de interés (Figura 41) pero difieren en el servicio que es accedido en el servidor desde los clientes. En el primer caso cada uno de los clientes realiza un ping de forma iterativa hacia el servidor el cual responde con un mensaje, en el segundo caso los clientes acceden a un archivo de 100 MB mediante ftp (File Transfer Protocol), y en el tercer caso los clientes realizan un streaming de video de 100 MB.

6.2.1 Eventos

Las medidas del throughput para el escenario de tráfico de eventos, simulados por medio de la aplicación de ping se pueden observar en la Figura 68. La caída del throughput se puede explicar por dos hechos: el primero es el aumento de las colisiones en el medio compartido y el segundo es que entre más paquetes circulan por la red inalámbrica el tiempo de entrega aumenta mientras la carga útil del paquete permanece igual. Es necesario recalcar que la aplicación de ping tiene unas cabeceras de tamaño considerable comparadas con el tamaño de la carga útil.

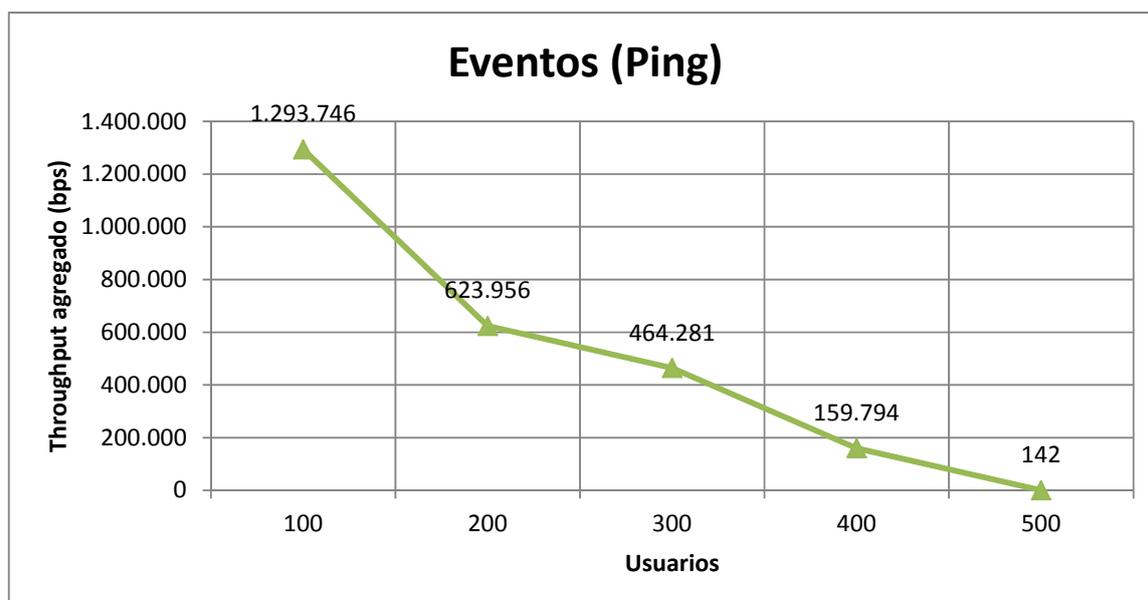


Figura 68 - Throughput en la simulación de eventos

6.2.2 Recursos

En el tráfico de recursos, simulado como el acceso a un archivo de 100 MB mediante la aplicación de FTP, se aprecia (Figura 69) un descenso en el throughput, de nuevo este fenómeno se debe al incremento de las colisiones en el medio compartido que aumenta los tiempos de entrega.

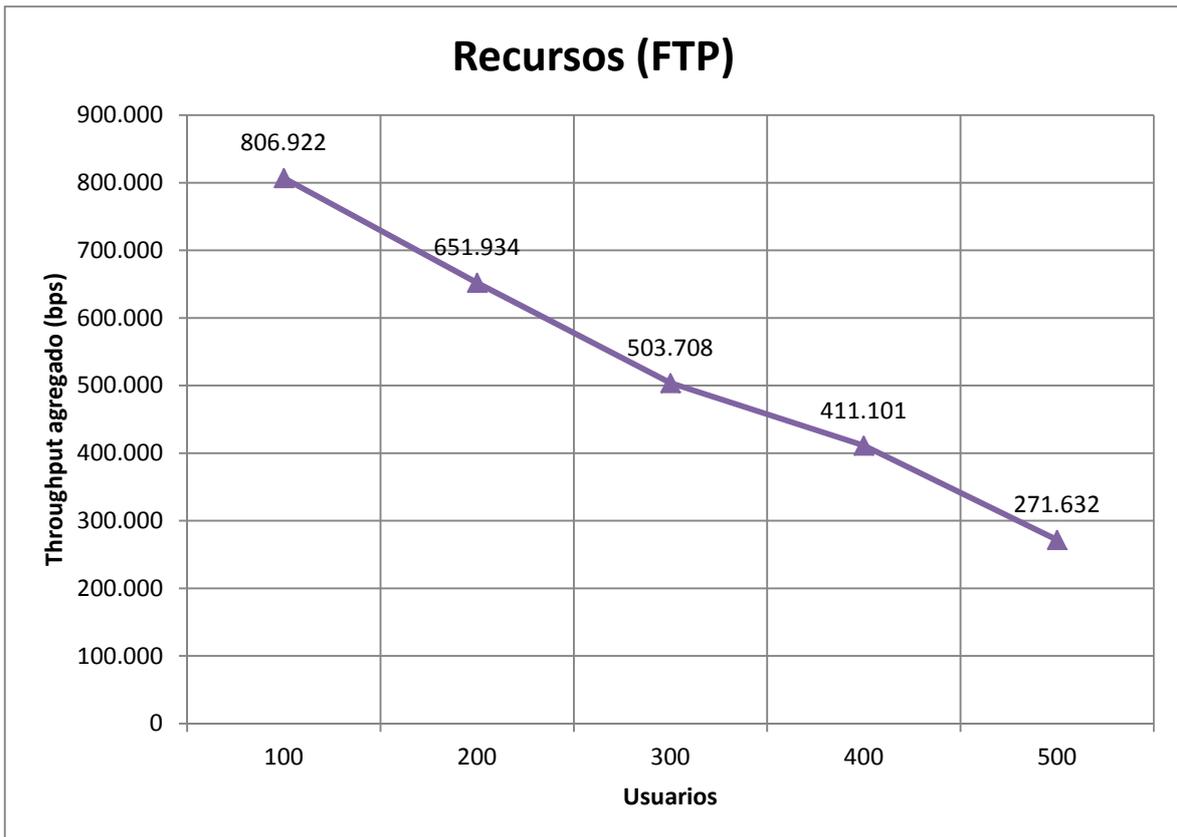


Figura 69 - Throughput en la simulación de recursos

6.2.3 Video

En la Figura 70 se pueden observar los datos obtenidos para la simulación de tráfico de video, mediante el uso de una aplicación de streaming. Es destacable el poco rendimiento evidenciado para el uso de video y la caída abrupta, debido a colisiones, que se produce en el rango de los 100 a los 200 usuarios.

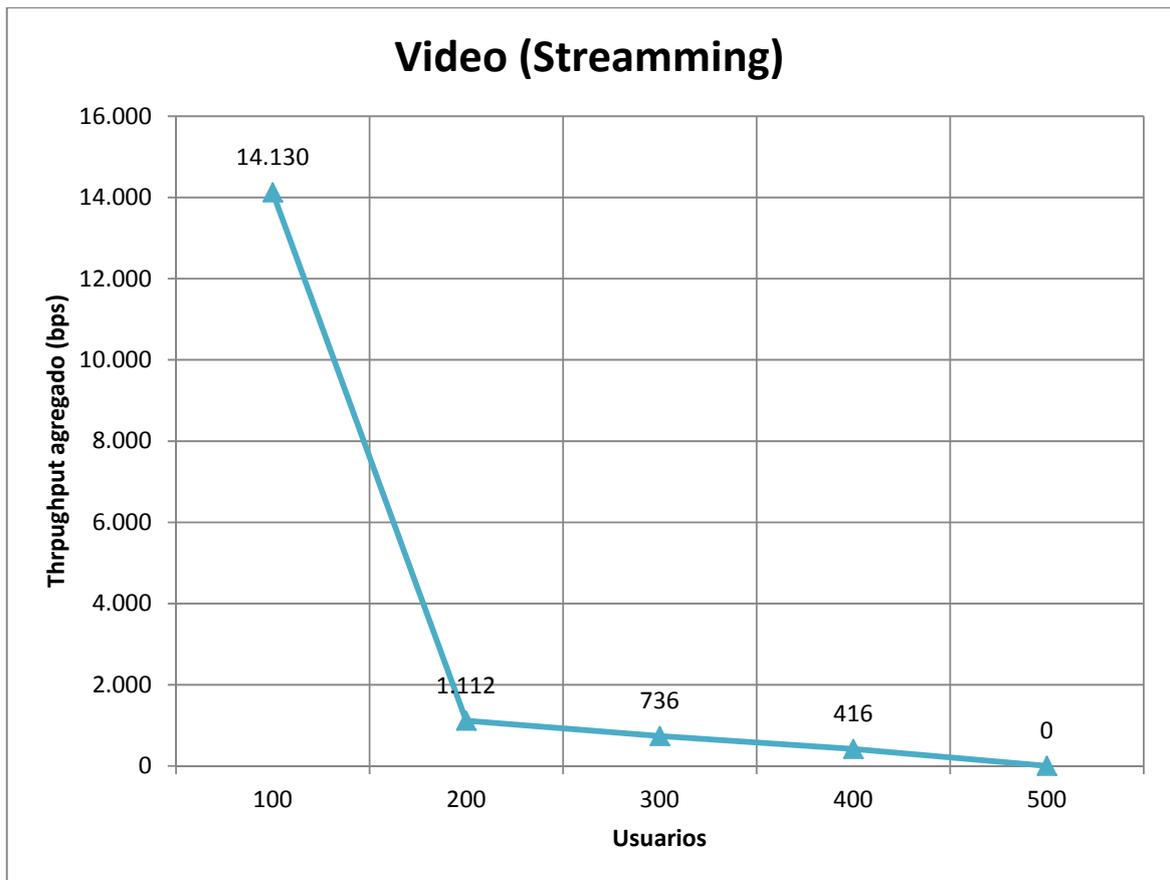


Figura 70 - Throughput en la simulación de video

6.2.4 Consolidado

Finalmente se presentan los datos consolidados en la Figura 71, donde se pueden apreciar los datos para los tres escenarios. Son destacables las diferentes tendencias de cambio (siendo para los eventos más pronunciada que para los otros) que se presentan en cada caso. Una posible explicación a este fenómeno está vinculada con la carga útil que lleva cada uno de los mensajes que se intercambian, estableciendo que la cantidad de carga útil por mensaje es mayor en la aplicación de video en streaming que en la aplicación de ping.

Además, si se compara el throughput con los requerimientos de capacidad para cada uno de los tipos tráfico evaluado, se evidencia el pobre desempeño en el caso de transmisión de video. Sin embargo, se puede argumentar que la mayor parte del tráfico esperado en una red para el canal de retorno se corresponde con eventos, seguidos con un porcentaje más reducido de tráfico de recursos.

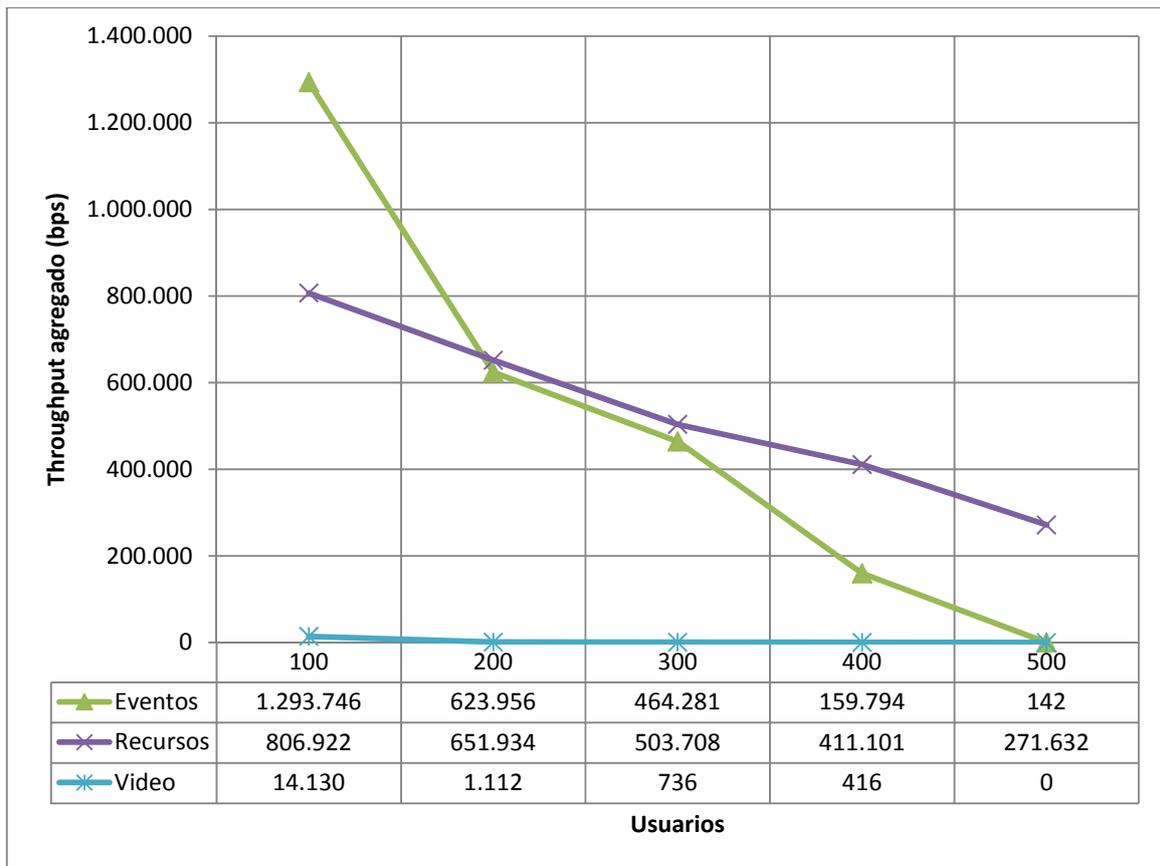


Figura 71 - Throughput en las simulaciones consolidado

CAPÍTULO VII – Conclusiones y futuros desarrollos

Una red WRAN como canal de retorno es viable tecnológicamente y conveniente en algunos emplazamientos de Colombia. La misma, puede ofrecer servicios de tráfico orientado a eventos, de acceso a recursos y de streaming que describen de forma acertada los tipos de tráfico esperados sobre un canal de retorno de televisión digital, sin embargo, esta limitado en la cantidad de usuarios que puede soportar en cada uno de los tipos de tráfico.

La tecnología IEEE 802.22 es una alternativa deseable para cubrir emplazamientos alejados de las cabeceras municipales, brinda una capacidad de transmisión que se puede considerar como banda ancha y además provee una cobertura extensa. Adicionalmente, contribuye a la optimización en el uso del espectro radioeléctrico y es un excelente complemento al despliegue de la televisión digital debido a su aprovechamiento de los espacios en blanco de las bandas UHF y VHF.

WRAN es una excelente alternativa cuando se tienen emplazamientos poblacionales dispersos y con pocos usuarios, además por sus características de propagación puede ser especialmente útil en terrenos montañosos, sin embargo, para dar servicio a otras localidades que no cumplen con estas características suele resultar una opción pobre que puede ser fácilmente remplazada o integrada con otra tecnologías de acceso de banda ancha.

Una alternativa integral que lleve servicios de banda ancha a todo el territorio nacional puede sustentarse sobre las tecnologías IEEE 802 logrando brindar acceso inalámbrico en todas las instancias de distribución poblacional. IEEE 802.22 puede ser la tecnología de acceso rural, mientras que IEEE 802.16 puede ser la alternativa para mayores concentraciones de población y a nivel local se puede optar por 802.11 y sus variaciones. Cabe anotar que el acceso inalámbrico es una parte pequeña del acceso total necesario para lograr llevar al país sobre una verdadera revolución digital.

En el caso colombiano, IEEE 802.22, puede ser una alternativa para lograr brindar una red de acceso a localidades alejadas, si a esto se le suma la amplia aceptación de la televisión como un medio masivo de comunicación y se integra las capacidades interactivas de la televisión digital, se obtiene una excelente vía a explotar para lograr una disminución de la brecha digital en esos lugares.

La brecha digital es un factor que puede resultar decisivo para el futuro del país y sus actividades económicas. La tecnología aquí presentada es un medio sugerido pero puede resultar de poco impacto si no se acompaña con contenidos de calidad y campañas comunitarias que logren integrar todo en un movimiento de apropiación de los medios digitales en las zonas apartadas dentro del territorio.

Para Colombia es fundamental la transición de la televisión analógica a la digital, y el presente trabajo busca dar una idea sobre las implicaciones y resultados que pueden obtenerse de este cambio. Llevar interactividad a los hogares, en especial a los más alejados, puede ser definitorio para la disminución de la brecha digital. La alternativa a nivel de país debe ser integral y por tal motivo es necesaria la inversión del capital público y privado para brindar una vía nacional que reúna a todos los colombianos sin importar su ubicación.

Finalmente, se presenta con IEEE 802.22 WRAN una de las opciones viables para brindar conectividad a todo el territorio, sin embargo, para el país se debe desarrollar una red que integre diferentes tecnologías. Una opción es integrar redes IEEE 802.22 como acceso a los residentes rurales de los municipios pequeños del país e IEEE 802.16 como red de acceso para las personas que habitan en municipios intermedios, todo esto apoyado en el acceso municipal por fibra óptica que plantea el Plan Vive Digital.

7.1 Desarrollos futuros

Entre los desarrollos futuros que siguen este trabajo se puede citar:

Ampliar las estructuras de simulación sobre Omnet++ de forma que integren el plano cognitivo logrando así una implementación completa del estándar IEEE 802.22 y así lograr una visión más precisa del desempeño de la tecnología.

Analizar las interferencias de canal adyacente y cocanal para determinar un comportamiento más exacto de la red en términos de cobertura e interferencia.

Realizar un prototipo de equipo de usuario IEEE 802.22 que sirva como receptor de televisión digital y que integre el canal de retorno sobre la tecnología.

Bibliografía

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2007). *Televisión digital terrestre - Sistema de transmisión*. ABNT.
- Advanced Television Systems Committee. (2007). *A/53: ATSC Digital Television Standard*. Washington: Advanced Television Systems Committee.
- Amarasinghe, A. T., Thelisinghe, L. A., Warnakulasuriya, G. M., & Samarasingue, A. T. (2009). *Comparison of propagation models for fixed WiMAX system based IEEE 802.16*. ICIS.
- Camargo Olivares, J. L., & Hornillo Mellado, S. (2011). *Modelo de cobertura para redes inalámbricas de interiores*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Carlos, B., Gustavo, L., Fernando, P., & Mónica, S. (2002). *Indicadores de la Sociedad del Conocimiento e Indicadores de Innovación, Vinculaciones e Implicaciones conceptuales y Metodologías* (Vol. v.01). Argentina: Miño y Dávila srl.
- Comisión Nacional de Televisión. (2008). *La Gran Encuesta de la Televisión en Colombia*. Ipsos.
- Commission of the European Communities and COST Telecommunications. (1999). *Cost 231 Final report. Digital mobil radio: COST 231 View on the evolution towards 3rd generation systems*. Brussels: Commission of the European Communities and COST Telecommunications.
- Coutinho, M. M., Lisboa Frances, C. R., & Costa, J. C. (2005). *CARIMBÓ – A Flexible Framework Proposal for the Return Path in Brazilian Digital Television*. InfoComp.
- Cucej, Z. (2008). *Digital Broadcasting and New Services*. Facta Universitatis (NIS).
- DANE. (2005). *Censo General*. Bogotá.
- DANE. (2010). *estimaciones de población 1985-2005 y proyecciones de población 2005-2020 nacional, departamental y municipal por sexo, grupos quinquenales de edad*. Bogotá.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2009). *Gran Encuesta Integrada de Hogares*. DANE.

- European Commission. (2011). *Broadband access in the EU*. Brussels: European Commission.
- European Telecommunication Standard Institute. (1998). *Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for Cable TV distribution systems*. Valbonne: ETSI.
- European Telecommunication Standard Institute. (2003). *Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for satellite distribution systems*. ETSI.
- European Telecommunications Standards Institute. (1997). *ETS -300 802, Digital Video Broadcasting (DVB); Network-independent protocols for DVB interactive services*. ETSI.
- European Telecommunications Standards Institute. (1997). *RT – 101 194, Digital Video Broadcasting (DVB); Guidelines for implementation and usage of the specification of network independent protocols for DVB interactive services*. ETSI.
- European Telecommunications Standards Institute. (2002). *Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for Digital Terrestrial Television (RCT) incorporating Multiple Access OFDM*. ETSI.
- European Telecommunications Standards Institute. (2002). *Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for Digital Terrestrial Television (RCT) incorporating Multiple Access OFDM*. ETSI.
- European Telecommunications Standards Institute. (2009). *Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television*. ETSI.
- European Telecommunications Standards Institute. (2010). *ETSI TS 121 101* . ETSI.
- European Telecommunications Standards Institute. (2011). *Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for DVB terrestrial services; Transmission aspects*. ETSI.
- European Telecommunications Standards Institute. (2012). *ETSI TS 121 101 - Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Technical Specifications and Technical Reports for a UTRAN-based 3GPP system (3GPP TS 21.101 version 10.2.0 Release 10)*. ETSI.

- Hacker, K., & Van Dijk, J. (2003). The Digital Divide as a Complex and Dynamic Phenomenon. *The Information Society*, v.19, 315–326.
- Hernández López, O., & Avilez Rosas, D. (2009). *Diseño de enlace para redes basadas en el estándar IEEE 802.16*. México DF: Instituto Politécnico Nacional.
- Hirakawa, A., Martucci, M., Zoeschg, A., & Bensi, E. (2007). *Architecture of the Return Channel*. SAMBA Project Documentation.
- HomePlug: Powerline Alliance. (2012). *HomePlug AV2: The Specification for NextGeneration Broadband Speeds over HomePlug*.
- IESE Business School. (2012). *Indicador de la Sociedad de la Información ISI – Everis /IESE*. Everis.
- Ikegami, F., Takeuchi, T., & Yoshida, S. (1991). *Theoretical prediction of mean field strength for urban mobile radio*. IEEE Trans. Antennas and Propagation.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2009). *IEEE 802.16: IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems*. IEEE.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2010). *802.22.1: IEEE Standard for Information Technology--Telecommunications and information exchange between systems--Local and metropolitan area networks--Specific requirements Part 22.1: Standard to Enhance Harmful Interference Protection for Low-Power*. IEEE.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2010). *IEEE 1901-2010: IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications*. IEEE.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2011). *802.22: IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Specific requirements-- Part 22: Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Policies and procedures for operat.* IEEE.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2011). *P802.11ad: IEEE Draft Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer*

(PHY) Specifications - Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz. IEEE.

Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2012). *IEEE 802.11: IEEE Standard for Information technology--Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks--Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Speci.* IEEE.

Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2012). *P802.11ac: IEEE Draft Standard for IT - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - LAN/MAN - Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications - Amd: Enhancements for Very High Throug.* IEEE.

Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2012). *P802.11af: Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Speci.* IEEE.

Institute of Electrical and Electronics Engineers. (209). *802.11n: IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Specific requirements-- Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC)and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughp.* IEEE.

International Telecommunication Union. (2010). *Applications of ITU-T G.9960, ITU-T G.9961 transceivers for Smart Grid applications: Advanced metering infrastructure, energy management in the home and electric vehicles.* ITU.

International Telecommunication Union. (2010). *Unified high-speed wire-line based home networking transceivers – System architecture and PHY layer specification.* ITU.

Ishak, S. B. (2006). *Outdoor Propagation Prediction and Measurement for WLAN application.* Malaysia: Universiti Teknologi Malaysia.

ISO. (1998). *Information technology - Open Systems Interconnection - Basic Reference Model: The Basic Model.* ISO.

Margalho, M., Teles, M., Ribeiro, M., Frances, R., & Weyl, J. (206). *An E-Gov application to monitoring children vaccination process in Amazonia using the*

Return Path of Digital Television. Santiago de Chile: First Iberoamerican Congress on e-Government.

- Martucci, M., Riyuiti Hirakawa, A., & de Oliveira Jatoba, P. L. (2008). SAMBA project: A test bed for PLC application as a digital inclusion tool. *Power Line Communications and Its Applications, 2008. ISPLC 2008. IEEE International Symposium on* (págs. 285 - 288). Jeju city, Jeju Island: IEEE.
- Mayora Ibarra, O., Gabos, D., Furtado, E., Cavaliere, R., Pascalicchio, A. C., & Filev Maia, R. (2007). *A framework for community-oriented interactive digital television*. Scientific Association for Infocommunications (HTE).
- Meloni, L. G. (2008). *Return Channel for the Brazilian Digital Television System-Terrestrial*. Campinas: State University of Campinas.
- Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones . (2011). *Vive Digital Colombia - Documento Vivo del Plan*.
- Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (8 de Octubre de 2011). *mintic.gov.co*. Recuperado el 29 de Abril de 2012, de *mintic.gov.co*: <http://www.mintic.gov.co/>
- Naciones Unidas. (2010). Resolución aprobada por la Asamblea General - Cumplir la promesa: unidos para lograr los Objetivos. *Asamblea General - 9ª sesión plenaria*, (pág. 32).
- Núñez Clemente, D. (2006). *Simulación de una Red de Telefonía Móvil GSM mediante el Entorno de Simulación OMNET++*. Universidad de Alcalá.
- Polo, E. I., Hirakawa, A. R., & Junior, M. M. (2007). PLC as a return channel for interactive digital TV. *Communications and Networking in China, 2007. CHINACOM '07. Second International Conference on* (págs. 707 - 711). Shanghai: IEEE.
- Polo, E. I., Maia, R. F., Martucci, M., & Hirakawa, A. R. (2009). AMBA project: Performance analysis of PLC network as return channel for interactive digital television applications. *Power Line Communications and Its Applications, 2009. ISPLC 2009. IEEE International Symposium on* (págs. 337 - 341). Dresden: IEEE.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo – PNUD. (2009). *Informe sobre desarrollo humano para Mercosur 2009-2010, Innovar para incluir: jóvenes y desarrollo humano*. Libros del Zorzal: Programa Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD. (2011). *Informe sobre desarrollo humano 2011 - Sostenibilidad y equidad: Un mejor futuro para todos*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.

Sistema de Naciones Unidas en Colombia y Departamento Nacional de Planeación. (2006). *Hacia una Colombia equitativa e incluyente*. Bogotá.

Treviño Cortés, J. T. (2003). *Propagación de RF en las bandas: LF, MF, HF, VHF, UHF y VHF*. Puebla: Universidad de las Américas Puebla.

Walfisch, J., & Bertoni, H. L. (1988). *A theoretical model of UHF propagation in urban environments*. IEEE Trans. Antennas and Propagation.