



Universitat  
Autònoma  
de Barcelona



# **DESPLIEGUE Y ANÁLISIS DE LA COBERTURA DE UNA RED WiMAX BASADA EN IEEE 802.16-2004**

Memoria del Proyecto Final de Carrera de  
Ingeniería en Telecomunicación

Realizado por

Albert Anglès Vázquez

y dirigido por

José López Vicario y Gonzalo Seco  
Granados

Bellaterra, 16 de Junio de 2008



El abajo firmante, José López Vicario.

Profesor de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la UAB,

**CERTIFICA:**

Que el trabajo a que corresponde esta memoria ha sido realizado bajo su  
dirección por: Albert Anglès Vázquez

Y por tanto para que conste firma la presente.

Firma: .....

Bellaterra, 16 de Junio de 2008



*Dedico este proyecto, en primer lugar, a mis queridos padres, a mis dos hermanas, a mi cuñado y a mi futuro sobrino que nacerá a finales de Agosto. También se lo dedico a mis amigos Carlos Cisneros, Joan Aguilar, Marc Alsinella, Oscar Moyano y Silvia Rodríguez que nunca los olvidaré ya que durante mi proyecto me han hecho pasar momentos divertidos. También quiero dedicar el proyecto a mis compañeros de piso Albert, Marta, Joan Carles, Roser y Isabel que nunca me dejaban trabajar por las noches. También se dedica este proyecto a mis mejores amigos de la técnica: Simó, Kim, Toni, Ovi y por supuesto Sonia Cárdenas.*

*Por último también se lo dedico a mis mejores amigas pesadas Lara, María y a Ana que no me dejaban estar concentrado en las clases.*



# AGRADECIMIENTOS

Este proyecto tan interesante ha sido realizado gracias en primer lugar a José López Vicario, por ser mi “guía” de proyecto y en segundo lugar a Gonzalo Seco Granados por confiar en mi para el desarrollo del proyecto InterRural del MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO. Gracias a ellos porque me permitieron continuar con la investigación sobre la cobertura WiMAX en el campus universitario.

También quiero agradecer a los doctores Dr. José López Salcedo, Dr. Josep Parrón Granados y Dr. Pedro Antonio de Paco Sánchez porque me han resuelto algunos problemas que he tenido en algunos momentos concretos.

Por último, agradezco también a todas las entidades que hayan estado investigando sobre WiMAX y que resultados hayan sido publicados en revistas y artículos.



# ÍNDICE

<b>LISTADO DE FIGURAS .....</b>	<b>iii</b>
<b>LISTADO DE TABLAS .....</b>	<b>vii</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Organización .....	3
<b>2 INTRODUCCIÓN A WiMAX .....</b>	<b>5</b>
2.1 Descripción general de WiMAX o IEEE 802.16.....	5
2.2 Características principales .....	9
2.2.1 En la capa física.....	9
2.2.2 En la capa MAC .....	10
2.3 Descripción a nivel físico.....	11
2.3.1 Slot y estructura de trama.....	11
2.3.2 Multiplexación por división de frecuencias ortogonales.....	14
2.3.3 Modulación y codificación adaptativa .....	19
2.3.4 Técnicas de múltiples antenas .....	24
2.4 Descripción a nivel de MAC .....	28
<b>3 ARQUITECTURA DE LA RED WiMAX.....</b>	<b>31</b>
3.1 Descripción de la estación base WiMAX.....	33
3.2 Descripción de los equipos WiMAX de abonado (CPE).....	37
3.2.1 Terminal WiMAX portable Self- Install CPE.....	37
3.2.2 Terminal WiMAX de emplazamiento fijo (IDU-CPE-1D2V SIP-RJ) .....	40
3.3 Interfaz de control y gestión de la red WiMAX.....	43
3.3.1 Protocolo SNMP ( <i>Simple Network Management Protocol</i> ) .....	46
3.4 Configuración básica de la estación base WiMAX.....	48

<b>4</b>	<b>CAMPAÑA DE MEDIDAS.....</b>	<b>51</b>
4.1	Estado de Arte .....	52
4.2	Descripción de los escenarios .....	56
4.2.1	Escenario <i>indoor</i> .....	56
4.2.2	Escenario semi-rural ( <i>outdoor</i> ) .....	58
4.2.3	Escenario semi-urbano ( <i>outdoor</i> ).....	61
4.3	Resultados de cobertura WiMAX.....	63
4.3.1	Modelización de la propagación en <i>indoor</i> y <i>outdoor</i> .....	63
4.3.2	En escenario semi-urbano .....	69
4.3.3	En escenario semi-rural.....	82
4.3.4	En escenario <i>indoor</i> .....	90
<b>5</b>	<b>DEMOSTRACIÓN DEL PROYECTO INTERRURAL .....</b>	<b>105</b>
5.1	Estado de arte .....	105
5.2	Descripción del demostrador .....	109
5.3	Arquitecturas.....	110
5.3.1	Arquitectura satélite .....	110
5.3.2	Arquitectura WiFi .....	114
5.3.3	Arquitectura WiMAX .....	117
5.4	Descripción del escenario .....	117
5.5	Medidas obtenidas.....	120
5.5.1	Medidas del enlace vía satélite.....	120
5.5.2	Medidas WiMAX.....	121
5.5.3	Medidas WiFi.....	121
5.5.4	Comparativa de WiMAX y WiFi 802.11a .....	122
5.6	Conclusiones del proyecto InterRural.....	124
5.7	Divulgación del proyecto InterRural.....	125
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>127</b>
<b>7</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>129</b>

## LISTADO DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> Aplicación de WiMAX [Abi06] .....	7
<b>Figura 2.2</b> Estructura de trama TDD para WIMAX fijo [IEEE04] .....	12
<b>Figura 2.3</b> Estructura de trama TDD para WiMAX móvil [And07].....	13
<b>Figura 2.4</b> Comparación entre FDM i OFDM [Sha05] .....	16
<b>Figura 2.5</b> Tres subportadoras ortogonales mostradas separadamente.....	16
<b>Figura 2.6</b> Sincronización perfecta. Espectro OFDM sin ICI con 5 subportadoras.....	17
<b>Figura 2.7</b> Sincronización perfecta. Espectro OFDM con ICI con 5 subportadoras. ...	17
<b>Figura 2.8</b> Relación BER vs SNR y los correspondientes umbrales SNR de los N esquemas de modulación y codificación utilizados por AMC. [Roc07].....	20
<b>Figura 2.9</b> Modelo del sistema AMC [Gol05].....	21
<b>Figura 2.10</b> Modulación i codificación adaptativa [W.Ho04] .....	23
<b>Figura 2.11</b> <i>Space-Time Block Coding</i> STBC [White Paper.Motorola] .....	25
<b>Figura 2.12</b> Beamforming en WiMAX [White Paper.Motorola] .....	26
<b>Figura 2.13</b> Esquema de Multiplexación Espacial-MIMO [White Paper.Motorola]....	27
<b>Figura 2.14</b> Esquema de multiplexación especial básico con tres antenas en transmisión y tres en recepción [Ges03].....	27
<b>Figura 2.15</b> Ejemplos de varias de tramas MAC PDU [And07] .....	29
<b>Figura 3.1</b> Arquitectura WiMAX 802.16-2004 desplegada .....	32
<b>Figura 3.2</b> Micro Estación Base BreezeMAX Alvarion.....	33
<b>Figura 3.3</b> Unidad de antena <i>outdoor</i> , AU-ODU .....	35
<b>Figura 3.4</b> Antena omnidireccional de 10 dBi .....	35
<b>Figura 3.5</b> Antena sectorial de 14.5 dBi. Vista frontal.....	35
<b>Figura 3.6</b> Antena sectorial de 14.5 dBi. Vista trasera.....	35
<b>Figura 3.7</b> Terminal WiMAX <i>indoor</i> Si-CPE .....	38
<b>Figura 3.8</b> Terminal WiMAX <i>indoor</i> IDU-1D2V .....	41
<b>Figura 3.9</b> Unidades <i>outdoor</i> . PRO-S-CPE, modelos SA y SE.....	41
<b>Figura 3.10</b> Arquitectura WiMAX [Not1] .....	43
<b>Figura 3.11</b> Gestión de la <i>air interface</i> con BreezeLITE.....	46
<b>Figura 3.12</b> Pestaña General de la estación base.....	49
<b>Figura 3.13</b> Parámetros configurados de la <i>Air Interface</i> de la estación base.....	49
<b>Figura 3.14</b> Potencia de transmisión configurada (el máximo es de 28 dBm).....	50
<b>Figura 3.15</b> Configuración de la frecuencia de transmisión en el canal de bajada. ....	50
<b>Figura 3.16</b> Configuración de red de la estación base.....	50
<b>Figura 4.1</b> Vista frontal del edificio Q6 .....	56
<b>Figura 4.2</b> Vista lateral (1) del edificio Q6 .....	57

<b>Figura 4.3</b> Vista lateral (2) del edificio Q6 .....	57
<b>Figura 4.4</b> Arquitectura de la planta 2.....	57
<b>Figura 4.5</b> Arquitectura de la planta 1.....	58
<b>Figura 4.6</b> Arquitectura de la planta 0.....	58
<b>Figura 4.7</b> Estructura 3D del edificio y sus medidas correspondientes .....	58
<b>Figura 4.8</b> Indicación de los puntos de medida en escenario semi-rural abrupto.....	59
<b>Figura 4.9</b> Indicación de los puntos de medida en escenario semi-rural suave.....	60
<b>Figura 4.10</b> Perfil del terreno para los dos escenarios que se analizan en la sección 4.3.3 .....	61
<b>Figura 4.11</b> Indicación de los puntos de medida en escenario semi-urbano .....	62
<b>Figura 4.12</b> Las condiciones de propagación en los actuales servicios de comunicaciones móviles son el resultado de la superposición de múltiples reflexiones y difracciones. ....	64
<b>Figura 4.13</b> El efecto <i>shadowing</i> causa elevadas fluctuaciones sobre el modelo de <i>pathloss</i> produciéndose atenuaciones o ganancias en la señal recibida. [And07] .....	67
<b>Figura 4.14</b> <i>Fast fading</i> : diferencia temporal entre la interferencia constructiva y la interferencia destructiva [And07] .....	67
<b>Figura 4.15</b> Potencia recibida medida con las dos tipos diferentes de antenas del terminal WiMAX en función con la distancia a la BS .....	71
<b>Figura 4.16</b> Exponente de <i>path loss</i> en función de la altura de la estación base respecto el terreno, para los diferentes tipos de terreno. [Afr07] .....	73
<b>Figura 4.17</b> Potencia recibida empírica y distintos modelos empíricos versus distancia. Terminal empleado: Antena directiva.....	75
<b>Figura 4.18</b> Potencia recibida empírica y distintos modelos empíricos versus distancia. Terminal empleado: antena omniazimutal.....	75
<b>Figura 4.19</b> Pérdidas empíricas y modelos distintos de <i>path loss</i> versus distancia. Terminal empleado: antena directiva.....	76
<b>Figura 4.20</b> Pérdidas empíricas y modelos distintos de <i>path loss</i> versus distancia. Terminal empleado: antena omniazimutal.....	76
<b>Figura 4.21</b> Potencia recibida empírica y modelo empírico versus distancia Terminal empleado: Antena directiva.....	77
<b>Figura 4.22</b> Potencia recibida empírica y modelo empírico versus distancia. Terminal empleado: antena omniazimutal.....	77
<b>Figura 4.23</b> Pérdidas empíricas y modelos distintos de <i>path loss</i> versus distancia. Terminal empleado: Antena directiva.....	77
<b>Figura 4.24</b> Pérdidas empíricas y modelos distintos de <i>path loss</i> versus distancia. Terminal empleado: Antena omniazimutal .....	77
<b>Figura 4.25</b> Potencia recibida empírica y modelo empírico versus distancia a la BS. Terminal empleado: Antena directiva.....	79
<b>Figura 4.26</b> Potencia recibida empírica y modelo empírico versus distancia a la BS. Terminal empleado: Antena omniazimutal .....	79
<b>Figura 4.27</b> Potencia recibida empírica y modelo empírico versus distancia a la BS. Terminal empleado: Antena directiva.....	80
<b>Figura 4.28</b> Potencia recibida empírica y modelo empírico versus distancia a la BS. Terminal empleado: Antena omniazimutal .....	80
<b>Figura 4.29</b> Resultados de cobertura WiMAX en entorno semi-urbano .....	81

<b>Figura 4.30</b> Resultado de cobertura WiMAX en entorno semi-rural abrupto.....	82
<b>Figura 4.31</b> Potencia recibida empírica y modelo empírico versus distancia a la BS. Terminal empleado: Antena directiva.....	84
<b>Figura 4.32</b> Potencia recibida empírica y modelo empírico versus distancia a la BS. Terminal empleado: Antena omniazimutal .....	84
<b>Figura 4.33</b> Pérdidas empíricas y modelo simplificado de <i>path loss</i> versus distancia a la BS. Terminal empleado: Antena directiva.....	85
<b>Figura 4.34</b> Pérdidas empíricas y modelo simplificado de <i>path loss</i> versus distancia a la BS. Terminal empleado: Antena omniazimutal.....	85
<b>Figura 4.35</b> Potencia recibida empírica y modelo empírico versus distancia a la BS. Terminal empleado: Antena directiva.....	86
<b>Figura 4.36</b> Potencia recibida empírica y modelo empírico versus distancia a la BS. Terminal empleado: Antena omniazimutal .....	86
<b>Figura 4.37</b> Pérdidas empíricas y modelo simplificado de <i>path loss</i> versus distancia a la BS. Terminal empleado: Antena directiva.....	86
<b>Figura 4.38</b> Pérdidas empíricas y modelo simplificado de <i>path loss</i> versus distancia a la BS. Terminal empleado: Antena omniazimutal.....	86
<b>Figura 4.39</b> Resultado de cobertura WiMAX en entorno semi-rural suave.....	87
<b>Figura 4.40</b> Potencia recibida empírica y modelo empírico versus distancia a la BS. Terminal empleado: Antena directiva.....	89
<b>Figura 4.41</b> Potencia recibida empírica y modelo empírico versus distancia a la BS. Terminal empleado: Antena omniazimutal .....	89
<b>Figura 4.42</b> Definición de las posiciones NLOS de medida.....	90
<b>Figura 4.43</b> Comparativa entre la predicción del modelo de potencia recibida (azul) y las potencias recibidas medidas (puntos en rojo) .....	97
<b>Figura 4.44</b> Indicaciones de las posiciones de medida en la planta 2 y la planta 1 del edificio.....	100
<b>Figura 5.1</b> Arquitectura de red del demostrador.....	109
<b>Figura 5.2</b> Arquitectura de red satélite.....	111
<b>Figura 5.3</b> Unidad exterior .....	112
<b>Figura 5.4</b> Panel trasero del terminal de red con sus interfaces .....	112
<b>Figura 5.5</b> Terminal de satélite “Nera Satlink 1901” .....	113
<b>Figura 5.6</b> Arquitectura WiFi 802.11a/b/g .....	115
<b>Figura 5.7</b> Punto de acceso Orinoco AP4000R .....	115
<b>Figura 5.8</b> Antena sectorial 5.x GHz.....	117
<b>Figura 5.9</b> Antena panel 5.x GHz.....	117
<b>Figura 5.10</b> Antena omnidireccional 2.4 GHz .....	117
<b>Figura 5.11</b> Esquema completo del demostrador del proyecto InterRural.....	118
<b>Figura 5.12</b> Antena omnidireccional de la estación base WiMAX.....	118
<b>Figura 5.13</b> Localizaciones exactas del demostrador en el campus de la UAB.....	119
<b>Figura 5.14</b> Configuración del terminal de satélite .....	120
<b>Figura 5.15</b> Enlace descendente ( <i>forward</i> ) (aproximadamente 1Mbps) .....	121
<b>Figura 5.16</b> Enlace ascendente ( <i>return</i> ) (aproximadamente 256Kbps) .....	121
<b>Figura 5.17</b> Demostración a tve1 de una videoconferencia con WiMAX a una distancia de 1.3 Km de la BS .....	125
<b>Figura 5.18</b> Divulgación del proyecto InterRural en el periódico.....	126



## LISTADO DE TABLAS

<b>Tabla 2.1</b> Características básicas de los diferentes estándares WiMAX[And07].....	8
<b>Tabla 2.2</b> Ventajas y desventajas de OFDM [Yan05] .....	17
<b>Tabla 2.3</b> Parámetros OFDM utilizados en WiMAX. Los valores en negrita se corresponden a aquellos de perfiles de sistema WiMAX iniciales [And07]......	19
<b>Tabla 2.4</b> Esquemas de modulación y codificación soportados por WiMAX [And07] .....	22
<b>Tabla 2.5</b> Velocidad de datos de capa física a diferentes anchos de banda [And07]... ..	23
<b>Tabla 3.1</b> Especificaciones radio de la micro estación base BreezeMAX 3000. ....	36
<b>Tabla 3.2</b> Especificaciones radio del terminal WiMAX SI-CPE.....	39
<b>Tabla 3.3</b> Especificaciones de la antena externa para el SI-CPE.....	39
<b>Tabla 3.4</b> Especificaciones radio del terminal WiMAX PRO-S-CPE .....	42
<b>Tabla 4.1</b> Datos de las posiciones de medida en el escenario de la figura 4.8 .....	60
<b>Tabla 4.2</b> Datos de las posiciones de medida en el escenario de la figura 4.9 .....	61
<b>Tabla 4.3</b> Datos de las posiciones de medida en el escenario de la figura 4.8 .....	62
<b>Tabla 4.4</b> Parámetros del radioenlace medidos con la antena directiva. Escenario semi-urbano.....	70
<b>Tabla 4.5</b> Parámetros del radioenlace medidos con la antena omniazimutal. Escenario semi-urbano .....	70
<b>Tabla 4.6</b> Valores numéricos de los coeficientes a,b y c del modelo .....	72
<b>Tabla 4.7</b> Valores de $\gamma$ para las distintas categorías de terreno .....	73
<b>Tabla 4.8</b> Parámetros del radioenlace medidos con la antena directiva. Escenario semi-rural abrupto .....	83
<b>Tabla 4.9</b> Parámetros del radioenlace medidos con la antena omniazimutal. Escenario semi-rural abrupto .....	84
<b>Tabla 4.10</b> Parámetros del radioenlace en condiciones LOS/NLOS a una distancia de la BS de 100m .....	86
<b>Tabla 4.11</b> Calidad del canal en distintas posiciones empleando el terminal de antena directiva .....	88
<b>Tabla 4.12</b> Calidad del canal en distintas posiciones empleando el terminal de antena omniazimutal.....	88
<b>Tabla 4.13</b> Parámetros físicos de canal obtenidos a distancias equiespaciadas en escenario LOS.....	92
<b>Tabla 4.14</b> Parámetros físicos de canal obtenidos a las posiciones de la figura 4.42. Escenario NLOS.....	92
<b>Tabla 4.15</b> Parámetros físicos de canal obtenidos a diferentes distancias de la BS en entorno LOS. ....	95

<b>Tabla 4.16</b>	Parámetros físicos de canal obtenidos a una distancia de 8.8m.....	97
<b>Tabla 4.17</b>	Pérdidas de propagación para las tres.....	98
<b>Tabla 4.18</b>	Comparativa y error absoluto entre los dos modelos de predicción .....	99
<b>Tabla 4.19</b>	Resultados obtenidos con el terminal Self-Install en distintas posiciones de la planta 2 y la planta 1 del edificio Q6 .....	101
<b>Tabla 4.20</b>	Análisis de la atenuación causada por otras particiones que separan el pasillo de la sala de la BS.....	102
<b>Tabla 4.21</b>	Resultados de campo obtenidos en cada una de las posiciones de la figura 4.44.....	103
<b>Tabla 5.1</b>	Elementos de conexión del panel trasero. ....	113
<b>Tabla 5.2</b>	Especificaciones del terminal Nera SatLink.....	114
<b>Tabla 5.3</b>	Especificaciones técnicas del punto de acceso Orinoco AP4000R .....	116
<b>Tabla 5.4</b>	Coordenadas y otras indicaciones de los puntos de interés mostrados ....	119
<b>Tabla 5.5</b>	Parámetros del radio enlace WiMAX obtenidos en la posición 1 del mapa de la figura 5.13 empleando el terminal de usuario outdoor PRO-DMe-SA.....	121
<b>Tabla 5.6</b>	Parámetros del radioenlace WiFi 802.11a y WiFi 802.11g obtenidos en la posición 1 del mapa de la figura 5.13 .....	122
<b>Tabla 5.7</b>	Comparativa entre WiFi 802.11 y WiMAX 802.16.....	124

# 1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo pretende introducir al lector la idea principal del proyecto con título “Despliegue y análisis de la cobertura de una red WiMAX<sup>1</sup> basada en IEEE 802.16-2004”, cuales son los objetivos que se han llevado a cabo y cómo se encuentra estructurado.

## 1.1 Motivación

Poder estudiar y evaluar la cobertura y prestaciones de esta nueva tecnología de banda ancha capaz de ofrecer coberturas superiores a las de WiFi y velocidades mayores a que la mayoría de las líneas DSL<sup>2</sup> ha sido la motivación de este proyecto.

La cobertura de una sola estación base WiMAX permite dar servicio a un gran número de usuarios dispersos por diversas zonas hasta 40Km. Esta tecnología ya se aplica en algunas zonas rurales en el que establecer cobertura de otras tecnologías no resulta rentable debido a los elevados costes que supondrían el despliegue de la red a causa de un difícil acceso o debido al poco número de usuarios.

---

<sup>1</sup> *World Interoperability for Microwave Access*

<sup>2</sup> *Digital Subscriber Line*

## 1.2 Objetivos

El principal objetivo de este proyecto experimental se basa en realizar una campaña de medidas de cobertura de una micro estación base WiMAX, descrita en el capítulo 3 basada en la variante de acceso fijo IEEE 802.16-2004, antiguamente conocida como IEEE 802.16d para obtener modelos de propagación reales en diferentes escenarios. Además, este proyecto ha formado parte de un proyecto PROFIT aprobado por el MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO con referencia FIT-330210-2007-57 mencionado *InterRural* en el que participaron varias empresas (Hispasat, Telefónica I+D, Iber-X y Gige) y la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB). El proyecto InterRural consta de dos fases:

- En la primera fase ya desarrollada se ha comparado la calidad que se obtiene de algunos servicios multimedia empleando las dos tecnologías radio WiMAX y WiFi 802.11a en entornos con y sin visión directa entre las antenas transmisora y receptora.
- La segunda fase del proyecto prevista para el año siguiente estudiará la viabilidad de una tecnología acceso de banda ancha por la red eléctrica conocida como PLC<sup>3</sup> Esta tecnología es capaz de ofrecer velocidades del orden de 100 Mbps.

Para llevar a cabo este proyecto se ha realizado la instalación de una estación base (BS<sup>4</sup>) WiMAX 802.16-2004 a la banda de los 3.5 GHz con una sola antena omnidireccional de 10 dBi de ganancia para las respectivas pruebas de cobertura en *outdoor* y una antena sectorial de 17.5 dBi de ganancia para pruebas de cobertura en *indoor*. La BS se localiza en la esquina superior de la espina Q6 de la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria (ETSE) del campus de la UAB. Se utiliza una topología punto-multipunto o PTMP<sup>5</sup> para dar servicio a tres terminales WiMAX, también descritos en el capítulo 3.

El primer terminal es un *Self-Install* de sobremesa y de pequeñas dimensiones diseñado para uso exclusivo en interiores de edificios con 6 antenas integradas y cobertura de 360°. Los otros dos terminales WiMAX necesitan el soporte de una antena externa sujeta a un mástil en la cubierta de un edificio, cosa que requiere los servicios de un técnico especializado. Sin

---

<sup>3</sup> Power Line Connection

<sup>4</sup> Base Station

<sup>5</sup> Point-to-Multipoint

embargo en el proyecto no se han tomado medidas instalando la antena del terminal en la cubierta de un edificio sino que se han tomado medidas en diferentes zonas del campus a una altura sobre el terreno menor de 1.8m.

En las medidas de cobertura se incluyen el *throughput*, la SNR, la potencia recibida y la potencia transmitida. Esta se muestra para los enlaces de *uplink* o subida (SS<sup>6</sup>->BS) y de *downlink* o bajada (BS->SS). Las medidas obtenidas han servido para obtener modelos de propagación empíricos en diferentes escenarios descritos en el capítulo 4.

### 1.3 Organización

Este proyecto esta organizado de la siguiente manera:

El capítulo 2 es una introducción a WiMAX.

El capítulo 3 describe los equipos que se han empleado, la estación base con sus antenas y los 3 terminales WiMAX.

En el capítulo 4 se explican y se muestran los resultados de cobertura de la campaña de medudidas tanto en *indoor* como en *outdoor*.

En el capítulo 5 se presenta la primera fase del proyecto InterRural.

Y por último, en el capítulo 6 se describen las conclusiones generales de este proyecto.

---

<sup>6</sup> *Subscriber Station*



## 2 INTRODUCCIÓN A WiMAX

### 2.1 Descripción general de WiMAX o IEEE 802.16

La rápida revolución de las telecomunicaciones ha permitido la aparición de tecnologías digitales de banda ancha para ofrecer acceso a Internet a velocidades considerables vía cable (DSL, Cable-Modem) y vía radio (3G o UMTS<sup>7</sup>). La aparición es debida al hecho de que cada vez hay y ha habido más organizaciones, escuelas, empresas y zonas residenciales donde el acceso a Internet es primordial, ya sea por temas de negocio, académicos o de ocio, hecho que hace que aumente la cantidad de usuarios que se quieren conectar. Es por esta razón que se tuvo que aumentar el ancho de banda de los sistemas para poder soportar la conectividad de más usuarios a altas velocidades. No obstante, el acceso a Internet con estas tecnologías se abastece principalmente a zonas con una alta densidad de población y probabilidad elevada de frutos económicos como por ejemplo las ciudades, un objetivo principal de los proveedores de servicios. Esto significa que aquellos sitios con escasa densidad de población, apartados de la ciudad y también de las centralitas de los mismos proveedores, no podrán aprovechar los beneficios de las tecnologías anteriores debido al elevado coste del cableado. Este es el caso de las zonas rurales, por ejemplo.

Quizás se podría pensar que una posible alternativa para evitar el cable en la última milla sería el acceso por UMTS; la respuesta es que no, y esto es debido por la principal razón de que el coste de una BS de UMTS es mayor que la de una BS de WiMAX, Además del elevado precio que supone mantener licencias de bandas frecuenciales para UMTS.

Para hacer frente a estos inconvenientes y poder proporcionar conectividad a Internet, principalmente en las zonas rurales, a alta velocidad, se creó en el año 1998 el grupo de IEEE

---

<sup>7</sup> Universal Mobile Telecommunications System

802.16 para poder desarrollar un estándar en el que permitía desarrollar un sistema *wireless* de banda ancha basado en la topología punto-multipunto con visión directa (LOS<sup>8</sup>) en la banda de operación de 10 GHz-66GHz. Este estándar aceptado en Diciembre del 2001, se basaba en una sola portadora en la capa física y con multiplexación por división de frecuencia (TDM<sup>9</sup>) en la capa de control de acceso al medio (MAC<sup>10</sup>). El inconveniente de este estándar es la utilización de una sola portadora para la transmisión y frecuencias de portadoras extremadamente altas, hecho que limitaba a aplicaciones de conectividad fija. Con el tiempo el grupo de IEEE 802.16 produjo subsecuentemente 802.16a como un arreglo al estándar 802.16 para permitir aplicaciones sin visión directa en la banda de 2GHz-11GHz, uso de múltiples subportadoras OFDM<sup>11</sup>, topologías punto-multipunto y en malla y una amplia variedad de canales con diferentes anchos de banda. Estas mejoras se reflejan en dos nuevos estándares o revisiones del estándar original IEEE 802.16a: el estándar IEEE 802.16-2004 conocido como WiMAX fijo (en el resto del documento se referirá a WiMAX) y el estándar IEEE 802.16e-2005 conocido como WiMAX móvil. Tanto una como la otra no requieren LOS dado que operan en bandas de frecuencias más bajas que la primera variante de WiMAX 802.16.

IEEE 802.16-2004 es una de las futuras revisiones de IEEE 802.16a que opera a la misma banda frecuencial y también utiliza OFDM para transmitir múltiples símbolos a usando 256 subportadoras. Esta variante es una especificación de IEEE 802.16d o WiMAX fijo ya que se creó con el objetivo de dar cobertura a emplazamientos fijos. Cuando se dice especificación se refiere a que IEEE 802.16d fue adoptado por WiMAX Forum, una organización que se creó con la finalidad de permitir la interoperabilidad entre equipos de diferentes fabricantes. WiMAX Forum es una organización industrial sin ánimo de lucro formada a partir de operadores de telecomunicaciones y compañías de componentes y equipamientos para certificar y promover la compatibilidad e interoperabilidad de los productos de banda ancha basados en el estándar IEEE 802.16. Uno de los principales objetivos de este organismo es acelerar la introducción de estos sistemas en el mercado.

La figura 2.1 muestra una de las aplicaciones de WiMAX en el que una estación base puede dar servicio en un distrito empresarial, en una área residencial y a vehículos en movimiento en su celda.

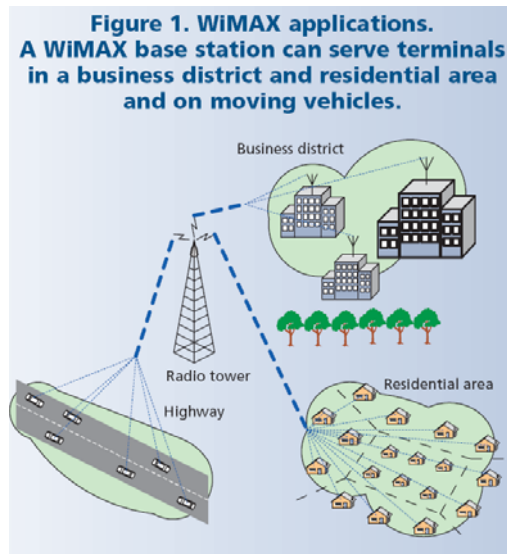
---

<sup>8</sup> Line Of Sight

<sup>9</sup> Time Division Multiplexed

<sup>10</sup> Medium Access Control

<sup>11</sup> Orthogonal frequency division multiplexing



**Figura 2.1** Aplicación de WiMAX [Abi06]

IEEE 802.16e-2005 o WiMAX móvil se puede considerar como una mejora de su predecesor, el IEEE 802.16-2004 ya que permite dar cobertura no tan solo fija sino también móvil en el sentido que los usuarios móviles pueden mantener la comunicación sin que se perciba el cambio de asociación entre estaciones base por medio del procedimiento de *handover*. La diferencia a nivel físico entre WiMAX fijo y WiMAX móvil es el número de subportadoras utilizadas para modular los símbolos de información. Como ya se ha dicho, IEEE 802.16-2004 solamente soporta 256 subportadoras OFDM por usuario mientras que IEEE 802.16e-2005 ofrece un número de subportadoras hasta un máximo de 2048 que se pueden asignar a diferentes usuarios mediante el esquema de acceso múltiple ODFMA<sup>12</sup>, es decir, el acceso al canal es por medio de unas ciertas subportadoras asignadas por la BS.

En la tabla 2.1 podemos observar las diferencias entre los diferentes estándares adoptados por IEEE y por WiMAX Forum que permite la interoperabilidad entre los diferentes fabricantes indicando la banda de frecuencias de operación, la capa PHY (capa física) a utilizar y otros parámetros.

<sup>12</sup> Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access

	802.16	802.16-2004	802.16e-2005
<b>Estado</b>	Completado Diciembre 2001	Completado Junio 2004	Completado Diciembre 2005
<b>Banda de Frecuencia</b>	10GHz-66GHz	2GHz-11Ghz	2GHz-11GHz para fijo; 2GHz-6GHz para móvil
<b>Aplicación</b>	LOS fija	NLOS fija	NLOS fija i móvil
<b>Arquitectura MAC</b>	PTM <sup>13</sup> , malla	PTM, malla	PTM, malla
<b>Esquema de Transmisión</b>	Solo 1 portadora	256 subportadoras OFDM	OFDM escalable (OFDMA) con 128, 256, 512, 1024 o 2048 subportadoras
<b>Modulación</b>	QPSK <sup>14</sup> , 16QAM <sup>15</sup> , 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM
<b>Velocidad de transmisión</b>	32 Mbps-134.4 Mbps	1Mbps-75 Mbps	1Mbps-75 Mbps
<b>Multiplexado</b>	Burst TDM/TDMA	Burst TDM/TDMA/OFDM/OFDMA	Burst TDM/TDMA/OFDM/OFDMA
<b>Duplexado</b>	TDD <sup>16</sup> i FDD <sup>17</sup>	TDD i FDD	TDD i FDD
<b>Anchos de banda de canal</b>	20MHz, 25 MHz, 28 MHz	1.75MHz, 3.5MHz, 7MHz, 14MHz, 1.25MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz, 8.75MHz	1.75MHz, 3.5MHz, 7MHz, 14MHz, 1.25MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz, 8.75MHz
<b>Designación interfaz aérea</b>	WirelessMAN-SC	WirelessMAN-OFDM	WirelessMAN-OFDMA
<b>Implementación WiMAX</b>	Ninguna	256-OFDM	OFDMA escalable

**Tabla 2.1** Características básicas de los diferentes estándares WiMAX[And07]

<sup>13</sup> Point-To-Multipoint

<sup>14</sup> Quaternari Phase Shift Keying

<sup>15</sup> Quadrature Amplitude Modulation

<sup>16</sup> Time Division Duplex

<sup>17</sup> Frequency Division Duplex

## 2.2 Características principales

En esta sección se comentan las características que hacen de WiMAX una tecnología robusta, fiable y adaptable a cualquier ambiente gracias a su gran número de opciones que ofrece y que se comentan a continuación [And07]:

### 2.2.1 En la capa física

- **Capa física basada en OFDM:** La capa física de WiMAX está basada en OFDM, un esquema que ofrece una buena resistencia al efecto multicamino (*multipath*) incluso en condiciones NLOS.
- **OFDMA:** Es una técnica utilizada por WiMAX móvil para el acceso múltiple aprovechando la diversidad multiusuario donde cada usuario es asignado a una serie de subportadoras o subcanales.
- **Elevados máximos de velocidad:** Gracias al conjunto de las técnicas de modulación y codificación adaptativa, así como de las múltiples antenas y de la multiplexación espacial, WiMAX permite conseguir una elevadas velocidades máximas. Por ejemplo, utilizando un ancho de banda de 10MHz y el esquema de duplexado TDD con una tasa de 3:1 (3 tramas *downlink* - 1 trama *uplink*) la velocidad máxima en capa física (*gross rate*) es aproximadamente 25 Mbps para *downlink* y 6.7 Mbps para *uplink*.
- **Velocidad y ancho de banda escalables:** Esta característica es única para IEEE 802.16e-2005 con el modo escalable OFDMA. Permite adaptar la velocidad con el ancho de banda del canal disponible. Cuanto más grande sea el ancho de banda del canal, más grande será el tamaño de la FFT<sup>18</sup> y eso implica más subportadoras habrán en el canal facilitando un aumento de la tasa de datos o velocidades de transmisión.
- **Modulación y codificación adaptativa (AMC<sup>19</sup>):** Esta técnica es una de las principales características que hacen que WiMAX sea una tecnología que se adapte al usuario en función de un canal variante en el tiempo. Esta técnica cambia la modulación y/o la codificación FEC<sup>20</sup> teniendo en cuenta la SNR instantánea que el receptor WiMAX recibe en un instante de tiempo. Por esto se llama adaptativa, ya que utiliza la mejor modulación y/o codificación para cada MAC PDU<sup>21</sup> o subtrama de usuario que mejora notablemente su velocidad de información.

---

<sup>18</sup> Fast Fourier Transform

<sup>19</sup> Adaptive Modulation and Coding

<sup>20</sup> Forward Error Correction

<sup>21</sup> Protocol Data Unit

- **Soporte para técnicas de múltiples antenas:** Además de OFDM y AMC para aumentar la tasa de transmisión, WiMAX permite incorporar antenas adicionales al transmisor/receptor. Concretamente, la velocidad se aumenta gracias a las técnicas de antenas avanzadas tales como: *beamforming*, codificación en espacio-tiempo (STC<sup>22</sup>), y multiplexación espacial.

### 2.2.2 En la capa MAC

- **Retransmisiones de capa de enlace:** WiMAX utiliza una de las técnicas utilizada en muchas redes de ordenadores que se conoce como ARQ<sup>23</sup>. Esta herramienta permite retransmitir aquellos paquetes enviados al destino del cual el transmisor no ha recibido ninguna justificación de recepción a través del ARQ. Cada paquete transmitido ha de ser reconocido por el receptor y este último ha de enviar una justificación de la recepción.
- **Soporte por FDD y TDD:** Tanto IEEE 802.16-2004 como IEEE802.16e-2005 soportan duplexado FDD y TDD. TDD será el duplexado definitivo para el futuro de WiMAX ya que dispone de más ventajas: (1) Más eficiencia espectral ya que no son necesarias dos bandas de frecuencias. (2) Utilizando TDD se pueden tener enlaces asimétricos y por lo tanto más flexibilidad a la hora de escoger las velocidades de *downlink* y de *uplink*, (3) reciprocidad del canal para los dos enlaces y (4) al operar en una sola banda frecuencial, menos complejidad en los equipos.
- **Asignación de recursos dinámicos y flexibles para usuario:** La asignación de recursos a los usuarios como ancho de banda en los canales de bajada y subida, es controlado por un programa de la estación base. Aún así, cuando existe diversidad multi-usuario, la asignación puede estar realizada en tiempo (TDM), en frecuencia (OFDM) o en espacio (AAS<sup>24</sup>). El estándar permite la asignación de los anchos de banda en estos tres dominios.
- **Calidad del servicio (QoS<sup>25</sup>):** La capa MAC de WiMAX tiene una arquitectura orientada a conexión que está diseñada para soportar una variedad de aplicaciones, incluyendo servicios de voz y multimedia con una variedad de usuarios con múltiples conexiones/usuario. QoS de WiMAX ofrece tasa de bits constante, tasa de

---

<sup>22</sup> Space-Time Coding

<sup>23</sup> Automatic Retransmission Request

<sup>24</sup> Advanced Antenna Systems

<sup>25</sup> Quality-of-Service

bits variable, flujo de tráfico en tiempo no real, y tráfico de datos *best-effort* de manera que permite adaptarse a los requerimientos QoS de cada conexión de usuario.

- **Soporte para la movilidad:** La variante de WiMAX móvil incluye una serie de mecanismos que permiten al usuario mantener una conectividad móvil, eficiente y muy robusta para aplicaciones tolerantes a los retardos, como VoIP<sup>26</sup> especialmente en casos de cambio de estación base (*handover*<sup>27</sup>). Técnicas como estimación de canales frecuentes, ahorro de potencia, subcanalización de *uplink* y control de potencia también son especificados en el soporte para aplicaciones móviles.

## 2.3 Descripción a nivel físico

La capa física de WiMAX (IEEE 802.16-2004) está basada en multiplexación por división de frecuencias ortogonales. OFDM es un esquema de transmisión que permite llevar a cabo comunicaciones multimedia, video y datos a alta velocidad y es utilizado por una gran variedad de sistemas comerciales de banda ancha incluyendo DSL, Wi-Fi, *Digital Video Broadcast-HandHeld* (DVB-H), etc. Además, OFDM permite comunicaciones robustas en ambientes sin visión directa, con obstáculos entre transmisor y receptor que causan propagaciones de la señal por múltiples caminos entre el transmisor y el receptor (efecto multicamino).

En este apartado se hace una breve introducción a la capa física de WiMAX [And07]. Se comienza con la explicación de la estructura de las tramas WiMAX, seguido de una breve introducción a OFDM. Finalmente se comentan brevemente las técnicas de modulación y codificación adaptativa y antenas múltiples (o diversidad espacial).

### 2.3.1 Slot y estructura de trama

Se llama slot a la mínima unidad de tiempo-frecuencia que asigna el sistema a un determinado enlace. Un slot puede contener un número entero de símbolos OFDM dependiente del esquema de subcanalización utilizado. Así pues, una serie de slots forman la región de datos del usuario. Los algoritmos de programación podrían asignar las regiones de datos del usuario a diferentes usuarios dependiendo de las condiciones del canal, de la demanda o de los requisitos de QoS.

---

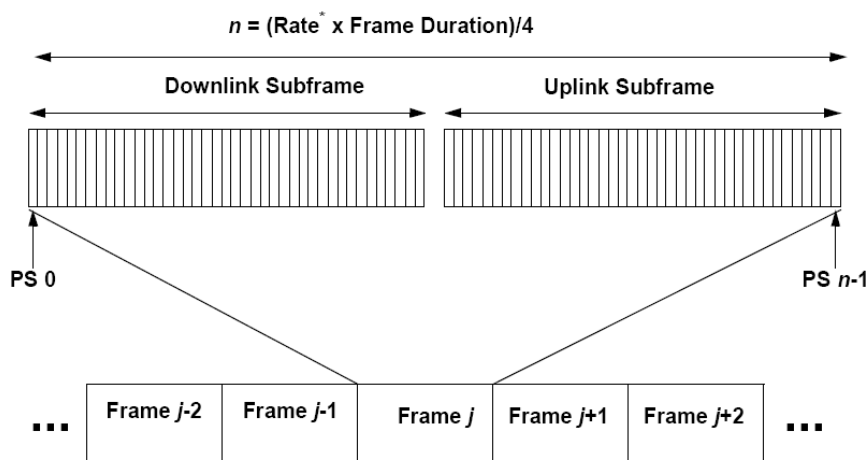
<sup>26</sup> Voice over IP

<sup>27</sup> Handover se refiere al proceso de cambio de estación base, es decir, al cambio entre celdas.

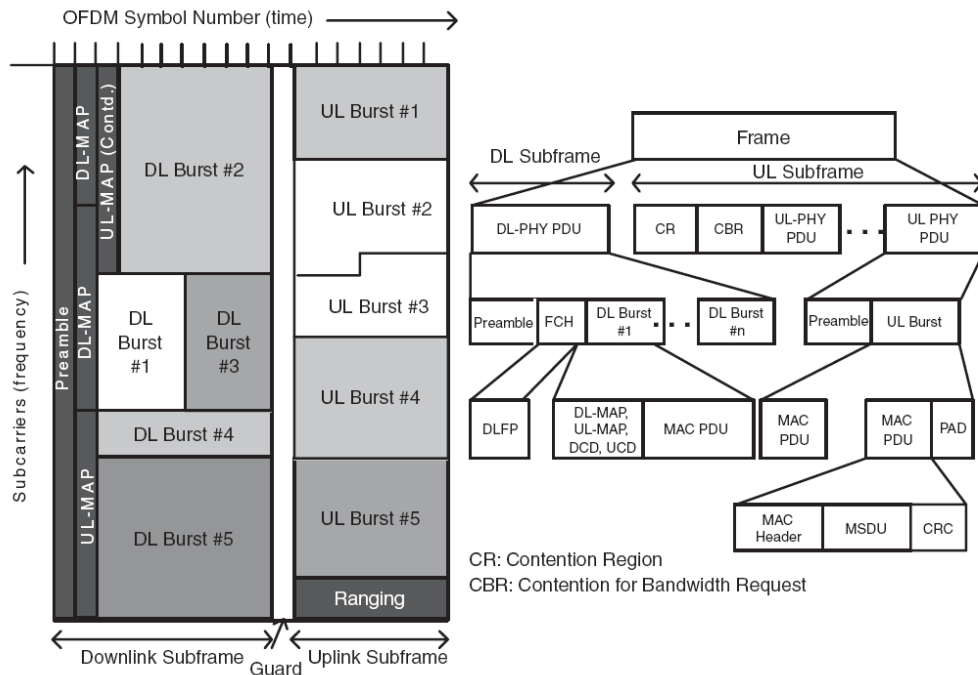
En cambio, una trama de WiMAX está compuesta por dos subtramas: una subtrama de *downlink* y una subtrama de *uplink* separadas por un intervalo de guarda tal y como se observa en la figura 2.2 (en el caso de TDD). Si el duplexado es FDD significa que se pueden enviar las dos tramas en bandas de frecuencia diferentes y por lo tanto no es necesaria una estructura determinada de tramas como pasa en TDD. Además, la transmisión en FDD o en TDD puede ser en modo *full-duplex*, en el que la transmisión y la recepción se efectúan simultáneamente o en modo *half-duplex*, en el que la transmisión y la recepción se efectúan por separado. Si la transmisión es en modo *full-duplex* y FDD es necesario que el controlador de ancho de banda de la estación base asigne las frecuencias correspondientes a las dos tramas; esto no pasa en modo *half-duplex* [IEEE04].

La variante de IEEE 802.16-2004 utiliza FDD y la variante de IEEE 802.16e-2005 utiliza TDD. De todas maneras, la tendencia al futuro es utilizar TDD porque dispone de las ventajas que ya se han comentado en el apartado anterior

La figura 2.2 muestra la estructura de trama TDD para la variante de WiMAX fijo y la figura 2.3 muestra la estructura de trama TDD para la variante de WiMAX móvil.



**Figura 2.2** Estructura de trama TDD para WIMAX fijo [IEEE04]



**Figura 2.3** Estructura de trama TDD para WiMAX móvil [And07]

Se puede observar que una trama TDD empieza con un preámbulo de *downlink* (DL) que se utiliza para finalidades en la capa física, como por ejemplo sincronización de frecuencia y estimación inicial de canal. El preámbulo de *downlink* es seguido por la cabecera de control de trama (FHC<sup>28</sup>). Esta cabecera especifica la información de configuración de la trama tal como: la longitud de los mensajes MAP, el esquema de modulación/codificación y las subportadoras utilizables. La cabecera FHC es seguida por uno o múltiples *bursts* que son transmitidos por diferentes esquemas de modulación y codificación. Cada *burst* se asigna a un usuario y es por esta razón que se tienen esquemas AMC diferentes. Además, cada *burst* es transmitido según un determinado perfil asignado para el mensaje MAP y un número entero de símbolos OFDM. Ya que los mensajes MAP tienen información crítica que necesita llegar a todos los usuarios, éstos se transmiten a baja velocidad con BPSK y una tasa de codificación 1/2. En el caso de WiMAX móvil y en el de muchos usuarios que utilicen aplicaciones que requieran paquetes de tamaño pequeño (ej:VoIP), el sistema puede opcionalmente utilizar submensajes MAP y enviarlos a los diferentes usuarios a velocidades de transmisión elevadas.

El perfil y la localización del primer *burst* de *downlink* se especifican en el prefijo de la trama de *downlink* (DLFP<sup>29</sup>) que forma parte de la cabecera de control de trama [And05].

<sup>28</sup> Frame Control Header

<sup>29</sup> Downlink frame prefix

La estimación del canal inicial, obtenida del preámbulo, puede ser utilizada para el seguimiento adaptativo del canal utilizando subportadoras piloto incrustadas en el símbolo OFDM. Desde que la duración de cada trama WiMAX es corta (1-2 ms) en el caso de WiMAX fijo la estimación adaptativa del canal se puede omitir debido a que se considera que el canal no varía mucho en la duración de la trama. [And05].

Como se puede observar en la figura 2.3 una subtrama *downlink* consta de múltiples *bursts* de diferentes usuarios, en una topología PTM. WiMAX es una tecnología flexible a nivel de trama ya que permite que las tramas sean de longitudes variables (entre 2-20ms) y también los *bursts*, los cuales pueden contener paquetes de tamaño fijo o variable, provenientes de las capas superiores. No obstante, y por temas de interoperabilidad, los equipos WiMAX están preparados para soportar tramas de solo 5ms. En el caso de la subtrama *uplink*, aparte de incluir la información de los diferentes usuarios en cada uno de los *bursts*, incluye dos porciones reservadas para temas de gestión: el CR (*Contention Region*) y el CBR (*Contention for Bandwidth Request*). La región de contención puede ser utilizada para ajustamientos de lazo cerrado de potencia, tiempo y frecuencia. Además, puede ser utilizada para cuando la cantidad de datos a enviar es demasiado pequeña como para justificar la petición de un canal dedicado. La subtrama *uplink* tiene dedicado un canal de indicador de la calidad del canal (CQICH) localizado entre el canal de sincronización (*ranging*) y los *bursts* de tráfico para enviar la estimación de la calidad del canal a la BS.

WiMAX permite incorporar preámbulos más frecuentes dentro de la trama para aumentar la fiabilidad cuando el terminal móvil circula a velocidades altas (ej: 150 Kmp/h).

### 2.3.2 Multiplexación por división de frecuencias ortogonales

La palabra multiplexar en comunicaciones significa agrupar un conjunto de señales y enviarlas por un medio. Si cada uno de las señales se envía con portadoras de frecuencias diferentes se llama multiplexación por división de frecuencias o FDM<sup>30</sup>. La idea general de OFDM, en el caso particular de FDM, es dividir un símbolo de período  $T_s$  y ancho de banda  $B_s$  en  $L$  subsímbolos de período  $L T_s$ , y ancho de banda  $B_s/L$  y enviarlos en paralelo por el canal de comunicación, previamente modulados por una subportadora OFDM. Es por eso que OFDM también se conoce como modulación multiportadora. ¿Pero por qué se hace esto? Todo el mundo sabe que la propagación por un canal de comunicaciones cualquiera no es de camino directo sino que, debido a obstáculos entre transmisor y receptor, la propagación será

---

<sup>30</sup> Frequency Division Multiplexing

multicamino. Dicho de otra manera las señales en recepción que provienen del transmisor se verán afectadas en amplitud y fase. Esto significa que en algún momento el receptor recibirá réplicas de las señales transmitidas por el receptor. Cada una de las señales llegará al receptor con un determinado retardo introducido por el canal. Cada una de las señales llega al receptor con un cierto retardo  $\tau$  introducido por el canal, que en sistemas de banda ancha el canal suele ser selectivo en frecuencia. Un canal de comunicaciones se considera selectivo en frecuencia cuando el retardo  $\tau$  introducido (*delay spread*) al símbolo enviado es superior al período de símbolo  $T_s$ . Dicho de otra manera, si se considera  $H(f)$  la respuesta frecuencial del canal, este será selectivo en frecuencia cuando la diferencia en amplitud entre dos frecuencias consecutivas sea superior a un umbral establecido, que normalmente es de 3dB:

$$H(f_i) \not\approx H(f_{i+1}) \quad (2.1)$$

Se define el ancho de banda de coherencia como la diferencia entre aquellas frecuencias en las cuales el canal se puede considerar *flat fading*:  $B_c = |f_j - f_{j+1}|$  y por lo tanto, el canal afectará casi igual a todas las frecuencias de símbolo o símbolos que se envíen.

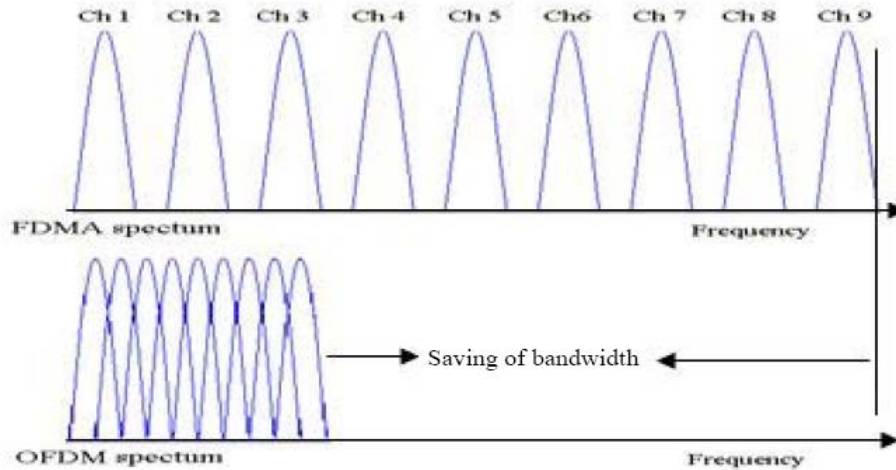
Por lo tanto, si el canal es selectivo en frecuencia significa que la probabilidad de aparecer ISI<sup>31</sup> es alta. La ISI aparece en canales *fading* cuando la duración de cada símbolo retardado un tiempo diferente se ensancha sobreponiéndose con otros símbolos posteriores o anteriores.

Para combatir la ISI en un canal selectivo en frecuencia es necesario que el retardo  $\tau < T_s$  o que  $B_s < B_c$ . Es decir, en el dominio temporal que el retardo del canal introducido a los símbolos sea el menor posible para evitar ISI y en el dominio frecuencial que el ancho de banda de cada subsímbolo que envía sea inferior al ancho de banda de coherencia del canal permitiendo que cada símbolo experimente un canal invariante en el tiempo. Esto es lo que hace OFDM y por eso envía en paralelo más de un subsímbolo.

La figura 2.4 compara el espectro de FDM con el espectro de OFDM con un total de 9 portadoras o canales.

---

<sup>31</sup> Intersymbol Interference

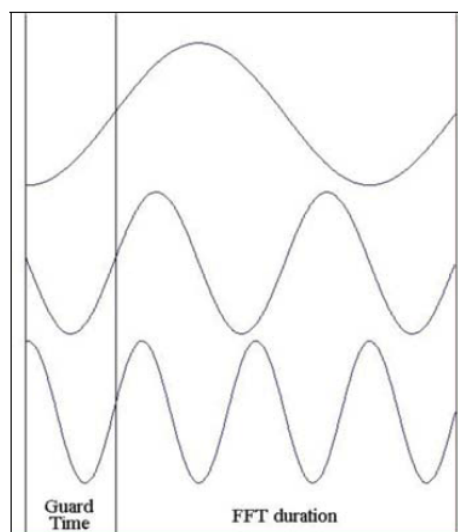


**Figura 2.4** Comparación entre FDM y OFDM [Sha05]

Para que OFDM funcione correctamente ha de mantener en cualquier momento la ortogonalidad entre todas las subportadoras. Matemáticamente se puede expresar la ortogonalidad con la siguiente expresión [Sha05]:

$$\int_0^T \sin 2\pi f t \cdot \sin 2\pi (2f) t \cdot dt = 0, \text{ on } T \text{ és múltiple de } 1/f \quad (2.2)$$

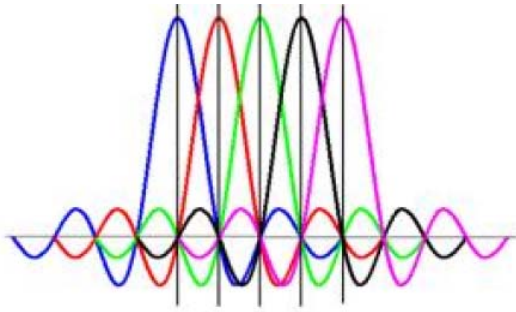
Para mantener la ortogonalidad es necesario que el período de símbolo sea el inverso del espacio entre subportadoras,  $B_{SC} = BW/N$  siendo  $BW$  el ancho de banda nominal y  $N$  el nombre de subportadoras. Además, la FFT (desmultiplexado OFDM en recepción) se ha de considerar sobre la duración del símbolo el cual cubre un número entero de ciclos de portadora tal y como se muestra en la figura 2.5.



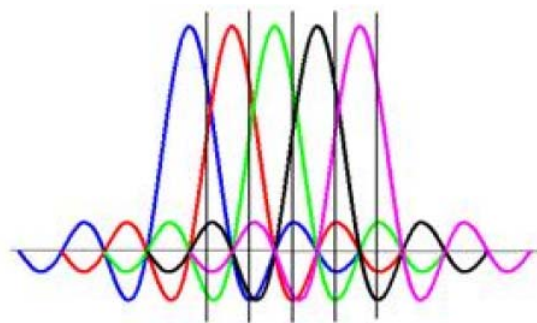
**Figura 2.5** Tres subportadoras ortogonales mostradas separadamente

(en la práctica se transmite una suma de las 3) [Sha05]

Como ya se ha comentado, el tamaño de la FFT depende inversamente de la función de duración del símbolo. Si la duración del símbolo es muy grande se asegura una no ISI, pero a la vez las subportadoras están más cerca. Este hecho puede provocar una cierta desviación frecuencial, causada por la velocidad del terminal móvil (efecto *Doppler*) y entonces aparecerá la ICI o *Intercarrier Interference*. Las figuras 2.6 y 2.7 comparan los efectos de ICI con los de no ICI [Sha05].



**Figura 2.6** Sincronización perfecta. Espectro OFDM sin ICI con 5 subportadoras.



**Figura 2.7** Sincronización perfecta. Espectro OFDM con ICI con 5 subportadoras.

Existe un compromiso entre protección contra el multicamino, la desviación *Doppler* y la complejidad/coste del diseño.

Otra posible opción para eliminar completamente la ISI es añadir intervalos de guarda entre símbolos OFDM en el dominio temporal más grandes que el *delay spread*.

Resumiendo en la tabla 2.2 se resumen las ventajas y desventajas de OFDM:

Ventajas	Desventajas
Alta eficiencia espectral	Sensibilidad al tiempo y errores de sincronización de frecuencia
Implementación simple con IFFT en transmisión y FFT en recepción	Elevado PAPR ( <i>peak-to-average power ratio</i> )
Baja complejidad del receptor	A mayor tamaño de la FFT o duración de símbolo, aparición de ICI
Adecuado para transmisión de altas velocidades en canales <i>multipath fading</i>	
Alta flexibilidad en términos de adaptación al canal.	
Esquemas de acceso múltiple de baja complejidad tales como OFDMA	

**Tabla 2.2** Ventajas y desventajas de OFDM [Yan05]

Enfocando OFDM a WiMAX fijo, 802.16-2004 utiliza OFDM con 256 subportadoras fijas entre las cuales se dividen con 192 subportadoras de datos, 8 subportadoras piloto por temas de sincronización y estimación de canal y 56 subportadoras de banda de guarda. Desde que el número de subportadoras es fijo, el espaciado varía en función del ancho de banda nominal. Si el ancho de banda nominal aumenta, el espaciado entre subportadoras también aumenta provocando una reducción de la duración del símbolo. Por eso lo que se hace es introducir más fracciones de tiempo de guarda entre símbolos OFDM. Por ejemplo, en el caso de  $BW = 3.5\text{MHz}$  se acostumbra a utilizar un 25% de tiempo de guarda para soportar retardos superiores a  $16\mu\text{s}$ .

Enfocando OFDM en WiMAX móvil, 802.16e-2005 utiliza gran variedad de número de subportadoras, concretamente entre 128 y 2048 subportadoras para adaptarse al ancho de banda nominal cuando este aumente. Es decir, el tamaño de la FFT (número total de subportadoras) aumenta si el ancho de banda nominal aumenta ya que el espaciado siempre es fijo siendo de  $10.94\text{KHz}$ . Este espaciado, además de mantener la duración del símbolo, permite satisfacer los requisitos del retardo del canal y del efecto *Doppler*. Con un  $BW = 3.5\text{GHz}$ , se pueden conseguir retardos superiores a  $20\mu\text{s}$  con el espaciado anterior. Un espaciado de  $10.94\text{ KHz}$  implica que el número de subportadoras 128, 512, 1042 y 2048 pueden ser utilizadas cuando  $BW = 1.25\text{MHz}$ ,  $5\text{MHz}$ ,  $10\text{MHz}$  y  $20\text{MHz}$  respectivamente.

La tabla 2.3 muestra los parámetros OFDM utilizados en WiMAX tanto fijo como móvil:

Parámetro	WiMAX Fix OFDM-PHY	WiMAX Móvil OFDMA-PHY			
Tamaño de la FFT	256	128	<b>512</b>	1024	2048
Nombre de subportadoras de datos <sup>32</sup>	192	72	<b>360</b>	720	1440
Nombre de subportadoras piloto	8	12	<b>60</b>	120	240
Nombre de subportadoras de banda de guarda/nulas	56	44	<b>92</b>	184	368
Prefijo cíclico o Tiempo de guarda ( $T_g/T_b$ )	1/32, 1/16, <b>1/8</b> , 1/4				
Tasa de sobremuestreo ( $F_s/BW$ )	Depende del BW: 7/6 para 256 OFDM, 8/7 para múltiples de $1.75\text{MHz}$ y 28/25 para múltiples de $1.25\text{MHz}$ , $1.5\text{MHz}$ , $2\text{MHz}$ o $2.75\text{MHz}$				

<sup>32</sup> La distribución listada de subportadoras de WIMAX Mobil es para *downlink* PUSC (uso parcial de subportadora)

Ancho de banda de canal (MHz)	3.5	1.25	<b>5</b>	10	20
Espaciado frecuencial de subportadoras (KHz)	15.625	<b>10.94</b>			
Tiempo útil de símbolo ( $\mu$ s)	64	<b>91.4</b>			
Tiempo de guarda asumiendo un 12.5 % de retardo ( $\mu$ s)	8	<b>11.4</b>			
Duración de un símbolo OFDM ( $\mu$ s)	72	<b>102.9</b>			
Nombre de símbolos OFDM en una trama de 5 (ms)	69	<b>48.0</b>			

**Tabla 2.3** Parámetros OFDM utilizados en WiMAX. Los valores en negrita se corresponden a aquellos de perfiles de sistema WiMAX iniciales [And07].

### 2.3.3 Modulación y codificación adaptativa

Una de las herramientas a parte de OFDM que permite mejorar la eficiencia espectral en la transmisión de símbolos sobre un canal variante en el tiempo, es la técnica de modulación y codificación adaptativa. La idea básica es realizar una estimación del canal de *downlink* en el receptor y enviar la estimación obtenida al transmisor a través del canal indicador de la calidad del canal (CQICH) que se encuentra en la trama de *uplink*. Lo que se estima básicamente es la SNR<sup>33</sup> y del canal que se define como la SINR recibida por el receptor  $\gamma_r$  dividida por la potencia de transmisión  $P_t$  que normalmente es una función de  $\gamma$ . La SINR en recepción es pues  $\gamma_r = P_t \gamma$  [And07].

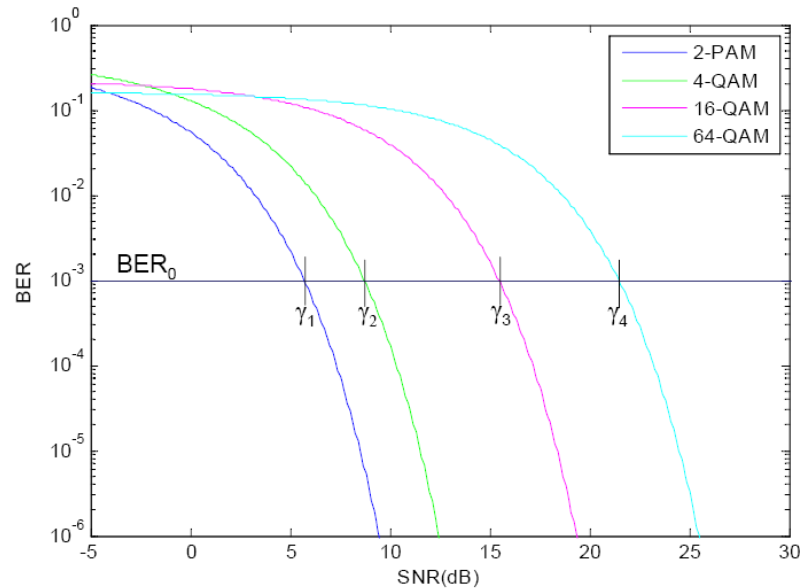
Con la SNR estimada que recibe el transmisor es capaz de seleccionar aquella modulación y codificación FEC que más se adapte a las condiciones del canal. Si las condiciones del canal son favorables ( $SNR > SNR_{th}$ ) entonces se utiliza una constelación grande (altas velocidades de transmisión), se reduce la potencia de transmisión que se requiere (de alguna manera el transmisor también controla su potencia de transmisión) o se reduce el promedio de la probabilidad de error de bit (BER<sup>34</sup>). De manera contraria si las condiciones del canal no son favorables ( $SNR < SNR_{th}$ ) se aumenta la potencia de transmisión y se utiliza una constelación más pequeña (se reduce el *throughput*).

En WiMAX las bajas velocidades de transmisión se consiguen con una constelación BPSK y con códigos de corrección de error de bajo *rate* o tasa tales como los códigos convolucionales 1/2 o los *turbo codes*. Altas velocidades de transmisión se consiguen con 64QAM y códigos de codificación de error menos robustos como por ejemplo, los códigos convolucionales con una tasa 3/4.

<sup>33</sup> *Signal-to-Noise Ratio*

<sup>34</sup> *Bit Error Rate*

En la figura 2.8 se puede observar la relación entre la BER y la SNR así como el nivel umbral  $SNR_{th}$  correspondiente a cada constelación: 2-PAM (BPSK), 4-QAM (QPSK), 16-QAM i una 64-QAM.



**Figura 2.8** Relación BER vs SNR y los correspondientes umbrales SNR de los N esquemas de modulación y codificación utilizados por AMC. [Roc07]

El principal problema que se le afronta a esta técnica es la variación rápida del canal. Este fenómeno se ha comentado en la sección de OFDM y es debido a la movilidad del terminal móvil de manera que si la velocidad del terminal móvil es alta entonces la variación del canal será rápida. La consecuencia es que existirán más rebotes debido a los diferentes obstáculos en los que el terminal se encuentra (esto se conoce como *fast fading*) y además aparecerá el efecto *shadowing*.

Empíricamente a velocidades superiores a 30 Km/h con una portadora de 2.100 MHz, no se permite que la información de estado de canal precisa y oportuna esté disponible al transmisor [And07]. A velocidades inferiores el canal varía lentamente (*slow-fading+shadowing*) permitiendo que el sistema pueda seguir las variaciones mientras que a velocidades altas solo se pueda seguir las variaciones provocadas por el efecto *shadowing* [Gol05].

El estimador de canal del receptor tarda un retardo  $i_e$  para conseguir la SNR estimada, existe además un retardo  $i_f$  en el canal de *feedback* y el transmisor también tarda un tiempo  $i_c$  para realizar el procesamiento de la señal. Si la suma de los diferentes retardos temporales  $i_e + i_f + i_c$  es superior al tiempo que tarda el canal en cambiar entonces se ve como la eficiencia del

algoritmo AMC es pobre (sin haber contado los posibles errores y/o la degradación del canal de *feedback*).

La figura 2.9 muestra el esquema utilizado por el método AMC.

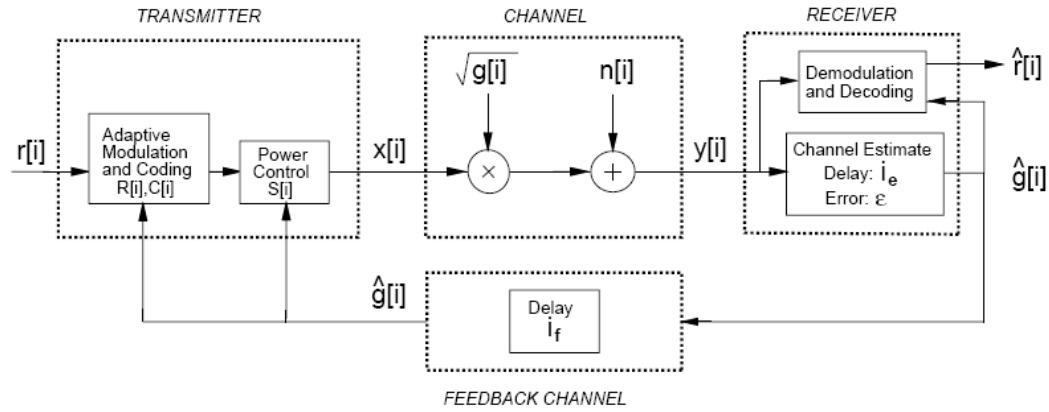


Figura 2.9 Modelo del sistema AMC [Gol05]

En el sistema se parte de que el canal es *flat fading* y discreto en el tiempo donde cada utilización del canal corresponde a un período de símbolo  $T_s = 1/B_s$ . El canal se puede entender como un proceso estocástico, estacionario y ergódico que depende de su ganancia  $\sqrt{g[i]}$  en el instante 'i' con una distribución estadística  $p(g)$ . El ruido  $n[i]$  es AWGN<sup>35</sup> con densidad espectral de potencia  $N_0/2$ .

Se define  $\bar{S}$  el promedio de la potencia de señal transmitida,  $B=1/T_s$  como el ancho de banda de la señal recibida y  $\bar{g}$  el promedio de la ganancia del canal. Entonces la SNR instantánea recibida es  $\gamma[i] = \bar{S}g[i]/(N_0B)$ ,  $0 \leq \gamma[i] \leq \infty$  y su valor esperado es  $\bar{\gamma} = \bar{S}\bar{g}/(N_0B)$ . Desde que  $g[i]$  es un proceso estacionario y ergódico, la distribución de  $\gamma[i]$  es independiente de 'i', y se denota esta distribución por  $p(\gamma)$ .

Como ya se ha comentado, en transmisión adaptativa se desea estimar la ganancia de potencia o la SNR instantánea y adaptar la modulación y codificación adaptativa según se corresponde. Los parámetros más comunes a adaptar son:

- **Velocidad de datos  $R[i]$ .** Depende de la constelación con la expresión de la capacidad de Shannon  $R[i] = B \log_2 M[i] \text{ bps}$ . Si se hace  $R[i]/B = \log_2 M \text{ bps/Hz}$  entonces es la eficiencia espectral de la M-ésima constelación.

<sup>35</sup> Additive White Gaussian Noise

- **Potencia de transmisión  $S[i]$ :** En teoría la política de control de potencia a partir de un punto de vista de capacidad se menciona *waterfilling* que consistente en transmitir mucha potencia en canales robustos y fiables, y poca potencia en canales débiles y no fiables. En la práctica y en algunos casos puede pasar lo contrario.

- **Parámetros de codificación  $C[i]$ .**

Se define la SNR instantánea como  $\hat{\gamma}[i] = \bar{S}\hat{g}[i]/(N_0B)$ , basada en la estimación de la ganancia de potencia del canal  $\hat{g}[i]$ . Como que la potencia de transmisión se adapta a  $\hat{\gamma}[i]$  se puede dejar en función de esta,  $S(\hat{\gamma}[i]) = S[i]$ , es decir, la potencia que se transmite depende de la SNR estimada en recepción que a su vez depende de la potencia recibida en el instante 'i' definida como  $\gamma[i] = S(\hat{\gamma}[i])g[i]/(N_0B)$ . De la misma manera que se ha llevado a cabo para adaptar el esquema de modulación, se puede adaptar la tasa de transmisión  $R(\hat{\gamma}[i]) = R[i]$  y/o los parámetros de codificación  $C(\hat{\gamma}[i]) = C[i]$  relativos a la estimación  $\hat{\gamma}[i]$ . La estimación  $\hat{\gamma}[i]$  depende de la estimación  $\hat{g}[i]$  de modo que si  $g[i]$  es estacionario y ergódico, su estimación también lo será y por lo tanto se pueden obviar los diferentes parámetros de transmisión tales como  $\hat{\gamma}$ ,  $S(\hat{\gamma})$ ,  $R(\hat{\gamma})$  i  $C(\hat{\gamma})$ .

La tabla 2.4 muestra los diferentes esquemas de modulación y codificación utilizados en WiMAX. En el canal de *downlink* QPSK, 16QAM y 64QAM son obligatorios tanto para IEEE 802.16-2004 como para IEEE 802.16e-2005; una 64 QAM es opcional para el canal de *uplink*. En cuanto a la codificación de errores o FEC, WiMAX utiliza códigos convolucionales combinados con los códigos Red-Solomon en el canal de *downlink*. El estándar también soporta opcionalmente *turbo codes* y códigos LDPC<sup>36</sup> con una variedad de tasas.

	<i>Downlink</i>	<i>Uplink</i>
Modulación	QPSK, 16QAM, 64QAM; BPSK (opcional),	BPSK, QPSK, 16QAM; 64QAM opcional.
Codificación	Obligatorio: CC <sup>37</sup> de 1/2, 2/3, 3/4, 5/6. Opcional: CTC <sup>38</sup> de 1/2, 2/3, 3/4, 5/6; códigos de repetición de 1/2, 1/3, 1/6, LDPC y RS <sup>39</sup>	Obligatorio: CC <sup>40</sup> de 1/2, 2/3, 3/4, 5/6. Opcional: CTC <sup>41</sup> de 1/2, 2/3, 3/4, 5/6; códigos de repetición de 1/2, 1/3, 1/6, LDPC

**Tabla 2.4** Esquemas de modulación y codificación soportados por WiMAX [And07]

<sup>36</sup> Low-Density Parity Check

<sup>37</sup> Concolutional Coding

<sup>38</sup> Convolutional Turbo Codes

<sup>39</sup> Reed-Solomon

<sup>40</sup> Concolutional Coding

<sup>41</sup> Convolutional Turbo Codes

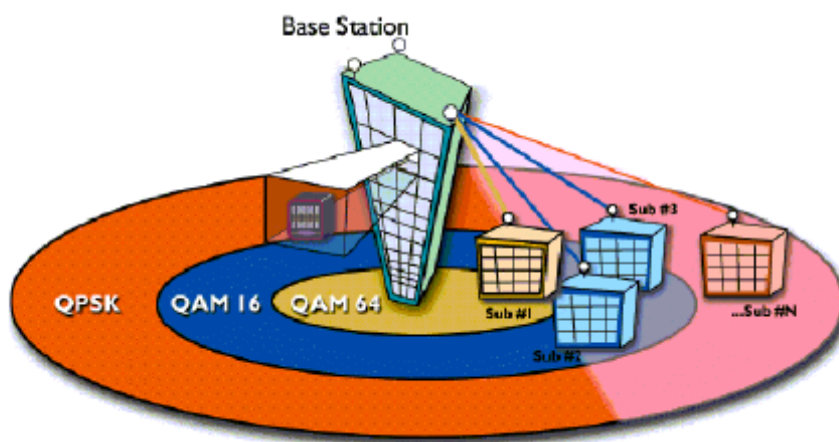
Para hacerse una idea de las velocidades que se pueden conseguir con los diferentes esquemas de modulación y codificación anteriores, la tabla 2.5 muestra las velocidades de la capa física para diferentes anchos de banda experimentados en versiones de WiMAX fijo y móvil desarrollada en el sud de Corea el año 2006 con su tecnología WiBro. El experimento utilizó OFDM en topología punto-multipunto, duplexado TDD, una relación de ancho de banda 3:1 *downlink-to-uplink*, un tamaño de trama de 5 ms, un intervalo de guarda del 12.5% y un esquema de permutación de subportadoras (PUSC).

Channel bandwidth	3.5MHz		1.25MHz		5MHz		10MHz		8.75MHz <sup>a</sup>	
PHY mode	256 OFDM		128 OFDMA		512 OFDMA		1,024 OFDMA		1,024 OFDMA	
Oversampling	8/7		28/25		28/25		28/25		28/25	
Modulation and Code Rate	PHY-Layer Data Rate (kbps)									
	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL
BPSK, 1/2	946	326	Not applicable							
QPSK, 1/2	1,882	653	504	154	2,520	653	5,040	1,344	4,464	1,120
QPSK, 3/4	2,822	979	756	230	3,780	979	7,560	2,016	6,696	1,680
16 QAM, 1/2	3,763	1,306	1,008	307	5,040	1,306	10,080	2,688	8,928	2,240
16 QAM, 3/4	5,645	1,958	1,512	461	7,560	1,958	15,120	4,032	13,392	3,360
64 QAM, 1/2	5,645	1,958	1,512	461	7,560	1,958	15,120	4,032	13,392	3,360
64 QAM, 2/3	7,526	2,611	2,016	614	10,080	2,611	20,160	5,376	17,856	4,480
64 QAM, 3/4	8,467	2,938	2,268	691	11,340	2,938	22,680	6,048	20,088	5,040
64 QAM, 5/6	9,408	3,264	2,520	768	12,600	3,264	25,200	6,720	22,320	5,600

a. The version deployed as WiBro in South Korea.

**Tabla 2.5** Velocidad de datos de capa física a diferentes anchos de banca [And07]

La figura 2.10 muestra como a medida que aumenta la distancia de la estación base, el tamaño de la constelación se va haciendo cada vez menor hasta la QPSK. Esto se consigue con el sistema AMC descrito anteriormente.



**Figura 2.10** Modulación i codificación adaptativa [W.Ho04]

### 2.3.4 Técnicas de múltiples antenas

Las velocidades conseguidas en la tabla 2.5 se consiguieron sin el uso de diversidad espacial utilizando múltiples antenas al transmisor o al receptor. Si se hubiera llevado a término la diversidad espacial, las velocidades de la tabla 2.5 podrían haber aumentado. La diversidad espacial, como su nombre indica, consigue mejorar la SNR de un sistema mediante múltiples antenas en transmisión, en recepción o en ambos sitios en ambientes con propagación adversa como es el caso de *multipath fading*. El estándar WiMAX proporciona soporte para implementar soluciones avanzadas con múltiples antenas para mejorar el rendimiento del sistema. Mediante los sistemas de antenas avanzadas (AAS<sup>42</sup>) se puede aumentar la eficiencia espectral y la capacidad del sistema en conjunto. Las diferencias técnicas existentes en los sistemas AAS son:

- **Diversidad en transmisión:** Se entiende por diversidad en transmisión la utilización de dos o más antenas en transmisión y una o más en recepción. Esta técnica permite utilizar los esquemas de codificación de bloque espacio-tiempo o STBC<sup>43</sup> para proporcionar diversidad en transmisión (o también en recepción) en el canal de *downlink* (o en el de *uplink*). Un caso particular de estos esquemas es el 2x1 (dos antenas en transmisión y una en recepción) y se conoce como códigos de *Alamouti*. Además de este caso 2x1, WiMAX también define STBC para 3 y 4 antenas de transmisión. Las ventajas de tener más antenas en transmisión es el aumento de la SNR instantánea en recepción y los inconvenientes es una disminución de la velocidad de los datos.

STBC se utiliza en canales selectivos en frecuencia y casi estáticos en tiempo, es decir, canales casi invariantes en la duración de la trama. Por lo tanto es más útil cuando el terminal móvil se desplaza a velocidades lentas. No obstante, para canales dispersivos en frecuencia (selectivos en tiempo) o canales *fast fading* se utiliza otro esquema similar al STBC conocido como SFBC.<sup>44</sup> Este sistema si que se utiliza en casos de elevada movilidad ya que se considera que el canal varía poco en el dominio frecuencial cuando el retardo máximo introducido por el canal es pequeño [Yan05].

La figura 2.11 muestra un ejemplo de STBC, donde dos flujos de datos iguales se envían simultáneamente mediante dos antenas en transmisión a un terminal móvil

---

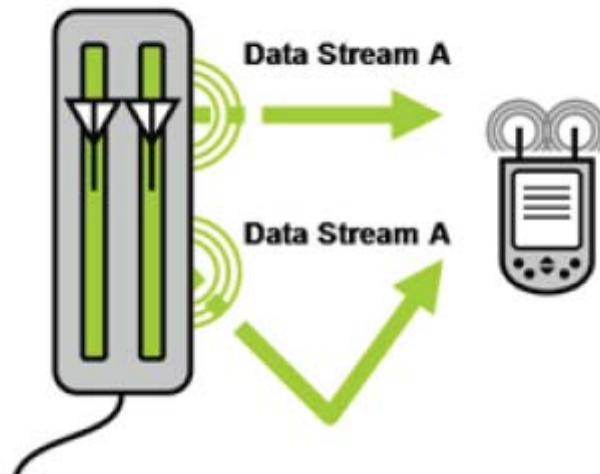
<sup>42</sup> *Advanced Antenna Systems*

<sup>43</sup> *Space-Time Block Coding*

<sup>44</sup> *Space-Frequency Block Coding*

equipado con una sola antena. Este esquema se llama MISO<sup>45</sup> y es muy utilizado en sistemas celulares donde la complejidad recae en la estación base la cual ayuda a mantener un coste de terminal móvil bajo.

### Space Time Block Coding (STBC)



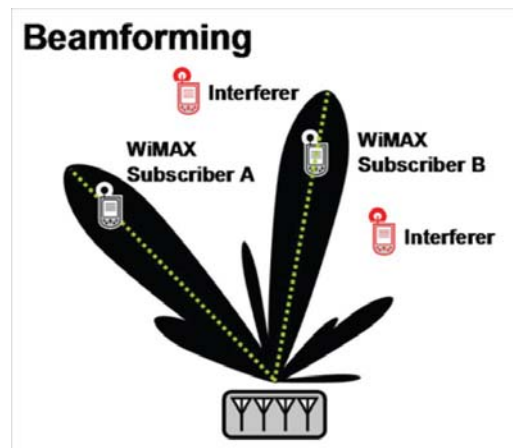
**Figura 2.11** Space-Time Block Coding STBC [White Paper.Motorola]

- **Beamforming:** La idea principal del *beamforming* consiste en aumentar la SNR en el receptor enfocando la energía o la máxima potencia a las direcciones deseadas, ya sea en transmisión o en recepción. En el caso de WiMAX, múltiples antenas pueden ser utilizadas para transmitir la misma señal apropiadamente ponderada para cada antena tal que el efecto sea enfocar el haz en la dirección del receptor y lejos de la interferencia, mejorando la SNR recibida. Esta técnica permite aumentar el rango de cobertura, la capacidad y la fiabilidad. Pero para hacer uso de esta técnica es necesario que el transmisor tenga una idea precisa de cómo es el canal. La estimación de canal es fácil en TDD ya que el canal es el mismo para *downlink* que para *uplink* pero en FDD se requiere de un canal de feedback *feedback*.

Las conocidas *smart* antenas permiten adaptar su patrón de radiación para adecuarse a un tipo determinado de tráfico o en entornos difíciles.

Un ejemplo de *beamforming* se muestra a la figura 2.12.

<sup>45</sup> Multiple Input-Single Output



**Figura 2.12** Beamforming en WiMAX [White Paper.Motorola]

- **Multiplexación espacial (SM<sup>46</sup>):** A diferencia de los esquemas STBC, esta técnica aprovecha la diversidad en transmisión para enviar más de un símbolo o conjunto de símbolos diferentes en paralelo. No envía información redundante al mismo instante de tiempo, sino que envía múltiples símbolos independientes. Si el receptor también dispone de múltiples antenas, el conjunto de símbolos pueden ser separados utilizando procesamiento ST<sup>47</sup>. SM es una técnica potente para sistemas con múltiples antenas que, en un principio, aumenta la velocidad en proporción con el número de antenas de transmisión, desde que cada antena transporta un único flujo de símbolos de información. Por lo tanto, si el número de antenas de transmisión es  $M$  y la velocidad para cada flujo de símbolos es  $R$ , la velocidad de transmisión será  $M \cdot R$ , solo en SM [IEEE Mag05]. Por ejemplo un sistema 2x2 MIMO dobla la velocidad de transmisión si se compara con un esquema STBC. Una tecnología que actualmente utiliza la multiplexación espacial es MIMO<sup>48</sup>.

Debido a que la tecnología SM envía en paralelo múltiples símbolos independientes es lógico pensar que SM funciona bien bajo buenas condiciones de SNR ya que se asegura que la probabilidad de perder un cierto número de símbolos es baja.

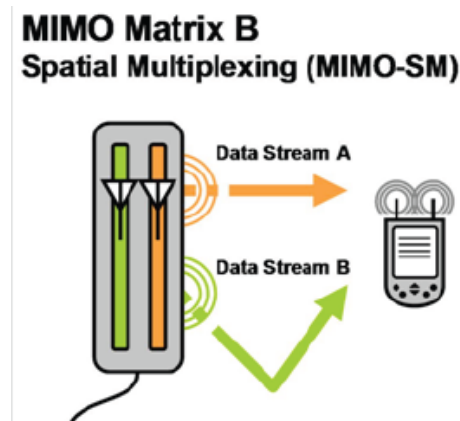
Una restricción importante para los receptores utilizados en multiplexación espacial es que el número de antenas en recepción no debe ser menor que el número de flujo de datos o equivalente al número de antenas en transmisión para que la decodificación pueda ser realizada con éxito.

<sup>46</sup> Spatial Multiplexing

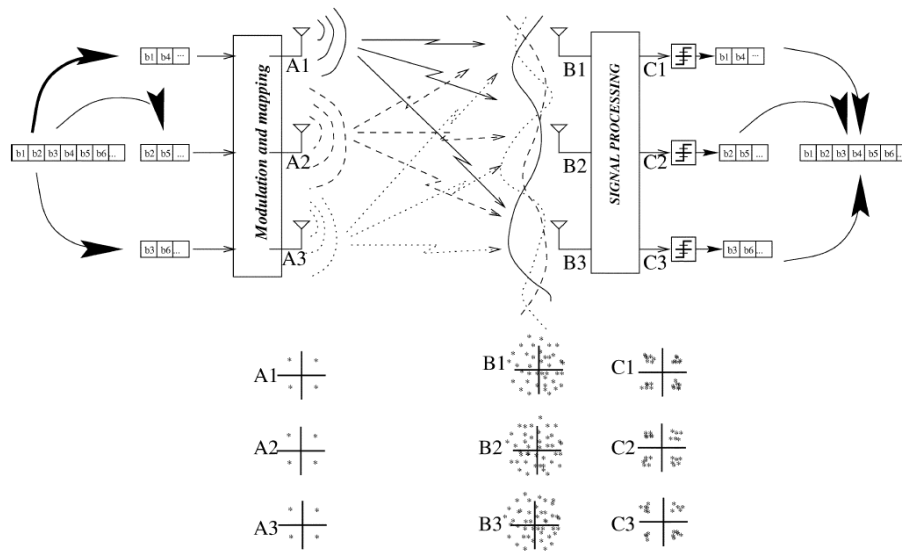
<sup>47</sup> Space-Time

<sup>48</sup> Multiple-Input Multiple-Output

La figura 2.13 muestra un esquema SM con dos antenas en transmisión y una antena en recepción y la figura 2.14 muestra un esquema de multiplexado espacial básico con tres antenas en transmisión i en recepción. Como se observa en la siguiente figura el transmisor envía dos flujos de datos en paralelo al receptor. De esta manera se aumenta la velocidad de transmisión.



**Figura 2.13** Esquema de Multiplexación Espacial-MIMO [White Paper.Motorola]



**Figura 2.14** Esquema de multiplexación espacial básico con tres antenas en transmisión y tres en recepción provocando una mejora de la eficiencia espectral.  $A_i, B_i, C_i$  representan las constelaciones de símbolo para las tres entradas a diferentes estados de transmisión y recepción [Ges03]

## 2.4 Descripción a nivel de MAC

La finalidad de la capa MAC de WiMAX es proporcionar una interfaz entre las capas de transporte superiores y la capa física en el modelo OSI<sup>49</sup>. La capa MAC coge los paquetes de las capas superiores – estos paquetes se llaman MSDUs<sup>50</sup>– y los agrupa en MPDUs<sup>51</sup> para la transmisión vía radio. La capa MAC en recepción realiza el proceso inverso. La capa MAC de WiMAX ha estado diseñada para soportar altas velocidades de *bit*. Además de proporcionar calidad de servicio similar a la tecnología ATM. Por otro lado, la MAC de WiMAX utiliza MPDUs de longitud variable y ofrecen mucha flexibilidad para permitir una transmisión eficiente. Por ejemplo, múltiples MPDUs de longitudes iguales o diferentes pueden ser agrupadas en un único *burst* para reducir cabecera PHY. Similarmente, múltiples MSDUs del mismo servicio de capas superiores pueden ser concatenados en un único MPDU para reducir la cabecera MAC. Además, largas MSDUs pueden ser fragmentadas a pequeñas MPDUs y enviadas a través de múltiples tramas.

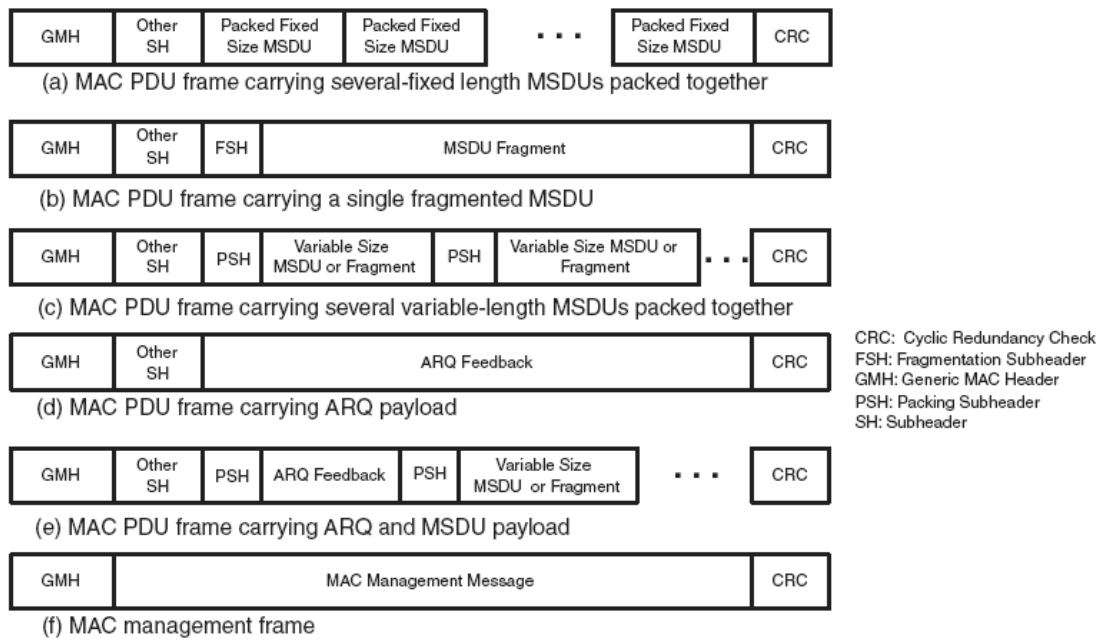
La figura 2.15 muestra ejemplos de diferentes configuraciones de tramas MAC PDU. Cada trama MAC comienza con una cabecera MAC Genérica (GMH, *generic MAC Header*) que contiene un identificador de conexión o CID (*Connection Identifier*), la longitud de la trama, *bits* para cualificar la presencia del CRC, subcabeceras, y si el *payload* está cifrado y si es así con que contraseña. El *payload* de las tramas MPDU puede ser un mensaje de transporte o de gestión. Al lado de las MDSUs, el *payload* de transporte puede contener peticiones de ancho de banda o peticiones de retransmisión. El tipo de *payload* de transporte es identificado por la subcabecera que le procede. La capa MAC de WiMAX también soporta ARQ, que puede ser utilizado para peticiones de retransmisión de MSDUs no fragmentados y fragmentos de MSDUs. La longitud máxima de la trama es de 2047 bytes que se representan con 11bits en la cabecera GMH.

---

<sup>49</sup> *Open Systems Interconnection*

<sup>50</sup> *MAC Service Data Units*

<sup>51</sup> *MAC Protocol Data Units*



**Figura 2.15** Ejemplos de varias de tramas MAC PDU [And07]



### 3 ARQUITECTURA DE LA RED WiMAX

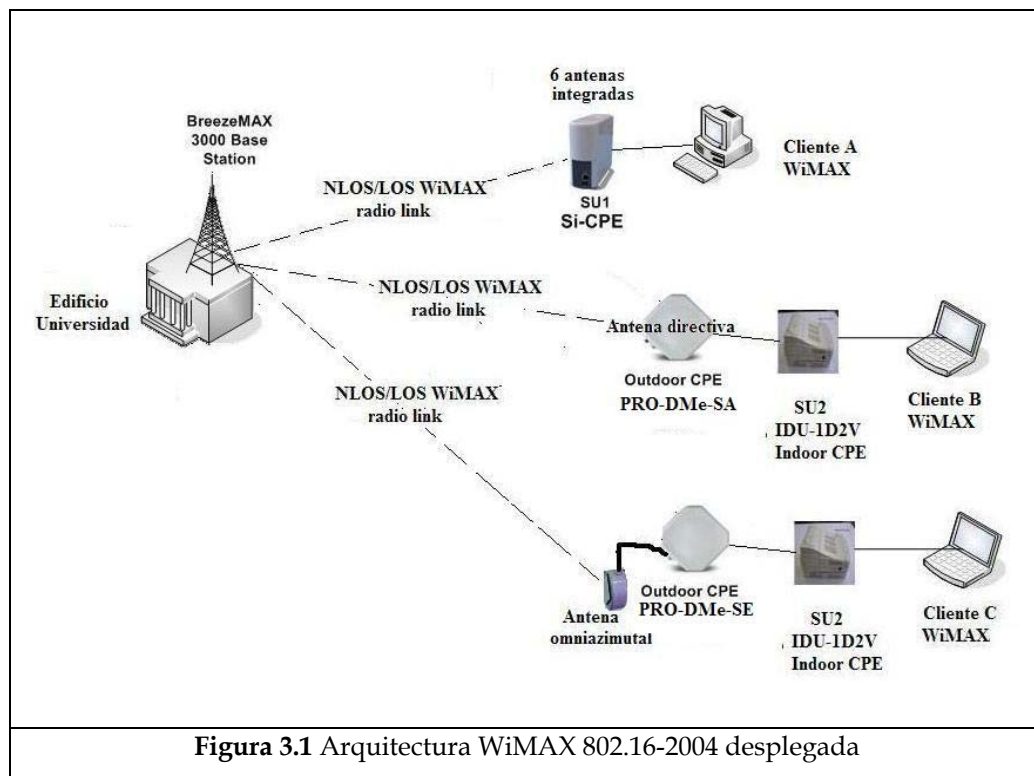
El propósito de este capítulo es dar a conocer al lector el tipo de arquitectura WiMAX empleada en el proyecto así como una descripción de los componentes que la forman. Antes de empezar a describir los equipos de la red WiMAX desplegada se comenta la razón por la que se optó por el estudio y análisis del estándar de WiMAX fijo en lugar del estándar de WiMAX móvil. En el momento que se adquirió la estación base WiMAX, en septiembre del 2007 existían solamente dos proveedores de WiMAX en España: Alvarion y Alcatel Lucent. Alvarion ofrecía WiMAX fijo y Alcatel Lucent WiMAX móvil siendo ambos equipos en banda licenciada. La razón por la que se optó por el WiMAX fijo era:

1. El precio del dispositivo que permitía hacer *handover* en WiMAX móvil era de 200.000 €, superior a la subvención del MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO.
2. Se querían hacer pruebas en un entorno rural aislado.

En la Figura 3.1 se muestra la arquitectura del sistema WiMAX utilizado basado en el estándar IEEE 802.16-2004 con tres terminales CPE<sup>52</sup> y la estación base BreezeMAX 3000.

---

<sup>52</sup> Customer Premise Equipment



**Figura 3.1** Arquitectura WiMAX 802.16-2004 desplegada

Los equipos que aparecen en la figura 3.1 son los siguientes:

- Estación Base BreezeMAX 3000 de Alvarion con dos antenas: sectorial 14.5 dBi y omnidireccional de 10 dBi.
- Terminal WiMAX CPE o SU<sup>53</sup>. Los terminales WiMAX de abonado que se disponen son:
  - Si -CPE. Este terminal lleva 6 antenas integradas por lo que en principio no necesita conexión a una antena externa.
  - IDU-CPE-1D2V SIP-RJ. Este terminal WiMAX hace de puente entre la red LAN del usuario y la red radio del WISP. A diferencia del Si-CPE necesita una unidad radio *outdoor* o ODU que hace de interfaz entre el medio guiado (cable) y el medio radiado. Se tienen dos terminales CPE-ODU:
    - PRO-CPE-ODU-SA: Incorpora una antena integrada con polarización V/H de 17 dBi de ganancia.
    - PRO-CPE-ODU-SE: Se conecta a una antena externa. En el proyecto se emplea una omniazimuthal de 2 dBi con polarización VV.

<sup>53</sup> Subscriber Unit

A continuación se describen cada uno de los equipos.

### 3.1 Descripción de la estación base WiMAX

BreezeMAX es una tecnología diseñada por la empresa Alvarion basada en el estándar de WiMAX IEEE 802.16/ETSI HIPERMAN para poder ofrecer un gran múltiple de servicios a bajo coste y alta velocidad a través de un medio radiado a un conjunto de organizaciones clientes (clientes en zonas empresariales, en zonas residenciales, en zonas educativas, etc) que forman una red *wireless* de área metropolitana (WMAN). La banda licenciada que ofrecen los equipos BreezeMAX está comprendida en 3-4 GHz. Existen en concreto 3 bandas frecuenciales: 3.3 GHz, 3.5 GHz y 3.6 GHz.



**Figura 3.2** Micro Estación Base BreezeMAX Alvarion

La micro estación base  $\mu$ BST provee toda la funcionalidad necesaria para comunicarse con sus SUs o unidades suscriptoras y conectarse al *backbone* del ISP. La  $\mu$ BST soporta *full duplex*, alta potencia y múltiples portadoras (debido a la modulación multiportadora de OFDM). La  $\mu$ BST ha sido diseñada para proporcionar una alternativa a la estación base modular BreezeMAX y una solución de bajo coste en lugares donde el número de unidades suscriptoras está limitado y solo uno o dos sectores son necesarios (i.e: áreas de comunidades). La estación base modular puede ofrecer hasta siete sectores. La  $\mu$ BST está formado por la unidad micro estación base *indoor* y la unidad radio *outdoor*. La unidad *indoor* provee toda la funcionalidad necesaria para poder dar servicio a dos sectores. Existen dos modelos: uno que se alimenta de AC (110 o 220 V) y el otro que se alimenta en DC (-48 V).

Las funcionalidades de la  $\mu$ BST incluyen:

- Conectividad Ethernet al *backbone* a través de una interfaz de red 100BASE -T.
- Clasificación del tráfico y iniciación de establecimiento de conexión.
- Conmutación de datos basados en políticas.

- Agente SNMP centralizado para gestionar la micro estación base y todos sus SUs registrados. Este agente permite una gestión en banda (*In-Band*) y fuera de banda (*Out-Of-Band*). Esta última se realiza a través de una interfaz de red 10/100 BASE-T.
- Soporte para configuración local, monitorización y *debugging* a través de una interfaz serie RS-232.

### **Terminal *outdoor* de la estación base AU-ODU (*Antena Unit-Outdoor Unit*)**

La unidad  $\mu$ BST *indoor* se conecta a los SUs vía radio a través de la unidad radio *outdoor* o AU (*Acces Unit*) - ODU. La unidad AU-ODU de la  $\mu$ BST es idéntica a la de la estación base BreezeMAX modular, es una unidad radio multiportadora *full duplex* que se conecta a una antena externa (ej: una antena sectorial). La unidad radio *outdoor* ha sido diseñada para soportar una ganancia elevada de sistema, robustez a interferencias utilizando una alta potencia de transmisión y baja figura de ruido. El AU-ODU soporta un ancho de banda hasta 14 MHz, permitiendo posibilidades futuras tales como un aumento de la capacidad a través del uso de un multiplexor o de canales anchos (e.j 7/14 MHz).

La conexión entre la unidad *indoor* y la unidad *outdoor* AU-ODU de la  $\mu$ BST se realiza a través de un cable de FI (frecuencia Intermedia) que transporta señales datos en modo *full duplex*, señales de control, de gestión así como de potencia (48 VDC) y además un reloj de 64 MHz de referencia para la sincronización. Las frecuencias de Tx y Rx son 240 MHz y 140 MHz respectivamente.

Existen dos versiones del AU-ODU:

- AU-ODU (estándar): Potencia de salida máxima de 28 dBm.
- AU-ODU-HP (*High Power ODU*): Potencia máxima de salida de 34 dBm. El AU-ODU-HP esta actualmente disponible en las bandas de 3.5 GHz (3.5a y 3.5b).

En el proyecto se utiliza la versión AU-ODU estándar de la figura 3.3. La antena utilizada para las respectivas pruebas y demostraciones sobre WiMAX en *outdoor* o exteriores es una antena omnidireccional de 10 dBi de ganancia que se muestra en la figura 3.4.

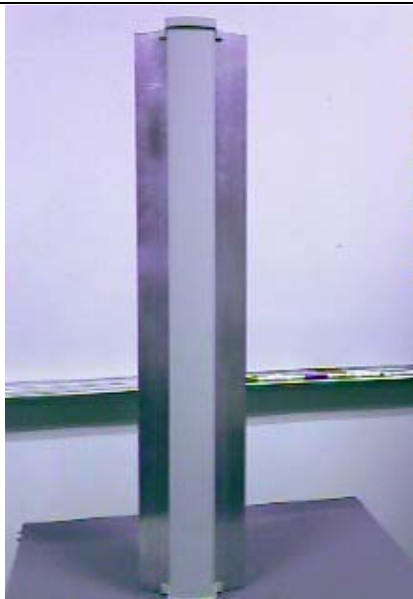
Además de la antena omnidireccional para obtener medidas en exteriores también se han empleado una antena sectorial para realizar medidas en *indoor* o interiores. Las figuras 3.5 y 3.6 muestran la antena sectorial de 14.5 dBi de ganancia.



**Figura 3.3** Unidad de antena *outdoor*, AU-ODU



**Figura 3.4** Antena omnidireccional de 10 dBi



**Figura 3.5** Antena sectorial de 14.5 dBi. Vista frontal



**Figura 3.6** Antena sectorial de 14.5 dBi. Vista trasera

En la tabla 3.1 se resume las especificaciones radio de la  $\mu$ BST.

Ítem	Descripción		
Frecuencia	Banda	Uplink (MHz)	Downlink (MHz)
	AU-ODU-3.5b	3450-3500	3550-3600
Modo de operación	Full duplex, FDD		
Ancho de banda de canal	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 3.5 MHz,</li> <li>▪ 1.75 MHz</li> </ul>		

Resolución de la frecuencia central	0.125 MHz
Puerto de Antena (AU-ODU)	Tipo N, 50 Ohm.
Máxima potencia de entrada al puerto de antena (interfaz ODU)	-50 dBm antes de saturación, -17 dBm antes de deterioro
Rango de potencia de salida al puerto de antena (interfaz ODU)	13 dBm-28 dBm.
Modulación	Modulación OFDM 256.  BPSK, QPSK, QAM16 y QAM64
FEC	Codificación Convolutacional: 1/2, 2/3 y 3/4
<i>Throughput</i> bruto: <i>downlink/uplink</i>	Máximo: 12 Mbps, con QAM 64 3/4.  Mínimo: 1.25 Mbps con BPSK 1/2
Máximo número de SUs	250 usuarios
Multiplexado	TDMA

**Tabla 3.1** Especificaciones radio de la micro estación base BreezeMAX 3000.

## 3.2 Descripción de los equipos WiMAX de abonado (CPE)

En el presente proyecto se disponen de dos tipos de terminales WiMAX de abonado:

- Un terminal WiMAX de fácil instalación para el cliente. Este terminal no requiere de orientación a la estación base, con sus 6 antenas integradas, por lo que en principio no se requiere servicio técnico especializado. Es un terminal ligero y portable en un entorno doméstico. La nomenclatura del terminal es Si-CPE.
- Un terminal WiMAX conectado a una antena externa que se orienta a la dirección de la estación base. Por lo tanto no es un terminal portable a diferencia del *Self Install* sino que tiene que permanecer en un emplazamiento fijo. Por el hecho de que se requiere una alineación de la antena con la estación base se requiere de un servicio técnico especializado con sus medidores de campo adecuados. La nomenclatura de este terminal es IDU-CPE-1D2V SIP-RJ. Las unidades *outdoor* de estos equipos WiMAX están pensados para estar ubicados en la parte más alta del edificio, soportados con un mástil.

### 3.2.1 Terminal WiMAX portable Self- Install CPE

El terminal WiMAX Si-CPE es un SU diseñado para aplicaciones *indoor*. El Si-CPE incorpora un chip WiMAX Pro/*Wireless* 5116 de Intel. Se encuentra actualmente disponible en la banda de 3.5 GHz, soportando frecuencias de *downlink* desde 3499.5 MHz con 100 MHz de separación *duplex*. El terminal Si incluye 6 antenas integradas que proporcionan una cobertura de 360° además de un puerto de conexión a una antena externa específica cuyas especificaciones y características se hallan en la tabla 3.3.

El terminal WiMAX Si es una plataforma eficiente para una gran variedad de servicios de banda ancha y conexiones de datos a la estación base. Incorpora la funcionalidad de *bridge*, clasificación y configuración del tráfico y se conecta a un equipo de usuario a través de un puerto *Ethernet* 10/100 BASE-T soportando hasta 512 direcciones MAC.

Si-CPE ofrece diferentes alternativas de gestión:

- Remotamente a través de la estación base, utilizando un programa monitor o SNMP como BreezyLITE.
- Localmente a través del puerto *Ethernet*, utilizando Telnet para acceder al programa monitor de instalador.

- Utilizando un PC o una PDA con un navegador *web* http para acceder al servidor de configuración incorporado.



**Figura 3.7** Terminal WiMAX *indoor* Si-CPE

Las especificaciones radio del Si-CPE se muestran en la tabla 3.2 mientras que las de la antena externa se indican en la tabla 3.3

Ítem	Descripción	
Frecuencia	<i>Uplink</i> (MHz)	3399.5-3500
	<i>Downlink</i> (MHz)	3499.5-3600
Modo de operación	FDD, Half duplex.	
Ancho de banda de canal	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 1.75 MHz</li> <li>▪ 3.5 MHz</li> </ul>	
Resolución de la frecuencia central	0.125 MHz	
Antenas Integradas	Array de conmutación de haz compuesto de 6 antenas de 60° de azimut y 9 dBi de ganancia	
Puerto de antena externa	SMA, 50 Ohm	
Máxima potencia de entrada	-20 dBm antes de saturación	

(al puerto de antena)	0 dBm antes de deterioro
Rango de potencia de transmisión (al puerto de antena)	[-24 dBm, 22 dBm] usando 1 dBm de resolución.  Potencia de Tx máxima: 22 dBm +/- 1 dB máximo.  Rango dinámico ATPC: 46 dB
Modulación	Modulación OFDM 256  BPSK, QPSK, QAM16, QAM64
FEC	Codificación Convolutiva 1/2, 2/3, 3/4.
<i>Throughput</i> bruto: <i>downlink/uplink</i>	Máximo: 12 Mbps, con QAM 64 3/4.  Mínimo: 1.25 Mbps con BPSK 1/2

**Tabla 3.2** Especificaciones radio del terminal WiMAX SI-CPE

Ítem	
Ganancia (excluyendo el cable)	12 dBi
Polarización	Lineal-Vertical
Ancho de haz	75° Horizontal, 16° Vertical
Dimensiones (cm)	33x9.3x2.1
Peso (g)	190

**Tabla 3.3** Especificaciones de la antena externa para el Si-CPE

### 3.2.2 Terminal WiMAX de emplazamiento fijo (IDU-CPE-1D2V SIP-RJ)

El terminal WiMAX IDU-1D2V es un equipo para aplicaciones *indoor* pensado para poder ofrecer a los usuarios una combinación de telefonía IP o VoIP<sup>54</sup> y servicios de datos de banda ancha. Este terminal dispone de una interfaz Ethernet y dos interfaces POTS<sup>55</sup> para servicios de voz primarios y cuyos tipos de conectores pueden ser: RJ-11 o un *terminal block*. El IDU-1D2V o IDU-DV es un *gateway* de voz y se rige sobre los protocolos estándares H.323 y SIP<sup>56</sup> para el establecimiento de llamadas IP. Soporta *codecs* de habla estrechos (comprimidos) o anchos (descomprimidos), supresión del silencio, cancelación del eco de línea y parámetros de telefonía regionales. Los servicios de clase 5 tales como llamada en espera, desvío de llamada y llamada a 3 también están soportados.

El VG-1D2V soporta además de telefonía-IP, acceso a Internet o a cualquier otro servicio basado en *Ethernet*. La unidad puede estar instalada detrás de un router/NAT ya que tiene soporte para NAT<sup>57</sup> permitiendo que los paquetes de voz puedan alcanzar al *GateKeeper* para inicializaciones de llamadas bidireccionales. El *voice gateway* puede manejar hasta 16 VLANs<sup>58</sup> simultáneamente permitiendo ofrecer diferentes servicios a usuarios finales que se encuentren conectados detrás del terminal.

Dos unidades IDU-DV pueden ser conectadas en cascada proporcionando de esta manera 4 líneas POTS independientes sobre una sola unidad radio *outdoor*. El terminal IDU-DV puede ser administrado y supervisado remotamente y/o localmente utilizando SNMP o un servidor *web* integrado.

El terminal WiMAX CPE-IDU-DV soporta el protocolo DRAP<sup>59</sup> que es un protocolo basado en IP/UDP entre el IDU-DV i un servidor DRAP que es capaz de proporcionar de forma dinámica asignación de recursos (ej: ancho de banda) en realizaciones de llamadas. Mediante el uso de este protocolo no es necesaria una configuración específica en el IDU-DV ya que el protocolo proporciona un mecanismo de autodescubrimiento de forma que el IDU-DV puede localizar y registrarse con el servidor DRAP.

---

<sup>54</sup> Voice Over IP

<sup>55</sup> Public Old Telephony System

<sup>56</sup> Session Initiation Protocol

<sup>57</sup> Network Address Translation

<sup>58</sup> Virtual Local Area Network

<sup>59</sup> Dynamic Resource Allocation Protocol



**Figura 3.8** Terminal WiMAX *indoor* IDU-1D2V

El IDU-DV se comunica con la unidad *outdoor* BreezeMAX PRO-CPE y le proporciona potencia (54 VDC) sobre un cable de categoría 5 con conector RJ-45. La unidad ODU incluye un módem, cabezal RF, procesamiento de datos y una antena plana de 17 dBi de ganancia o una conexión a una antena externa, tal y como se describe en la tabla 3.4. El CPE-ODU proporciona conexiones sirviendo como una plataforma eficiente para servicios de banda ancha. El ODU proporciona conexión a la estación base, funcionalidad como *bridge*, clasificación y configuración del tráfico. Esta unidad *outdoor* puede tener una antena directiva incorporada como es el caso del modelo SA o debe conectarse a una antena externa como es el caso del modelo SE. En el modelo SE, la antena que se ha utilizado es una omniazimutal de 2.5 dBi de ganancia y cuya forma redonda se muestra en la figura 3.9 junto con la unidad *outdoor* del modelo SA.



**Figura 3.9** Unidades *outdoor*. PRO-S-CPE, modelos SA y SE.

La tabla 3.4 muestra las especificaciones de la unidad *outdoor* PRO-S-CPE.

Ítem	Descripción	
Frecuencia	<i>Uplink</i> (MHz)	3399.5-3500
	<i>Downlink</i> (MHz)	3499.5-3600
Modo de operación	FDD, <i>Half duplex</i> .	
Ancho de banda de canal	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 1.75 MHz</li> <li>▪ 3.5 MHz</li> </ul>	
Resolución de la frecuencia central	0.125 MHz	
Antena integrada (modelo SA)	17 dBi de ganancia, 20°AZx20°EL, polarización vertical/horizontal	
Puerto de antena (modelo SE)	SMA, 50 Ohm	
Máxima potencia de entrada (al puerto de antena)	-20 dBm antes de saturación  0 dBm antes de deterioro	
Rango de potencia de transmisión (al puerto de antena)	[-26 dBm, 20dBm] con 1 dBm de resolución.  Potencia de transmisión máxima: 20 dBm +/- 1 dB máximo.  Rango dinámico ATPC: 46 dB	
Modulación	Modulación OFDM 256  BPSK, QPSK, QAM16, QAM64	
FEC	Codificación Convolutacional 1/2, 2/3, 3/4.	
<i>Throughput</i> bruto <i>downlink/uplink</i>	Máximo: 12 Mbps, con QAM 64 3/4.  Mínimo: 1.4 Mbps con BPSK 1/2	

**Tabla 3.4** Especificaciones radio del terminal WiMAX PRO-S-CPE

### 3.3 Interfaz de control y gestión de la red WiMAX

En toda red de telecomunicaciones independientemente de la tecnología utilizada para sus enlaces entre nodos es absolutamente necesario el uso de alguna herramienta que se rija sobre un protocolo de gestión que permita una gestión fácil y eficiente. El protocolo SNMP<sup>60</sup> está diseñado para llevar a cabo tareas de gestión de red. Normalmente este protocolo interactúa con una aplicación de usuario para facilitar la gestión de una manera más cómoda. La aplicación de usuario puede estar basado con interfaz grafica o en modo comandos aunque para gestionar una red amplia como por ejemplo una WAN la mayoría de aplicaciones de usuario están basadas en interfaz grafica para permitir al administrador de red una gestión más interactiva y a veces cómoda. En el caso del proyecto en el que se lleva a cabo, los equipos de Alvarion (BS i SU) pueden ser gestionados/administrados localmente o desde la misma estación base mediante una aplicación propia de Alvarion que se conoce como BreezeLITE. Esta aplicación se instala en un equipo de sobremesa que se conecta al puerto de gestión de la estación base a través de un cable de red 100BASE-T.

El esquema que normalmente se tiene en una arquitectura WiMAX es de uno o varios radioenlaces WiMAX NLOS entre el AU i el SU. En la figura 3.10 se puede ver un ejemplo de un radioenlace WiMAX sin visión directa entre un equipo suscriptor de abonado o CPE y la BS 1 además de otros radioenlaces LOS con otras estaciones base.

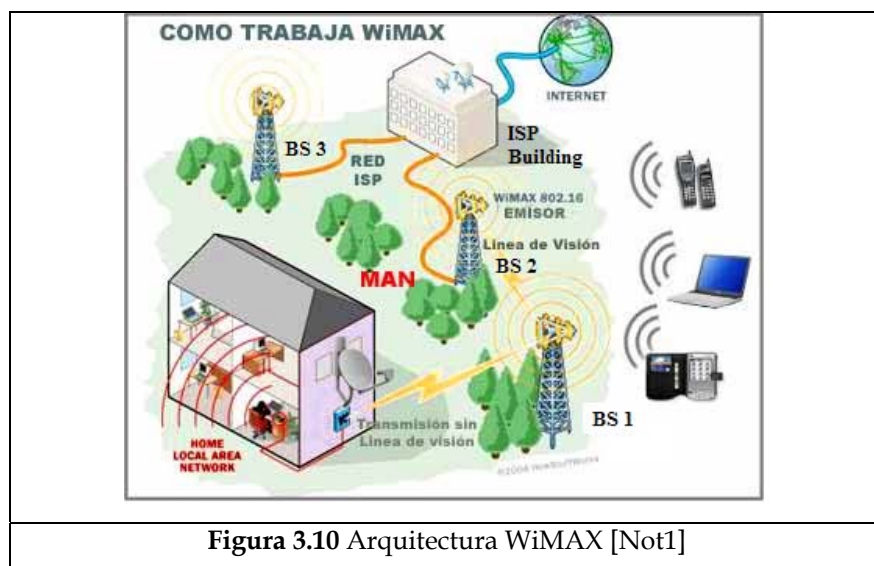


Figura 3.10 Arquitectura WiMAX [Not1]

<sup>60</sup> Simple Network Management Protocol

La entidad que dispone de estaciones base repartidas en una cierta área geográfica y que acostumbra a ser un WISP (*Wireless Internet Service Provider*) puede proveer acceso a Internet a alta velocidad ( $> 1$  Mbps) a todos aquellos usuarios que se encuentran dispersos en amplias zonas de cobertura (celdas) de cada estación base. Por lo tanto en un escenario así se podría optar por el protocolo SNMP para llevar a cabo la gestión de toda la red (estaciones base y equipos de abonado) de una manera fácil y fiable, siempre y cuando exista conectividad entre todos los equipos que se quieren administrar y el equipo que administra. El equipo que administra podría hacerlo mediante BreezeLITE de manera que podría llevar un control y una gestión de cada estación base identificada por un identificador único que consta de tres partes:

- Operador: Identificador del operador y consta de tres grupos de números como por ejemplo 186.190.0
- Celda: Identifica la celda en concreto y está formado por dos grupos de números. Ejemplo: 0.250
- Sector: Identifica el sector en el que se está dando servicio dentro de la misma celda. Ejemplo: 206

Además del identificador propio de la estación base esta se puede identificar en la red por su dirección IP única en su interfaz de gestión o de datos. Mediante las direcciones IP de cada estación base se puede interactuar con todas ellas gracias al soporte del protocolo SNMP de BreezeLITE. La estación base que se está analizando dispone de un agente (módulo software) SNMP versión 1.

Las funciones principales de BreezeLITE son:

- Administrar localmente la estación base. En esto influye la recopilación de información como por ejemplo número de paquetes enviados/recibidos/eliminados a cada una de las interfaces: *data*, *management* y *wireless*. La gestión influye básicamente:
  - o Parámetros de la interfaz radio: ATPC (*Automatic Power Control*), *Multirate support* (modulación adaptativa), ARQ híbrido, nivel de potencia de recepción óptima (*Optimal RSSI*), ancho de banda, potencia de emisión y frecuencia de operación en los canales de *uplink* y de *downlink*.
  - o Parámetros de las interfaces de red (*data* y *mgmt*): dirección IP, máscara de red, puerta de enlace predeterminada, velocidad y duplexado (en el caso que esté desactivada la opción de auto negociación) y para el caso del puerto Data, la VLAN ID.

- Administrar remotamente los SU. Con BreezeLITE es posible añadir más unidades suscriptoras a la red a través de su dirección de enlace MAC. Aquí la gestión de los SUs se divide en dos partes:
  - o Cuando se añade un nuevo SU: Se puede configurar al inicio si el CPE utilizará *ATPC*, *Multirate support* (igual que en la estación base), identificación de la BS a la que se asociará, ancho de banda y frecuencia de *uplink*. A parte de los parámetros de nivel físico también se puede configurar el número máximo de usuarios que va a permitir el CPE.
  - o Cuando se administra un SU activo previamente configurado: En este caso se puede recopilar información a nivel físico así como si el *ATPC* está activo o no, última modulación que se usa, ancho de banda, frecuencia de *uplink*, *uplink SNR/RSSI*, *downlink SNR/RSSI*, el total de *bursts* con sus *BER (Burst Error Rate)* transmitidos/recibidos en todas las constelaciones y la cantidad de *bytes* de datos enviados/recibidos y descartados en Tx y en Rx tanto en las interfaces *Ethernet* como en las interfaces *wireless*.
- Monitorización. La monitorización con BreezeLITE permite analizar el rendimiento de la red mostrando información referente al estado y a los parámetros físicos de cada SU y de la BS (*SNR* de *uplink* y *downlink*, potencia de transmisión (variable con *ATPC*), niveles de potencia recibidos en ambas partes, etc).
- Servicios *Quality of Service*. BreezeLITE permite asignar perfiles QoS en cada uno de los canales de subida y de bajada para cada SU. Estos perfiles incluyen: *RT-VBR (Real Time-Variable Bit Rate)*, *NRT-VBR (Non Real Time-VBR)*, *BE (Best Effort)* y *CG (Committed Guarantee)*. La finalidad de los perfiles de QoS es poder proveer distintos tipos de tráfico (sensibles o no al retardo) a una velocidad adaptable a la necesidad de cada aplicación de usuario (ejemplo: voz como videollamadas equivale a un *RT-VBR* y navegación por Internet a un *Best Effort* o a un *NRT-VBR*) de manera que aquellos más sensibles se les dará mayor calidad de servicio frente a los menos sensibles al retardo.
- Filtrado de tramas. Mediante la opción de filtrado que BreezeLITE lleva incorporada se puede admitir/denegar el acceso a la red *wireless*/cableada de la operadora a aquellos dispositivos (de usuario y CPEs) que sus direcciones MAC/IP se hayan configurado previamente en la estación base.

La figura 3.11 muestra una de las opciones de gestión radio de BreezeLITE.

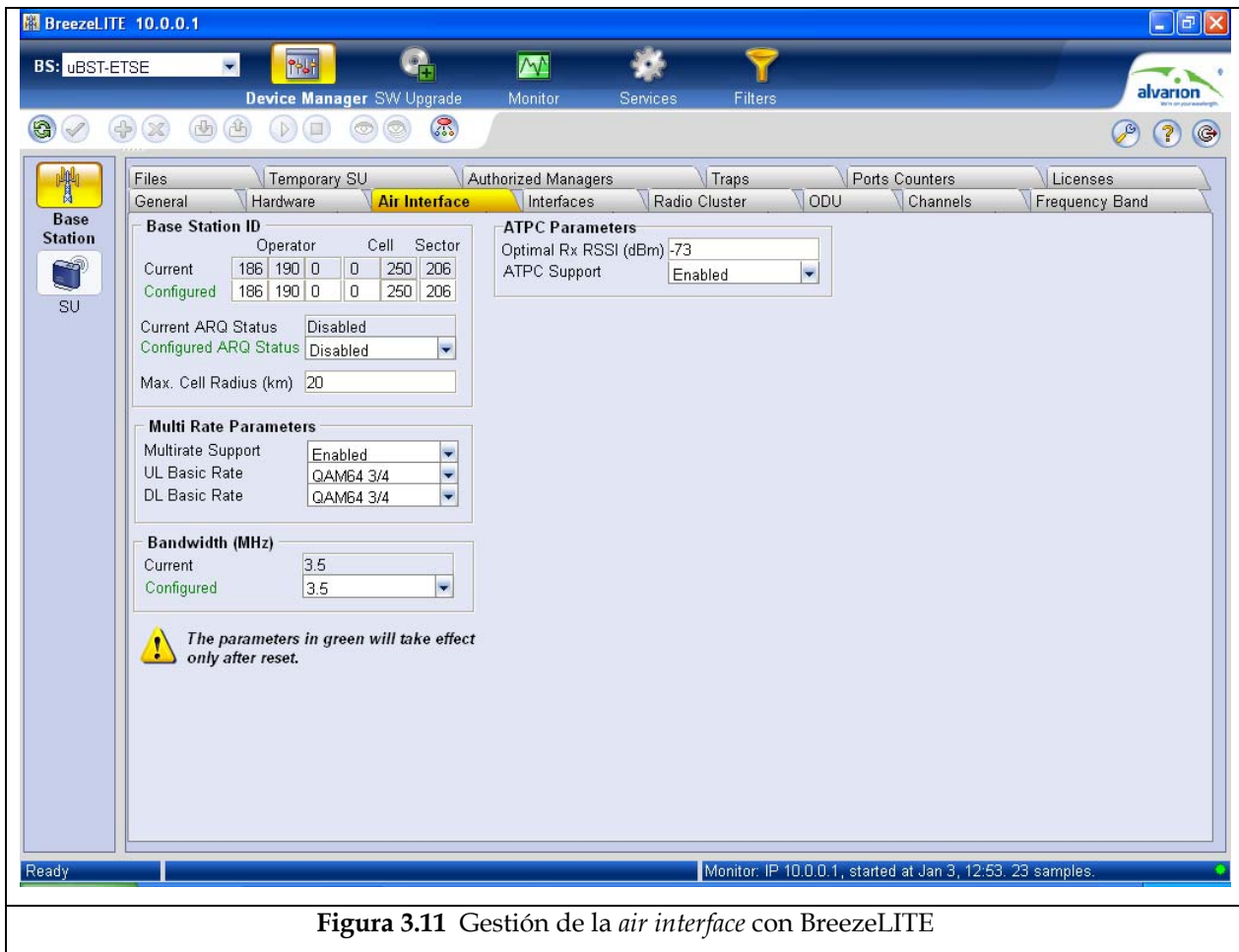


Figura 3.11 Gestión de la air interface con BreezeLITE

### 3.3.1 Protocolo SNMP (*Simple Network Management Protocol*)

El protocolo SNMP es un protocolo de aplicación que facilita el intercambio de información de administración entre dispositivos de red. SNMP forma parte de la familia de protocolos de Internet y utiliza un servicio no orientado a conexión (SNMP permite a los administradores supervisar el desarrollo de la red, buscar y solucionar los problemas así como plantear su crecimiento).

Existen tres versiones del protocolo: SNMPv1, SNMPv2 i SNMPv3. Las dos primeras versiones tienen muchas características en común, pero no obstante SNMPv2 ofrece mejoras. En cambio, SNMPv3 posee cambios significativos en relación con sus predecesores, sobretodo en aspectos de seguridad.

### 3.3.1.1 Componentes básicos de SNMP

Una red administrada a través de SNMP consta de tres componentes principales:

- **Dispositivo administrado:** Es un nodo que reside en una red administrada y que contiene un agente SNMP. Estos dispositivos se encargan de recoger y almacenar información de administración que puede ser puesta a disposición de los sistemas de gestión de red o NMS's (*Network Managements*) a través de mensajes SNMP. En el caso del proyecto los dispositivos a administrar son los equipos de abonado (Si-CPE y PRO-CPE). En un caso real los dispositivos a administrar podrían ser otras estaciones base y los equipos suscritores de abonado. Además, también se podría ver una estación base como una red de dispositivos o elementos administrados (unidades radio interfaces de red, etc) que son gestionados por una entidad SNMP superior o NMS: BreezeLite.

- **Agente:** El agente se trata de un módulo de administración de red que reside sobre un dispositivo administrado y que posee un conocimiento local de la información de administración (ej: nombre de *bursts* enviados/recibidos, potencia de transmisión, potencia recibida, etc.). La información de administración se traduce en formato SNMP y se encuentra organizada en jerarquías.

- **NMS (*Networking Management System*):** Es un sistema de gestión que ejecuta aplicaciones que supervisan y controlan los dispositivos administrados. Los NMS's proporcionan el volumen de recursos de procesamiento y memoria requeridos para la administración de la red. Uno o más NMS's deben existir en cualquier red administrada. La estación base del proyecto es un ejemplo de un sistema de gestión de red.

### 3.3.1.2 Comandas básicas de SNMP

Las comandas básicas de SNMP que se pueden realizar para supervisar y controlar un dispositivo administrado son:

- **Lectura:** comanda utilizada por un NMS para supervisar los elementos de la red. El NMS examina diferentes variables que son mantenidas por los dispositivos administrados.

- **Escritura:** comanda utilizada por un NMS para modificar los valores de las variables almacenadas en los dispositivos administrados.

- **Notificación:** comanda usada por los dispositivos administrados con el objetivo de notificar al NMS cuando surge un evento.

- **Operaciones transversales:** comanda que el NMS utiliza para determinar que variables soporta un dispositivo administrado y para recoger secuencialmente información en tablas de variables.

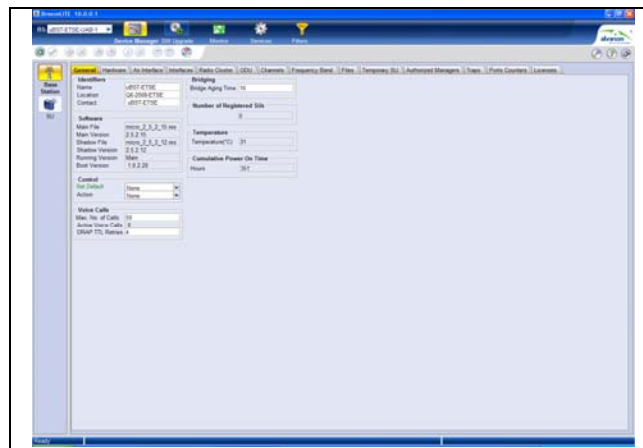
### 3.4 Configuración básica de la estación base WiMAX

En esta sección se describe los pasos necesarios para realizar una configuración básica de la micro estación base WiMAX de Alvarion mediante el programa de gestión BreezeLITE. Con la configuración básica se tendrá una red WiMAX funcionando cumpliendo los requisitos de nivel físico. Para empezar la figura 3.12 muestra la pestaña General de la estación base. En ella se puede añadir unos identificadores formados por un nombre, una localización y un contacto. El resto es solo información referente al equipo (versión del *firmware*, temperatura, tiempo de funcionamiento, etc) y parámetros de configuración irrelevantes para la puesta en funcionamiento de la red.

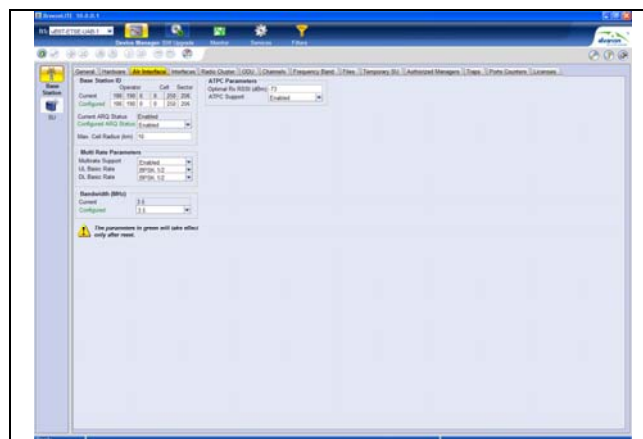
Posteriormente en la pestaña *Air Interface* que se muestra en la figura 3.13 se debe configurar:

- Identificación de la BS: La identificación de la estación base consta de 6 grupos de tres dígitos cada uno. Los primeros 3 grupos definen el ID del operador de red, los siguientes dos grupos definen la identificación de la celda en concreto y el último grupo define la identificación del sector.
- ARQ Status: El parámetro ARQ habilitado/deshabilitado controla si se usa un algoritmo ARQ para detectar errores y solicitar retransmisiones de mensajes *unicast* (aplicable solo para servicios *Best Effort* y *Non Real Time*).
- Max. Cell Radius: Este parámetro es usado para adaptar varios parámetros de *timing* de nivel MAC en el momento en que se recibe un mensaje para alcanzar su destinación. El retardo temporal es dependiente sobre la distancia entre transmisor-receptor. Los parámetros de *timing* deberían ser adaptados al retardo más grande esperado, es decir, la distancia más grande entre la estación base y el terminal SU servido por ésta. Un SU que se encuentre localizado a una distancia mayor que el configurado en este parámetro, será rechazado durante el proceso de acceso a la red. Este parámetro debe de ser de 10 Km o equivalentemente el tiempo de símbolo que es de 68µs.

- Multi Rate Support: Aquí se configuran las constelaciones básicas que se usarán en los enlaces de *uplink/downlink* y además se debe tener activado el algoritmo de modulación y codificación adaptativa.
- Bandwidth: Ancho de banda del sistema, 3.5 MHz, en el caso de WiMAX 802.16-2004.
- ATPC Parameters: Se especifica el nivel óptimo de potencia en recepción en la estación base en el que todas las transmisiones deberían ser recibidas por las unidades AU-ODU para asegurar un rendimiento óptimo. El rango es de [-103;-60] dBm. Por otro lugar el algoritmo de control automático de potencia debe estar habilitado.



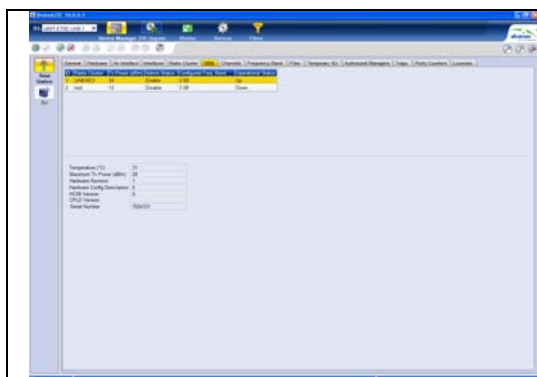
**Figura 3.12** Pestaña General de la estación base  
(BreezeLITE)



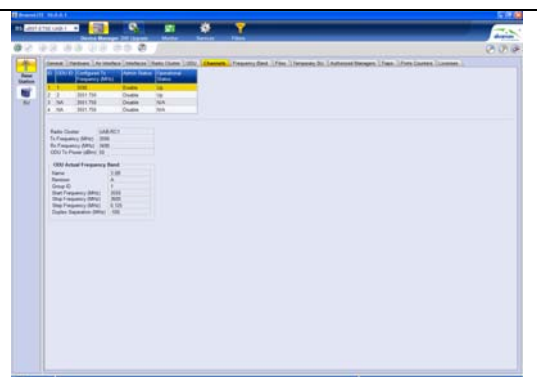
**Figura 3.13** Parámetros configurados de la Air  
Interface de la estación base.

Para especificar la potencia de transmisión (sin considerar la antena) se utiliza la pestaña de ODU que se muestra en la figura 3.14. La banda de frecuencia configurada es la

3.5b equivalente a *uplink*: 3450-3500 MHz y *downlink*: 3550-3600 MHz. La frecuencia de transmisión de *downlink* se configura en la pestaña *channels* como se indica en la figura 3.15.

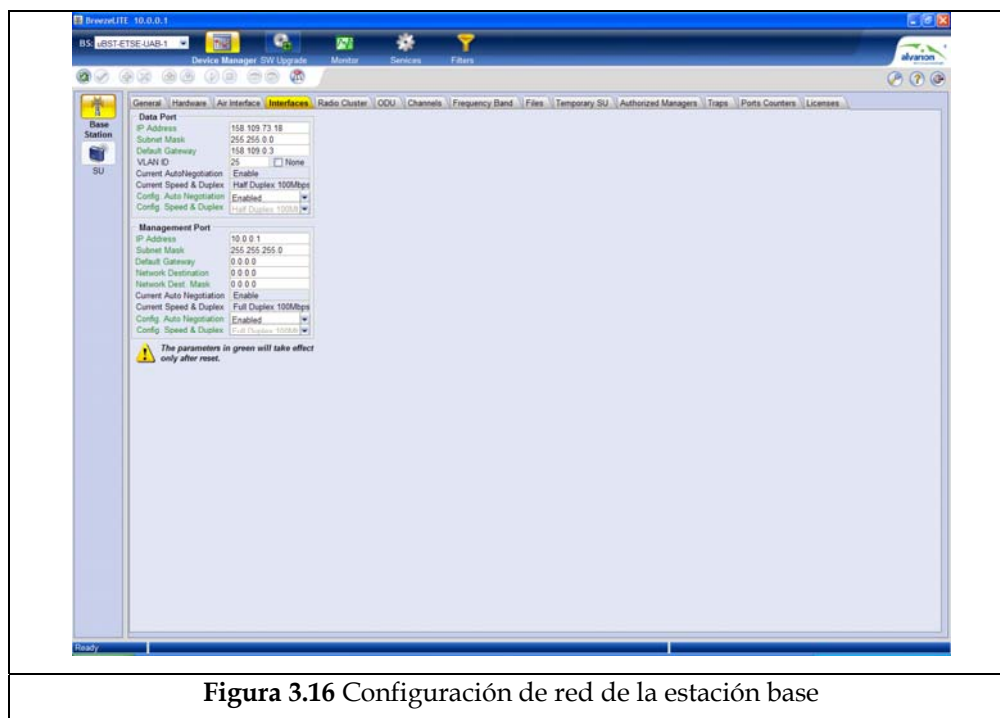


**Figura 3.14** Potencia de transmisión configurada (el máximo es de 28 dBm).



**Figura 3.15** Configuración de la frecuencia de transmisión en el canal de bajada.

Con el proceso realizado hasta este punto ya se tendría una red WiMAX en funcionamiento. Para que los usuarios puedan acceder a Internet se debe conectar la estación base a un dispositivo de nivel 3, a un router por ejemplo y configurar las direcciones de sus interfaces de red y de gestión. La figura 3.16 muestra la configuración que se tiene en la estación base WiMAX.



**Figura 3.16** Configuración de red de la estación base

## 4 CAMPAÑA DE MEDIDAS

En este capítulo se obtienen una serie de medidas de cobertura WiMAX en distintos tipos de escenarios: en interiores o *indoor* y en exteriores u *outdoor*. El escenario *indoor* es el peor de los escenarios para una red WiMAX debido a la gran cantidad de obstáculos (ej: paredes, entresuelos, u otros) que provocan atenuación y por lo tanto dificultan la propagación de la señal. Para la predicción de la potencia recibida estos obstáculos se deben tener en cuenta.

Concretamente las medidas que se presentan en este capítulo tanto en escenarios *indoor* como *outdoor* se basan en obtener unos modelos de *Path loss* a partir de los resultados de las potencias recibidas por el terminal de usuario en distintas posiciones, siendo la mayoría de ellas canales de tipo NLOS<sup>61</sup>. Para saber como es la calidad de un radioenlace es importante conocer la SNR, la modulación (por lo tanto el *throughput* bruto) y el nivel de potencia recibida en el terminal de usuario y también en la BS. Así pues se tendrá la SNR *uplink/downlink*, la RSSI<sup>62</sup> *uplink/downlink* y la modulación/tasa de codificación *uplink/downlink*.

Antes de empezar a describir los escenarios empleados, en la sección 4.1 se describe un estado de arte sobre el *path loss* de la tecnología WiMAX en *outdoor* que se emplea en este proyecto a 3.5GHz y además algún par de artículos sobre análisis empíricos en *indoor* empleando otras tecnologías.

---

<sup>61</sup> *Non Line-Of-Sight*

<sup>62</sup> *Received Signal Strength Indicator*

## 4.1 Estado de Arte

El desarrollo de este capítulo basado en la obtención de modelos de *path loss* de WiMAX en entornos *indoor* y *outdoor* sigue procedimientos similares a otros trabajos existentes en la literatura. Estos artículos se muestran en la sección de referencias de la memoria del proyecto y se resumen en esta sección.

Empezando por un artículo teórico publicado por [Afr07] describe la metodología para la obtención de un modelo de *path loss* a partir de los resultados medidos.

Otro artículo también teórico de [Vak06] describe la metodología usada para estimar empíricamente la cobertura WiMAX a 3.5GHz. La metodología que emplea utiliza el exponente de *path loss* definido por IEEE (el exponente de *path loss*,  $\gamma$ , es un parámetro que caracteriza el tipo de escenario donde se obtienen las medidas en función de su valor).

El artículo de [Imp07] describe las medidas de *path loss* obtenidas a 3.5 GHz de un *trial test* de WiMAX en ambientes rurales. Sus resultados obtienen  $\gamma$  variables entre 2.13-3 en función de diversos factores, tales como: la altura de la antena receptora y la variación de la estación del año a 3.7GHz asociada al follaje de los árboles a una distancia hasta 6 Km de la estación base. Además realiza una comparativa entre sus resultados obtenidos por regresión de mínimos cuadrados, *Least Squares* y los obtenidos por otros modelos empíricos disponibles (SUI de IEEE y COST231-Hata) demostrando que dichos modelos existentes pueden ser inadecuados en escenarios rurales debido a que producen una sobre estimación de las pérdidas de propagación.

El artículo de [Gro07] se trata de un estudio sobre el rendimiento del nivel físico y del *path loss* en el desarrollo de la variante de WiMAX de acceso fijo a 3.5GHz a partir de las medidas de la RSSI y la SNR. Se han empleado 10 BS<sup>63</sup> transmitiendo a un máximo de 28 dBm y usando antenas sectoriales de 14 dBi de ganancia. Todas las BSs se encuentran esparcidas en zonas urbanas, semi-urbanas y rurales, cerca de la ciudad de Gjøvik, Noruega. De la misma manera que el artículo de [Imp07], en el trabajo de [Gro07] se comparan sus resultados con los de otros modelos bien conocidos (como por ejemplo el modelo de espacio libre). En su campaña de medidas han empleado 10 estaciones base WiMAX. El total de unidades suscriptoras (SUs) es de 850 siendo localizadas la mayoría de ellas en condiciones LOS y el resto en condiciones NLOS.

---

<sup>63</sup> Base Station

[Erc99] presenta en su artículo publicado en una revista de IEEE en julio del 1999 y titulado “*An empirically based path loss model for wireless channels in suburbans environments*” un modelo de *path loss* estadístico derivado a partir de datos experimentales a 1.9 GHz coleccionados a lo largo de Estados Unidos en 95 macroceldas existentes. El modelo obtenido es válido para áreas suburbanas y se distingue entre diferentes categorías de terreno. Además, su modelo aplica a distancias (0.1Km-8Km) y alturas de la antena base (10m-80m) no cubiertas por los modelos existentes. La caracterización utilizada es una recta lineal que produce las pérdidas en dB versus distancia y con una variación *gaussiana* alrededor de la recta debida al *fading*. La pendiente de la recta (correspondiente a  $\gamma$ ) es una variable aleatoria de una celda a otra con una desviación estándar  $\sigma$  debida también al *fading*. Estos dos parámetros, son modelados estadísticamente con las dependencias de la altura de la antena base (entre 10m-80m) y la categoría del terreno.

La publicación de [Luc07] describe modelos de *path loss* para IEEE 802.16 en escenarios suburbanos y tipo campus. En dicho artículo se presentan los resultados principales de una campaña de medidas sobre la propagación a 3.5GHz conducidos por el grupo *British Telecom* de Italia y la compañía Ericsson con la Universidad de Roma “Tor Vergata”. El modelo de *path loss* resultante a partir de datos experimentales presentado muestra una  $\gamma$  del orden de 3.03 para el escenario suburbano (conducido por BT) y de 3.53 para el escenario tipo campus (conducido por Ericsson). El modelo obtenido en ambos casos es fruto de la colección de hasta 200 medidas a lo largo de una ruta en coche definida (la mayoría en condiciones NLOS) sobre la potencia recibida pero solo unas 170/180 medidas han sido utilizadas para evaluar los parámetros de los modelos de *path loss*. Finalmente presentan una comparativa entre el modelo OS (*One Slope*) también conocido como modelo SUI (el de *Erceg*) y el modelo de espacio libre así como un análisis de cobertura. Se observa que según el modelo la cobertura en un escenario tipo campus es del orden de 1570m y en un escenario suburbano de 996m.

El artículo sobre “*Empirical propagation model for WiMAX at 3.5 GHz in an urban environment*” publicado por [Val08], presenta un modelo de propagación empírico obtenido de un proyecto piloto llevado a cabo en Saarbruecken, Alemania. Los resultados de la campaña de medidas amplia del testeo de WiMAX en un escenario urbano operando a la frecuencia de 3.5GHz son presentados y comparados con sus propias predicciones del nivel de campo. El procedimiento que ha llevado a cabo es parecido al de [Erc99], [Imp07], [Luc07], con un vehiculo ha seguido una ruta coherente para obtener suficientes medidas sobre el nivel de potencia recibida para luego poder obtener un modelo. Los resultados

finales muestran una  $\bar{\gamma} = 3.91$ , coherente para un escenario urbano. También concluyen que el 99% de todos los puntos de recepción medidos con antenas a 2m de altura, tienen lugar dentro de un radio de 1500m. Esto necesariamente no tiene que ser el caso de otros lugares o sistemas y que este rango de cobertura puede ser mayor si se utilizan antenas a alturas superiores.

El último artículo de pruebas en *outdoor* es el publicado por [Kon07]. Este artículo presenta los resultados obtenidos por COSMOTE en los meses Febrero-Abril del 2006 sobre el comportamiento de la tecnología WiMAX fijo (IEEE 802.16-2004) en un el centro de un entorno urbano (la ciudad de Atenas) a lo largo de una calle y escenario NLOS. Se ha utilizado un ordenador portátil y un terminal portable WiMAX CPE. Se demuestra que la característica principal en este escenario son las variaciones rápidas impredecibles debido a la existencia de vehículos y personas en movimiento conocido como efecto *shadow fading* o *shadowing*. Estas medidas simulan el rendimiento del sistema que un usuario final percibe en una cierta localización fija como en una cafetería, en un restaurante, etc. La movilidad de los obstáculos (vehículos, personas) hace que el *throughput* percibido por el usuario final sea aleatorio. Esta variabilidad del *throughput* puede afectar severamente a la calidad de aplicaciones de tiempo real tales como videoconferencia o aplicaciones VoIP sensibles al retardo.

El artículo de [Xu07] obtiene modelos empíricos de *Path loss* de una y de doble pendiente a 5.25 GHz con 100 MHz de ancho de banda en un escenario de oficinas *indoor* a partir de un conjunto extensivo de datos experimentales coleccionados en un edificio de oficinas en la localidad de Beijing, China. Los análisis llevados a cabo son: visión directa en la misma oficina de la BS, oficina-pasillo sin visión directa y oficina-oficina. Las medidas de canal radio han sido obtenidas utilizando PropSound (TM), una sonda de canal radio multidimensional del grupo "Elektrobit". Como antena transmisora en la BS se ha utilizado un array cilíndrico omnidireccional formado por 25 antenas parche de doble polarización. Como antena receptora se ha empleado un array de 8 monopolos circular y con polarización vertical. La potencia transmitida para las medidas es de 26 dBm. Los resultados sobre el exponente de *path loss* en ambos artículos demuestran que en *indoor* se pueden obtener  $\bar{\gamma} < 2$ , debido al efecto de guía de onda causada por las paredes, el suelo y lo que rodea la habitación/pasillo. En condiciones LOS, se obtiene a 5.25 GHz un valor de  $\bar{\gamma} = 1.48$  dentro de una habitación y además un modelo de doble pendiente con  $\bar{\gamma} = 2.58$  y  $\bar{\gamma} = 2.91$  a lo largo de un pasillo.

El artículo de [Kiv01] explica el procedimiento seguido para obtener un modelo empírico de *path loss* a 5.3 GHz basado también a partir de una serie de campaña de medidas extensa en cuatro escenarios *indoor*: tres oficinas y una gran sala de espera de un aeropuerto. En el transmisor se emplea una sonda que genera una secuencia pseudoruidosa a partir de 511 chips con una frecuencia de señal *chirp* de 53.75 MHz para modular la señal portadora. La potencia de transmisión es de 30 dBm y el receptor tiene una figura de ruido de 3 dB. Las distintas antenas utilizadas en transmisión y en recepción en los diferentes escenarios son: una antena discono de 1 dBi de ganancia, omnidireccional, polarización vertical y  $\Delta\theta_{-3dB} = 108^\circ$ ; una antena piramidal de 13 dBi de ganancia y con anchos de haz en plano E y H de  $\Delta\theta_{-3dB} = 37^\circ, \Delta\phi_{-3dB} = 31^\circ$  y por último una antena parche de 6.7 dBi de ganancia y  $\Delta\theta_{-3dB} = 70^\circ, \Delta\phi_{-3dB} = 80^\circ$ . Los resultados son valores de  $\bar{\gamma}$  entre 1.3-1.5 en LOS. El artículo demuestra que en condiciones NLOS se obtienen valores del exponente de *path loss* mayores ( $\bar{\gamma} = 2.9-4.8$ ) para los diferentes escenarios de oficina. Una razón es debido a los diferentes mecanismos de propagación dominantes debido a las estructuras diferentes de paredes del edificio: propagación a través de las paredes, guías de onda combinadas con difracción, y *scattering* difuso de estructuras no homogéneas.

Como ya se ha comentado al inicio de este apartado, se sigue el procedimiento de la literatura en el que a partir de las potencias recibidas empíricas se obtienen, por el método de aproximación por mínimos cuadrados, los coeficientes de un modelo empírico genérico.

- En *indoor* se utiliza el terminal *Self-Install* de 6 antenas de 9 dBi de ganancia y  $\Delta\phi_{-3dB} = 60^\circ$  y se realizan medidas en diferentes escenarios en el interior de un edificio: en LOS a lo largo de un pasillo, en NLOS entre oficinas y en NLOS entre oficina-pasillo. Además se comparan dos modelos: uno que cuantifica los obstáculos y tiene en cuenta la atenuación y el otro que busca una  $\bar{\gamma}$  que se corresponda con todas las medidas. La diferencia con los dos artículos mencionados es que en el proyecto no se colecciona un extenso conjunto de medidas para obtener los modelos empíricos. La potencia transmitida por la BS es de 13 dBm y utiliza una antena sectorial de 14.5 dBi de ganancia.
- En *outdoor* directamente se han comparado dos modelos a partir de los datos empíricos recogidos en un máximo de 12 posiciones equiespaciadas a distancias de mínimo 100m: el modelo *Erceg* que se describe en 4.3.1 y otro modelo que se basa en obtener los coeficientes de una recta de la forma  $L = A+B \cdot \log(d)$ . Se demuestra que el

modelo más aproximado a los datos empíricos es el último. La potencia que se transmite es de 38 dBm y se emplea una antena omnidireccional de 10 dBi de ganancia. Las medidas han sido recogidas empleando un terminal con dos antenas externas: una antena directiva de 17 dBi de ganancia y  $\Delta\theta_{-3dB} = 20^\circ, \Delta\phi_{-3dB} = 20^\circ$  y una antena omniazimutal de 2 dBi.

## 4.2 Descripción de los escenarios

### 4.2.1 Escenario *indoor*

Las medidas que se obtienen en este escenario han sido realizadas en el edificio Q6 de la escuela ETSE de la Universidad Autónoma de Barcelona. Este edificio consta de tres plantas y tiene unas dimensiones de 48.51m x 11.935m x 34.75 m. (la altura del edificio se ha medido desde la posición más baja hasta la posición más alta del mismo).

Las figuras 4.1-4.3 muestran el edificio con diferentes vistas. Se puede observar que entre la planta 0 y la planta 1 (planta central) existe una pequeña elevación del terreno de aproximadamente 3.84 m. La altura respecto del mar para la zona más baja del terreno es de aproximadamente 130 m<sup>64</sup>.



**Figura 4.1** Vista frontal del edificio Q6

<sup>64</sup> La altura respecto el mar se obtiene con los mapas que ofrece el software *GoogleEarth*



Figura 4.2 Vista lateral (1) del edificio Q6



Figura 4.3 Vista lateral (2) del edificio Q6

Respecto a la arquitectura de cada una de las plantas, las figuras 4.4, 4.5 y 4.6 muestran de manera aproximada el diseño o esquema interior. El tipo de material de las paredes es de doble aplacado de cartón yeso y su grosor es de 30 cm. La figura 4.7 incorpora las medidas de altura entre plantas y del mismo edificio así como la localización de la antena omnidireccional de WiMAX. Las medidas obtenidas no son exactas al 100% pudiendo haber errores de cm, no obstante estos errores no afectarán en gran medida a los resultados que se obtengan en los siguientes apartados.

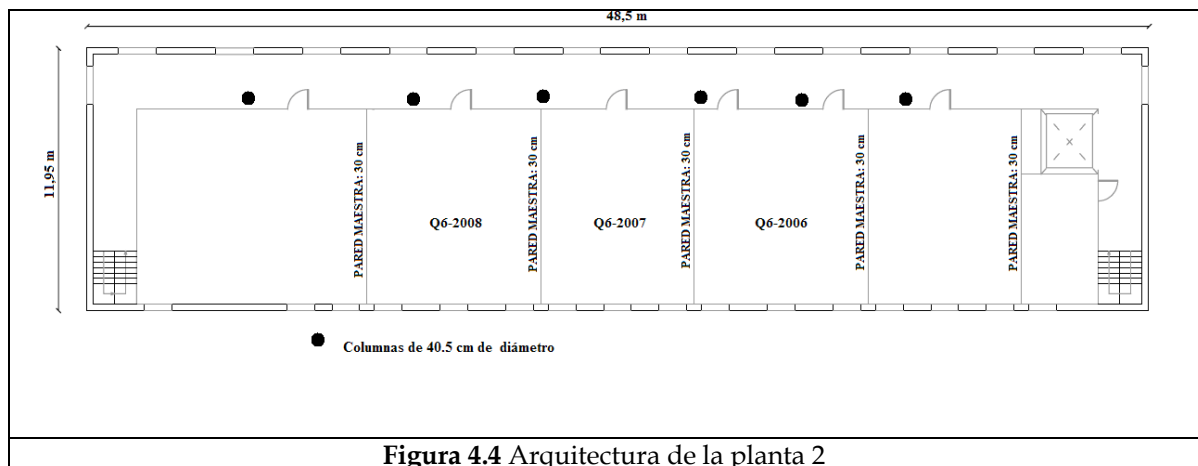


Figura 4.4 Arquitectura de la planta 2

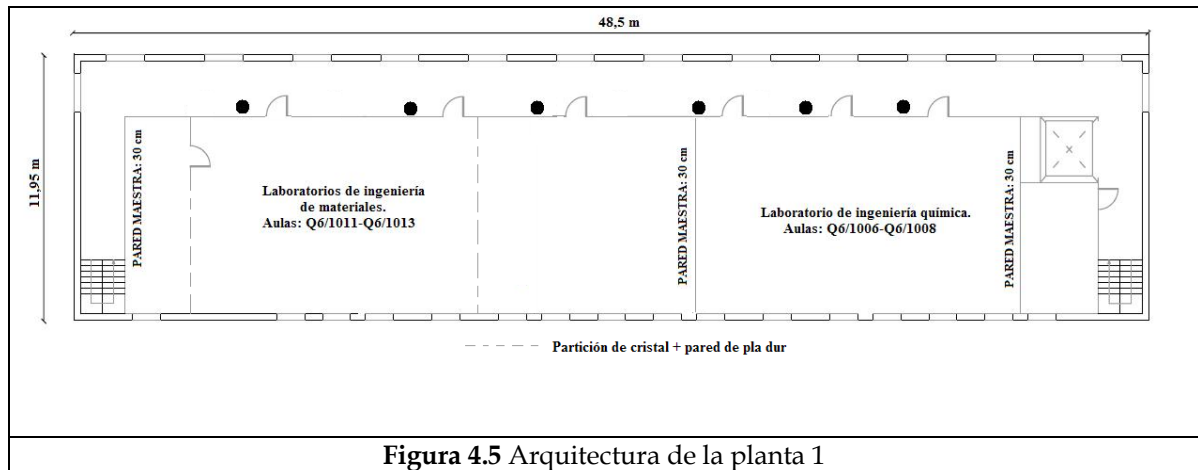


Figura 4.5 Arquitectura de la planta 1

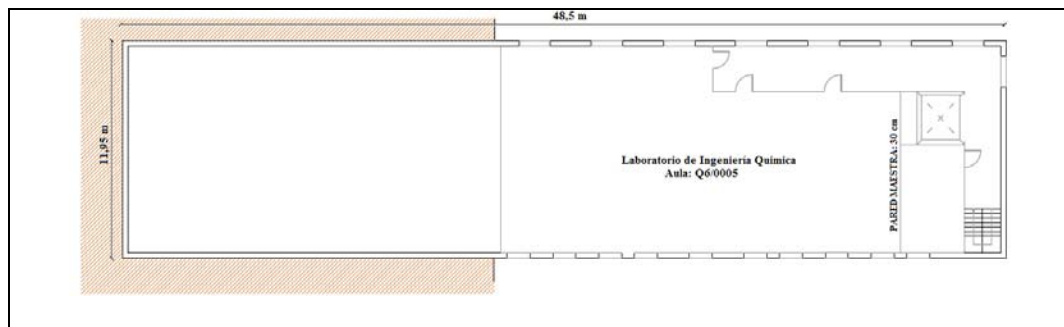


Figura 4.6 Arquitectura de la planta 0

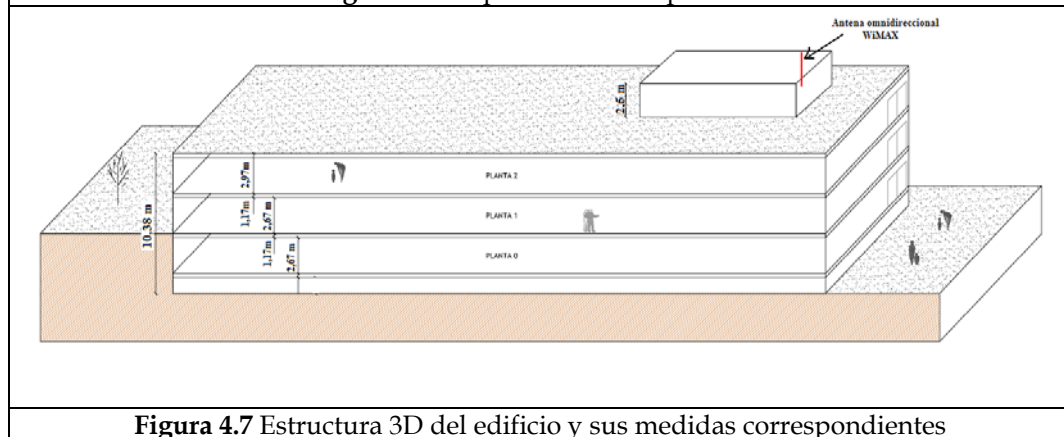


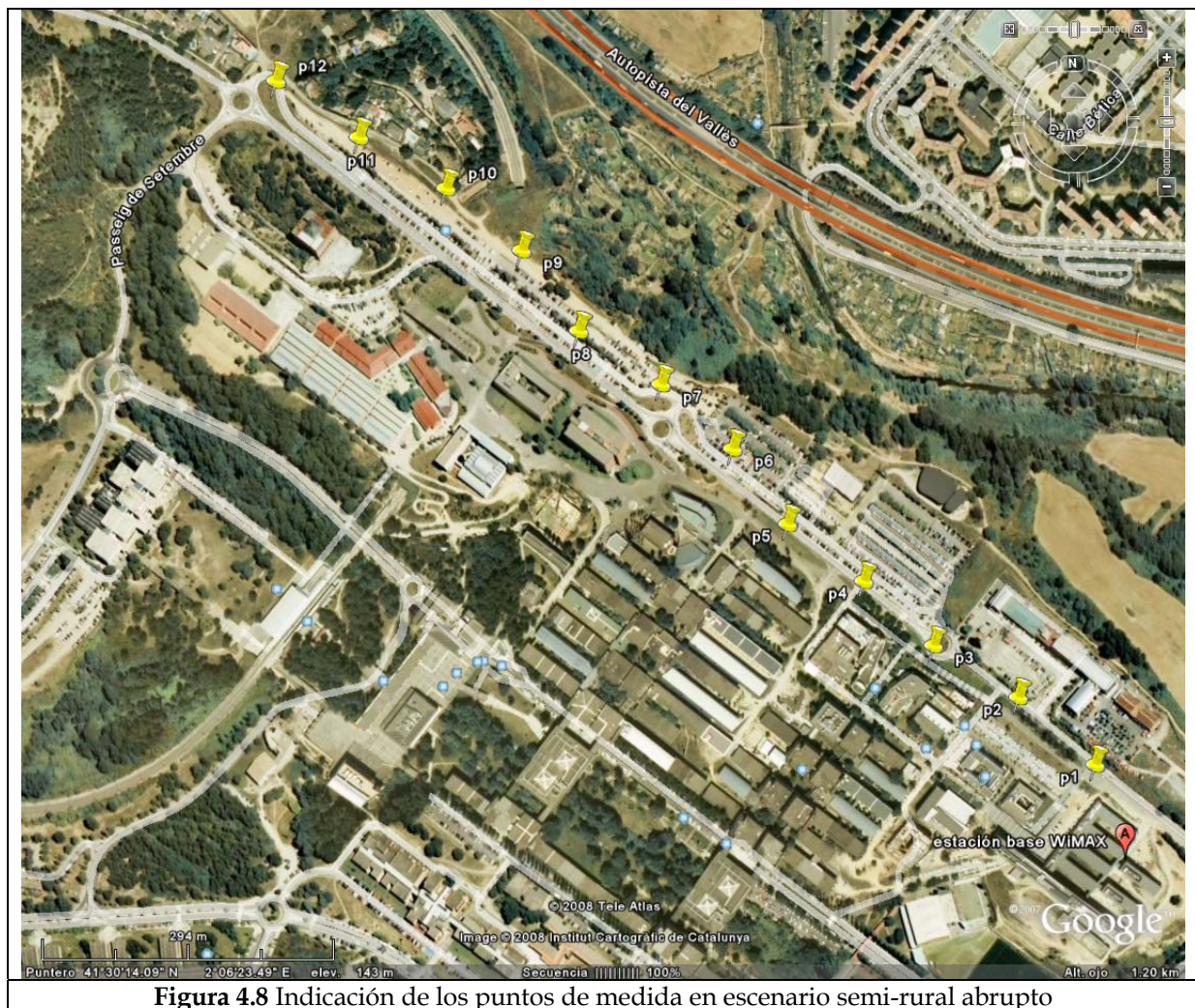
Figura 4.7 Estructura 3D del edificio y sus medidas correspondientes

#### 4.2.2 Escenario semi-rural (*outdoor*)

Se entiende como escenario semi-rural aquel tipo de escenario caracterizado por una baja densidad de edificios entre BS y FS<sup>65</sup>. Dentro del campus se han escogido posiciones equiespaciadas una distancia de 100 m sobre una carretera paralela al edificio donde se encuentra la estación base WiMAX tal y como se muestra en el mapa de las figura 4.8 y 4.9. La carretera donde se encuentran las posiciones de medida en el primer caso presenta elevaciones del terreno en ciertos tramos mientras que para el segundo caso ocurre lo contrario, la altura del terreno respecto el mar se mantiene más o menos constante durante

<sup>65</sup> Fixed Station

un cierto tramo y luego reduce progresivamente. El escenario de la figura 4.9 es más suave que el primero y por esta razón también se obtienen medidas para la obtención de un modelo empírico de *path loss*. El gráfico de la figura 4.10 muestra aproximadamente el perfil del terreno para los dos escenarios. En el centro se encuentra la estación base WiMAX más o menos a una altura de 13.5 m sobre el terreno. Se observa como para el escenario semi-rural abrupto el terreno mejora a partir de la posición 3 mientras que para el otro escenario sucede más o menos lo contrario a partir de la posición 6. Además también se muestran los primeros obstáculos que influyen en la potencia recibida en la primera posición para el caso del escenario semi-rural abrupto y entre las posiciones 1-6 para el escenario semi-rural suave. Esta repercusión se demostrará que influye en la obtención de un modelo de *path loss* coherente para el tipo de tipo de escenario.



Posiciones de medida	Tipo Escenario	Latitud	Longitud	Distancia a la BS	Altura respecto nivel del mar
p1	NLOS	41°30'3.54"N	2° 6'44.91"E	100 m	135 m
P2	NLOS	41°30'5.96"N	2° 6'41.57"E	200 m	135 m
p3	NLOS	41°30'7.86"N	2° 6'37.84"E	300 m	135 m
p4	NLOS	41°30'10.18"N	2° 6'34.78"E	400 m	137 m
p5	NLOS	41°30'12.25"N	2° 6'31.42"E	500 m	142 m
p6	LOS	41°30'14.87"N	2° 6'29.08"E	600 m	147 m
p7	NLOS	41°30'17.15"N	2° 6'26.00"E	700 m	149 m
p8	NLOS	41°30'19.08"N	2° 6'22.44"E	800 m	149 m
p9	NLOS	41°30'21.86"N	2° 6'20.06"E	900 m	150 m
p10	NLOS	41°30'24.04"N	2° 6'16.83"E	1000 m	153 m
p11	NLOS	41°30'25.83"N	2° 6'13.11"E	1100 m	158 m
P12	NLOS	41°30'27.80"N	2° 6'9.58"E	1200 m	161 m

Tabla 4.1 Datos de las posiciones de medida en el escenario de la figura 4.8



Figura 4.9 Indicación de los puntos de medida en escenario semi-rural suave

Posiciones de medida	Tipo Escenario	Latitud	Longitud	Distancia a la BS	Altura respecto nivel del mar
p1'	NLOS	41°30'0.14"N	2° 6'50.78"E	100 m	135m
p2'	NLOS	41°29'57.75"N	2° 6'54.23"E	200 m	135m
p3'	NLOS	41°29'55.80"N	2° 6'57.86"E	300 m	135m
p4'	NLOS	41°29'53.26"N	2° 7'0.69"E	400 m	135m
p5'	NLOS	41°29'51.84"N	2° 7'4.66"E	500 m	136m
p6'	NLOS	41°29'50.33"N	2° 7'8.47"E	600 m	133m
p7'	NLOS	41°29'49.06"N	2° 7'12.40"E	700 m	126m
p8'	NLOS	41°29'48.01"N	2° 7'16.74"E	800 m	120 m
P9'	NLOS	41°29'46.70"N	2° 7'20.60"E	900 m	116 m
p10'	NLOS	41°29'45.02"N	2° 7'24.36"E	1000 m	100 m

Tabla 4.2 Datos de las posiciones de medida en el escenario de la figura 4.9

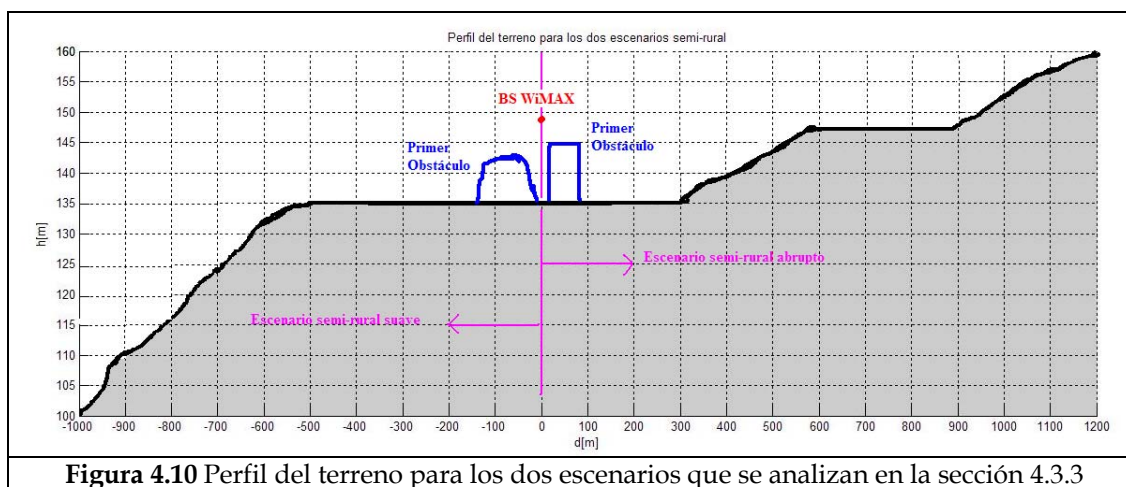


Figura 4.10 Perfil del terreno para los dos escenarios que se analizan en la sección 4.3.3

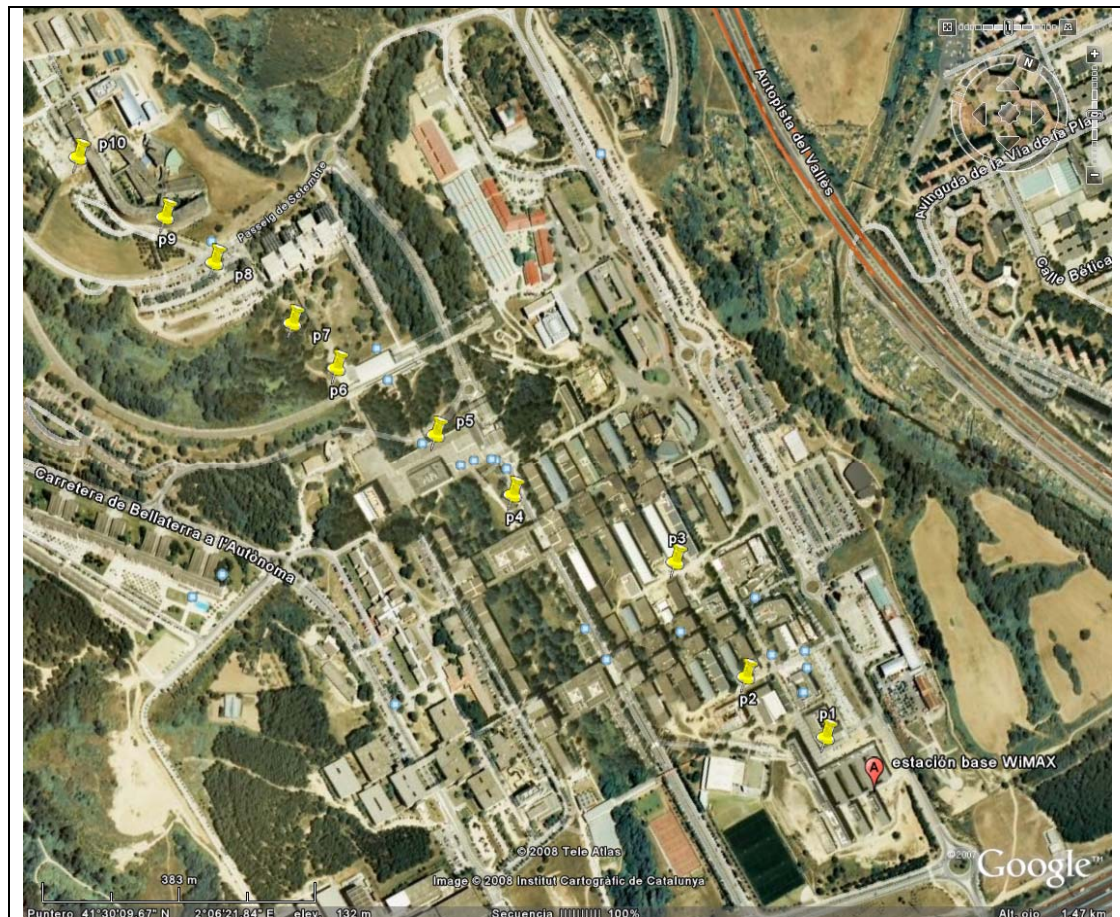
### 4.2.3 Escenario semi-urbano (*outdoor*)

Como escenario semi-urbano se ha pensado como el de la figura 4.11, cuya distribución de edificios más o menos es uniforme. En este escenario se tiene una gran densidad de edificios alrededor por lo que se espera que las pérdidas que se obtengan sean más elevadas que en los escenarios semi-rural presentados en el apartado anterior. Las 10 posiciones de medida no se encuentran equiespaciadas como es de suponer, en un entorno con muchos obstáculos no se pueden definir distancias equiespaciadas como se realiza en el escenario semi-rural.

La primera posición a 100 m se encuentra frente a un edificio que impide la visibilidad con la BS WiMAX hecho que causará una potencia recibida mucho menor que la que se obtiene en condiciones LOS (-36 dBm). De la misma manera ocurre para el resto de las posiciones que se encuentran con más obstáculos hacia la estación base (la mayoría edificios).

En cuanto a la tabla 4.3, se muestra las coordenadas de los puntos de medida así como la elevación respecto el nivel del mar, la distancia a la BS y el tipo de escenario. Se

observa que todas las posiciones son NLOS. Además entre las posiciones 5 y 9 existe una pendiente positiva del terreno, poco pronunciada. La zona de alrededor de la posición 9 se encuentra más o menos por encima de los edificios que existen entre la posición 5 y la posición donde se encuentra la BS WiMAX.



**Figura 4.11** Indicación de los puntos de medida en escenario semi-urbano

Posiciones de medida	Tipo Escenario	Latitud	Longitud	Distancia a la BS	Altura respecto nivel del mar
p1	NLOS	41°30'1.54"N	2° 6'42.52"E	100 m	131 m
p2	NLOS	41°30'2.76"N	2° 6'36.72"E	234.37 m	125 m
p3	NLOS	41°30'6.49"N	2° 6'30.11"E	421.94 m	133 m
p4	NLOS	41°30'6.67"N	2° 6'19.38"E	657.90 m	131 m
p5	NLOS	41°30'8.00"N	2° 6'13.72"E	795.56 m	138 m
p6	NLOS	41°30'9.20"N	2° 6'6.65"E	963.37 m	139 m
p7	NLOS	41°30'10.38"N	2° 6'3.20"E	1046.08 m	141 m
p8	NLOS	41°30'11.66"N	2° 5'57.55"E	1188.05 m	146 m
p9	NLOS	41°30'12.76"N	2° 5'53.92"E	1276.87 m	153 m
p10	NLOS	41°30'13.83"N	2° 5'47.98"E	1421.26 m	161 m

**Tabla 4.3** Datos de las posiciones de medida en el escenario de la figura 4.11

### 4.3 Resultados de cobertura WiMAX

WiMAX, como tecnología WMAN se ha diseñado con el propósito de ser una de las tecnologías de acceso radio de banda ancha en el bucle local de abonado abarcando distancias superiores hasta 50 Km en condiciones LOS y entre 3-7 Km en condiciones NLOS. Es por esta razón por la que WiMAX ha sido estudiada y analizada por otras entidades, como empresas y grupos de investigación en diferentes escenarios *outdoor* como se ha explicado en el estado de arte de la sección 4.1. No obstante, hasta el momento no se han encontrado modelos de canal WiMAX a la frecuencia de operación Europea de 3.5 GHz en escenarios *indoor* y es por este motivo que este proyecto analiza los resultados de cobertura WiMAX en este caso especial de escenario, poniendo a prueba la tecnología en un entorno con una elevada atenuación causada por las particiones entre plantas (ej: entresuelo) y las particiones de la misma planta (ej: paredes) .

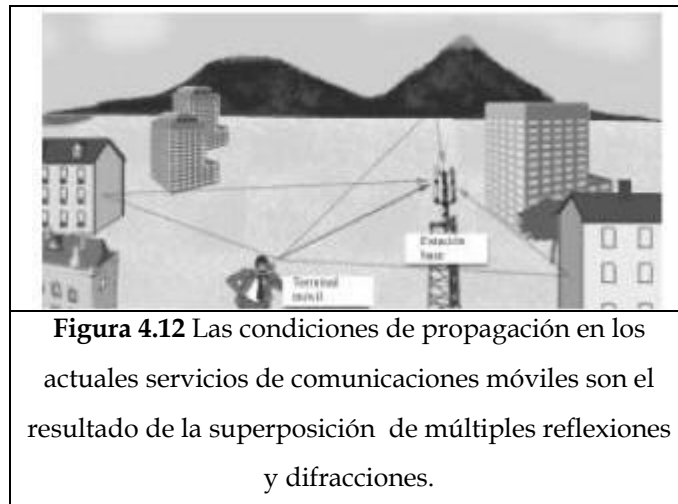
Para ambos escenarios *indoor* y *outdoor*, se estima un modelo empírico simplificado de predicción de pérdidas de propagación para estimar la potencia recibida en base a una serie de medidas empíricas obtenidas. Para el caso *indoor* se comparan dos modelos diferentes: un modelo que tiene en cuenta la atenuación debida a los obstáculos que interfieren la visión entre las antenas respectivas que forman el radioenlace y otro modelo que es una aproximación válida cuando es difícil o inviable obtener la atenuación de los obstáculos, por ejemplo en un caso *outdoor*. Este último modelo empleado en ambos escenarios se describe en la sección 4.3.1.

#### 4.3.1 Modelización de la propagación en *indoor* y *outdoor*

Los modelos de propagación teóricos son útiles para evaluar las pérdidas de propagación asociadas a distintos efectos como pueden ser reflexión en tierra plana, difracción por obstáculos, etc. En entornos de propagación complejos como es el caso de *outdoor* en el que se superponen varios efectos, el cálculo de las pérdidas se debe abordar a partir de modelos empíricos. Por ejemplo la figura 4.12 representa un escenario habitual en los servicios de comunicaciones móviles en zonas urbanas. En la mayoría de las ocasiones no existe visibilidad directa entre los dos extremos del enlace: la estación base y el terminal móvil. La potencia que recibe el terminal móvil es el resultado de la contribución de ondas reflejadas y difractadas en los edificios y obstáculos del entorno. En función de la fase de cada una de las contribuciones la suma de todas ellas puede ser constructiva o destructiva como se verá más adelante cuando se describa el modelo. En el caso de ser destructiva se

producirá un fuerte desvanecimiento de la señal recibida. Sin embargo, con sólo desplazar el móvil una distancia del orden de  $\lambda/2$  [Car02] (85.7 cm a 3.5 GHz) la contribución puede ser constructiva, y por lo tanto se pueden observar fuertes variaciones en la potencia de la señal recibida. Estas variaciones pueden llegar a ser del orden de 10 dB-20 dB con pequeños desplazamientos.

El objetivo en un entorno complejo, ya sea en *indoor* o en *outdoor* no es predecir exactamente la potencia recibida sino determinar el valor medio o esperado de las pérdidas de propagación. Sobre ese valor medio se superpone una variable aleatoria que modela las fluctuaciones del canal. Des del punto de vista de la planificación de servicios, el objetivo es garantizar una probabilidad de *outage*, es decir, garantizar que una cierta potencia recibida no disminuya un porcentaje del tiempo en función de la fiabilidad con la que se requiere el servicio.



La obtención de un modelo de predicción empírico de pérdidas de propagación es fundamental para obtener de forma aproximada la potencia recibida en cualquier distancia de la estación base sin la necesidad de hacerlo empíricamente tal en el que es necesario saber la potencia recibida en aquella posición además de la cuantificación del número de obstáculos y su atenuación, como por ejemplo se realiza en el escenario indoor de la sección 4.3.3. Por lo tanto es más útil usar un modelo de *path loss* que permita predecir las pérdidas de propagación en cualquier distancia, y en función del tipo de escenario: espacio libre, en interiores, en zonas rurales o semi-rurales con baja densidad de edificios y una distribución plana de árboles, etc. El modelo simplificado de *path loss* que se utiliza en el análisis *indoor/outdoor* se conoce como *Erceg model* [Erc99] o también modelo IEEE 802.16 SUI<sup>66</sup>. Este

<sup>66</sup> Stanford University Interim

modelo está basado a partir de datos experimentales coleccionados a la frecuencia de 1.9 GHz en un total de 95 macroceldas de Estados Unidos, la mayoría en áreas suburbanas de New Jersey, Seattle, Chicago, Atlanta, y Dallas. Este modelo fue adoptado por el grupo IEEE 802.16 como modelo recomendado para WiMAX 802.16-2004 [And07]. Aunque los inicios del modelo fueron en la frecuencia de 1.9 GHz, más tarde se añadieron modificaciones para trabajar a frecuencias superiores, entre 2-4 GHz. El modelo resultante para trabajar a la frecuencia de 3.5 GHz es el mismo que el original pero con algunas modificaciones. Se escoge este modelo porque otros existentes como son el *Okumura-Hata* o el COST-231 solamente son válidos para frecuencias  $150\text{MHz} \leq f \leq 2\text{GHz}$ , alturas de la estación base  $30\text{m} \leq h_{BS} \leq 200\text{m}$  y distancias del receptor a la BS de  $1\text{Km} \leq d \leq 20\text{Km}$ . A parte de los modelos *Okumura-Hata* y COST-231 también existe un modelo conocido como *Walfish-Ikegami* que opera en las frecuencias  $800\text{MHz} \leq f \leq 2\text{GHz}$ , alturas de la BS  $4 \leq h_{BS} \leq 50\text{m}$  y distancias a la BS  $0.2\text{Km} \leq d \leq 5\text{Km}$ . El modelo de *Walfish-Ikegami* tampoco es útil para la banda de 3.5GHz de WiMAX [And07]. El modelo para WiMAX o *Erceg model* se define en (4.1). En la ecuación 4.1 no se añade la corrección para la altura de la antena del terminal porque que en las medidas realizadas, la antena del terminal de usuario se halla a una altura inferior de 2 m, altura nominal mínima definida por el modelo base de *Erceg*.

$$PL = A + 10\gamma \log_{10}(d / d_0) + P_{ff} + s; d \geq d_0 \quad (4.1)$$

- *A*: *Intercept factor*. Esta variable es constante y viene dada por la fórmula de *path loss* en espacio libre (fórmula de *Friis*):

$$A = 20 \log_{10}(4\pi d_0 / \lambda) \quad (4.2)$$

donde  $d_0$  suele ser 1-10 m para interiores y 10-100 m para exteriores. [Gol05]. La distancia nominal es de  $d_0 = 100\text{m}$  para exteriores [Erc99][Vak06] [Imp07]. Para el análisis en interiores se va a considerar una distancia de 1 m porque se ha seguido el ejemplo de la página 42 del libro [Gol05].

- $\gamma$ : El exponente de *path loss*  $\gamma$  depende del ambiente de propagación [Afr07][Vak06]. Para el caso de espacio libre  $\gamma = 2$ ; en interiores de edificios  $\gamma > 5$ ; en áreas urbanas poco densas con celdas radio  $2.7 < \gamma < 3.5$ ; en áreas urbanas mayor densas  $3 < \gamma < 5$ . El cálculo de  $\gamma$  puede ser obtenido por el método de mínimos cuadrados o *Least Squares* a partir de los resultados empíricos obtenidos en diferentes distancias o directamente se

puede utilizar la aproximación de IEEE que depende de la altura de la estación base y del tipo de terreno. No obstante la aproximación de IEEE es válida para exteriores y por lo tanto se presenta cuando se analice la cobertura en los escenarios *outdoor* de las secciones 4.3.2 y 4.3.3.

- $P_{lf}$ : Corrección en frecuencia para frecuencias superiores a 2 GHz:

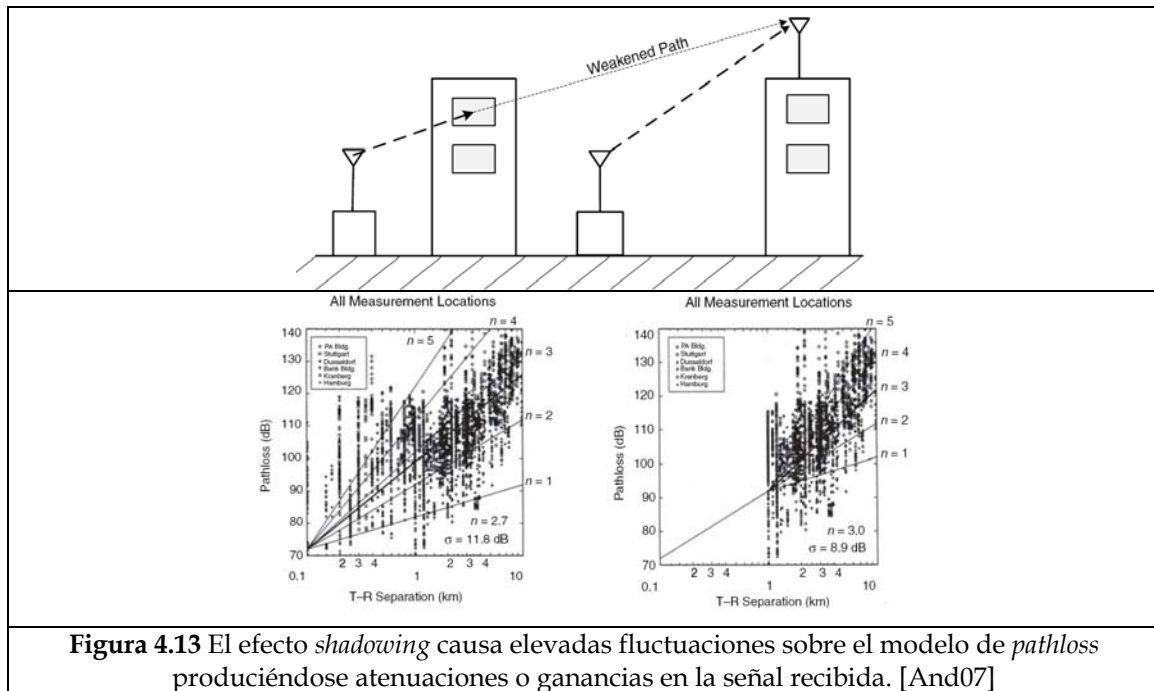
$$P_{lf} = 6 \log(f_{GHz} / 2) \quad (4.3)$$

- $s$ : componente *shadow fading* varía aleatoriamente de una posición a otra dentro de la misma celda. Es una variable aleatoria gaussiana de media nula y puede ser expresada como

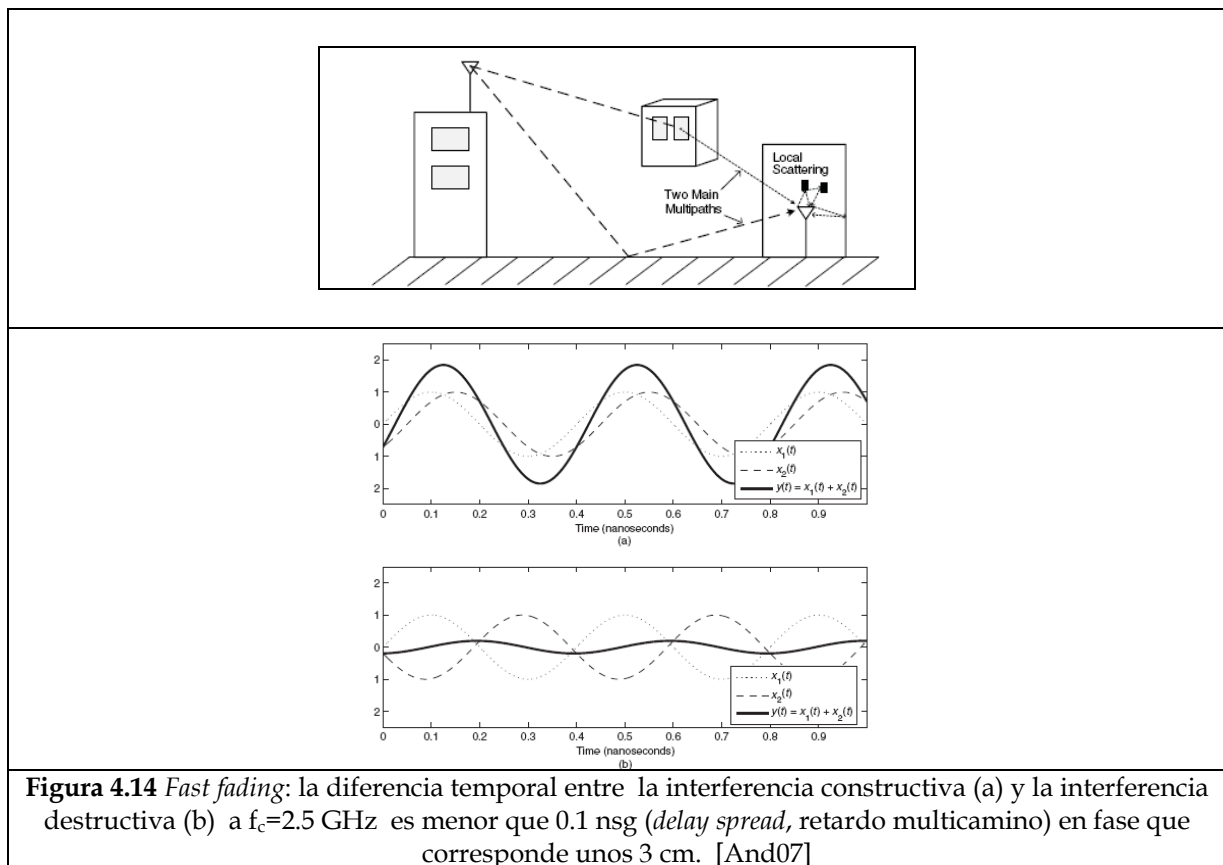
$$s = y\sigma \quad (4.4)$$

siendo 'y' otra variable aleatoria gaussiana de media nula y desviación estándar unitaria  $N[0,1]$ ,  $\sigma$  la desviación estándar de  $s$ . La desviación estándar es también una variable aleatoria gaussiana con media  $\mu_s$  y desviación estándar  $\sigma_s$  tal que  $\sigma = \mu_s + z\sigma_s$ , siendo  $z$  una variable aleatoria gaussiana de media nula. Valores típicos de la variable aleatoria  $s$  pueden comprender entre 8 y 10.6 dB, dependiendo del tipo de terreno [Vak06][Imp07]. El efecto *shadow fading* se considera un desvanecimiento de grande escala.

Como se puede observar el modelo SUI tiene en cuenta el *path loss* promedio más una componente aleatoria gaussiana que simula las variaciones sobre la potencia recibida. Estas variaciones pueden ser debidas a la obstrucción temporal debida objetos macroscópicos que impiden la visibilidad entre el transmisor y el receptor. Este hecho causa una degradación temporal en el nivel de potencia de la señal recibida y por otro lado, en una transmisión temporal con visión directa podría resultar en un aumento anormal de la potencia de señal recibida. La figura 4.13 muestra la causa del efecto *shadowing* o *shadow fading*, que suele aparecer cuando el terminal se mueve o cuando permaneciendo fijo, pueden aparecer temporalmente objetos grandes (ej: un autobús) que impiden la visibilidad. El efecto de *shadowing* también conocido como desvanecimiento a grande escala es poco común cuando las antenas están a una altura mayor que los obstáculos [And07].



Sin embargo y como se ha dicho anteriormente, la potencia recibida viene contaminada por una suma de *fadings* de pequeña escala y de grande escala. La figura 4.14 muestra un ejemplo de dos señales interferentes a 2.5 GHz que pueden ser constructivas o destructivas.



El modelo presentado se utiliza en los escenarios *indoor/outdoor* con los siguientes propósitos:

- En el escenario *outdoor* semi-urbano presentado en la siguiente sección, para hacer una comparativa con tres modelos obtenidos con procedimientos diferentes.
  - ✚ El primero obtiene un valor para el exponente de *path loss* mediante una fórmula de IEEE.
  - ✚ El segundo modelo sigue el procedimiento de *Least Squares* pero fijando una distancia nominal  $d_0 = 100\text{m}$ . A partir de aquí se estima el coeficiente  $\gamma$  del modelo descrito en 4.1.
  - ✚ El último modelo utiliza un procedimiento más aproximado que es encontrar los dos coeficientes  $A$  (relacionado con  $d_0$ ) y  $\gamma$  que minimizan el error cuadrático medio con los datos como se muestra más adelante. Este modelo resultante tiene la forma (4.5) y como se observa es distinta a (4.1). Esto significa que aunque los modelos se parezcan no son realmente el mismo por el hecho que el factor  $d_0$  no se encuentra dentro de la función logarítmica. Por otro lado, estimar los dos coeficientes a partir de (4.1) es muy difícil porque siendo  $d_0$  desconocido se convierte la estimación en un problema no lineal con los parámetros a estimar. Este procedimiento es utilizado por [Afr07] y [Gro07].

$$L = A + 10\gamma \log(d) \quad (4.5)$$

- En el escenario *indoor* para obtener un modelo de pérdidas de propagación en entorno LOS que se emplea en otro modelo exclusivo para entornos de interiores para estimar la potencia recibida. Como ya se afirmó, se considera una distancia nominal  $d_0 = 1\text{m}$ , página 42 del libro [Gol05]. Suponiendo  $d_0 = 1\text{m}$  de la misma manera que se considera en el segundo procedimiento del escenario *outdoor* semi-urbano una  $d_0 = 100\text{m}$ . Esto facilita la estimación con *least squares*. En este escenario no se ha empleado el modelo (4.5) porque con el primero se han obtenido valores de  $\gamma$  coherentes como se demostrará en la sección 4.3.4.

### 4.3.2 En escenario semi-urbano

En este escenario se va a caracterizar el comportamiento de WiMAX en un entorno *outdoor* del campus de la UAB que pueda asemejar-se a una zona semi-urbana. Todos ellos han surgido a partir de promediar 30 muestras en dB para cada parámetro para poder eliminar la aleatoriedad del canal inalámbrico y además el ruido térmico del mismo receptor del terminal WiMAX. El promediado empleado en un principio ha sido en dB o también conocido como la media en dB. El promediado en dB de las potencias recibidas se muestra en 4.6 mientras que el promediado en lineal (la media en lineal) se muestra en 4.7.

$$\bar{a}_{geom} = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \dots \cdot x_N} \xrightarrow{10\log(\cdot)} \bar{a}_{dB} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i (dB) \quad (4.6)$$

$$\bar{a}_{lin} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \xrightarrow{10\log(\cdot)} \bar{a}_{lin\_dB} (dB) = 10 \cdot \log\left(\sum_{i=1}^N x_i\right) - 10 \log(N) \quad (4.7)$$

Más adelante se demostrará que realizar la media en logarítmico de un conjunto de N datos (por ejemplo 30) correspondientes a la RSSI aleatoria debido a los diversos efectos como pueden ser *fast fading* y *shadow fading* es lo mismo que usar todas las muestras sin aplicar directamente ningún tipo de promediado. La razón se da cuando se analicen los resultados.

Inicialmente se muestran en las tablas 4.4 y 4.5 la media en dB con N = 30 de los parámetros del radioenlace en cada una de las distintas posiciones de la figura 4.11 para ambos terminales empleados.

**ANTENA DIRECTIVA (terminal AD)**

Distancia SS-BS (m)	RSSI (dBm)		SNR (dB)		Modulación		Throughput Bruto (Mbps)		Potencia Transmisión (dBm)	
	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL
Posición 1: 100m	-60.27	-72.07	34	29.87	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	38	14.6
Posición 2: 200m	-76.13	-84.17	26	18.67	QAM64 3/4	QAM16 3/4	11.25	7.5	38	20
Posición 3: 300m	-88.23	-95.57	14.97	7.20	QAM16 1/2	QPSK 1/2	5	2.5	38	20
Posición 4: 400m	-	-	-	-	-	-	-	-	38	-
Posición 5: 500m	-88.77	-97.6	15.07	5.23	QAM16 1/2	BPSK 3/4	5	1.88	38	20
Posición 6: 600m	-92.07	-98	5.73	3	QPSK 3/4	BPSK 3/4	3.75	1.88	38	20
Posición 7: 700m	-95.47	-98.97	5.10	2.53	QPSK 1/2	BPSK 1/2	2.5	1.25	38	20
Posición 8: 800m	-84.60	-95.47	18	5.67	QAM16 3/4	QPSK 1/2	7.5	2.5	38	20
Posición 9: 900m	-83.50	-95.13	19.87	7.20	QAM16 3/4	QPSK 1/2	7.5	2.5	38	20
Posición 10: 1000m	-84	-92.10	17.87	11.60	QAM16 3/4	QPSK 3/4	7.5	3.75	38	20

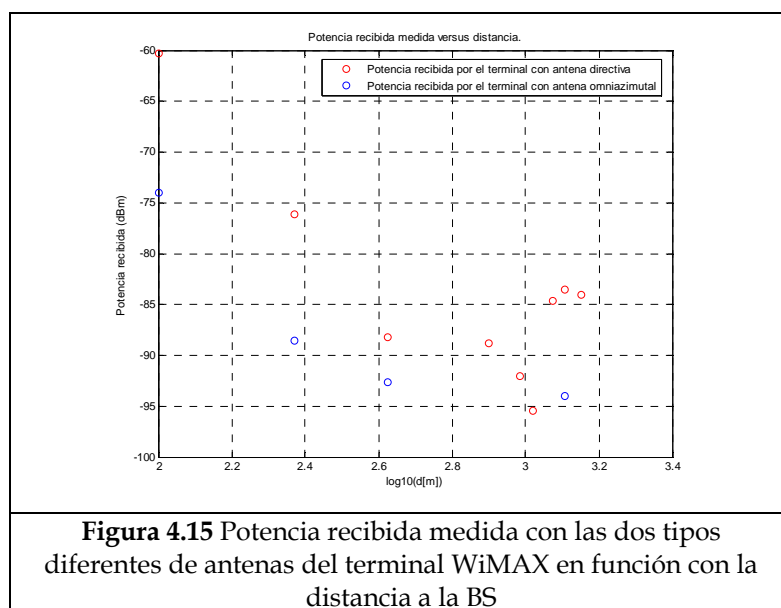
**Tabla 4.4** Parámetros del radioenlace medidos con la antena directiva. Escenario semi-urbano**ANTENA OMNIAZIMUTAL (terminal AO)**

Distancia SS-BS (m)	RSSI (dBm)		SNR (dB)		Modulación		Throughput Bruto (Mbps)		Potencia Transmisión (dBm)	
	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL
Posición 1: 100m	-74.23	-78.93	27.97	23.07	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	38	20
Posición 2: 200m	-88.53	-92.20	15.13	10.67	QAM16 1/2	QPSK 3/4	5	3.75	38	20
Posición 3: 300m	-92.60	-96.70	12.30	4.73	QPSK 3/4	QPSK 1/2	3.75	2.5	38	20
Posición 4: 400m	-	-	-	-	-	-	-	-	38	-
Posición 5: 500m	-	-	-	-	-	-	-	-	38	-
Posición 6: 600m	-	-	-	-	-	-	-	-	38	-
Posición 7: 700m	-	-	-	-	-	-	-	-	38	-
Posición 8: 800m	-	-	-	-	-	-	-	-	38	-
Posición 9: 900m	-93.97	-98.70	9.90	3.93	QPSK 3/4	BPSK 1/2	3.75	1.25	38	20
Posición 10: 1000m	-	-	-	-	-	-	-	-	38	-

**Tabla 4.5** Parámetros del radioenlace medidos con la antena omniazimutal. Escenario semi-urbano

Como el objetivo principal es encontrar un modelo de predicción de pérdidas de propagación para este tipo de escenario se van a utilizar de los parámetros anteriores solamente la potencia recibida o RSSI para cada terminal. La figura 4.15 muestra una gráfica de las potencias recibidas en función de la distancia. Se observa que en un comienzo la tendencia de la potencia recibida decrece más o menos de manera lineal con la distancia para un terminal equipado con dos antenas diferentes: una antena directiva de ganancia 17 dBi y una antena omnidireccional de 2 dBi. A partir de la posición 8 el nivel del terreno es más alto y esto causa que las potencias recibidas aumenten, es decir, el rendimiento que ofrece el canal inalámbrico mejora. En el caso del terminal de antena omniazimuthal solo se recibe en la posición 9. Por otro lugar en la posición 4 ninguno de los dos terminales recibe señal de la estación base debido a un edificio que obstruye la propagación del rayo directo del lóbulo principal de la antena transmisora, hecho que ni por difracción en los edificios ni por reflexión en los objetos de alrededor se reciben ecos. Como consecuencia no se va a considerar esta posición de medida al no haber información sobre parámetros del radioenlace.

Una variación de la tendencia lineal de los datos, como por ejemplo una mejora del canal, puede repercutir en la obtención de un valor erróneo para el exponente de *path loss* como se demostrará más adelante, si se emplean todas las medidas para obtener un único modelo lineal de pendiente y que caracterice todo el escenario. En un principio se utilizan todas las medidas o puntos de la figura 4.15 para encontrar el modelo más exacto posible y luego se observará la consecuencia de ello.



Se recuerda de nuevo que cada escenario *outdoor* diferente donde se obtienen medidas de canal como el que se está analizando se caracteriza por el exponente de *path loss*  $\gamma$  y una distancia nominal  $d_0$  que define las pérdidas de propagación que se obtendrían en el caso en el que el terminal se encontrase a una distancia de la estación base en condiciones de espacio libre. Para obtener los coeficientes  $\gamma$  y  $d_0$  se puede hacer mediante distintos procedimientos que se describen a continuación. De los parámetros del modelo que se obtengan a continuación mediante los distintos procedimientos, los que se acerquen más a los resultados medidos definirán el modelo de propagación de *path loss* para este tipo de escenario que se está analizando y además definirá el procedimiento definitivo que se empleará en la sección 4.3.3.

1. obtención de  $\gamma$  a partir del modelo de IEEE [Erc99]:

$$\bar{\gamma} = (a - bh_b + c / h_b) \quad (4.8)$$

, siendo  $h_b$  la altura de la antena de la estación base  $10 \text{ m} \leq h_b \leq 80 \text{ m}$  (13.5m aproximados para este proyecto, ver figura 4.7) y los coeficientes a,b,c dependen de la categoría del terreno. En cuanto a la distancia  $d_0$ , el modelo de IEEE define que para escenarios *outdoor*  $d_0 = 100 \text{ m}$ . La tabla 4.6 recogida del modelo da los valores numéricos para los coeficientes:

MODEL PARAMETER	TERRAIN CATEGORY		
	A (Hilly/Moderate- to-Heavy Tree Density)	B (Hilly/Light Tree Density or Flat/Moderate- to-Heavy Tree Density)	C (Flat/Light Tree Density)
a	4.6	4.0	3.6
b (in $\text{m}^{-1}$ )	.0075	.0065	.0050
c (in m)	12.6	17.1	20.0

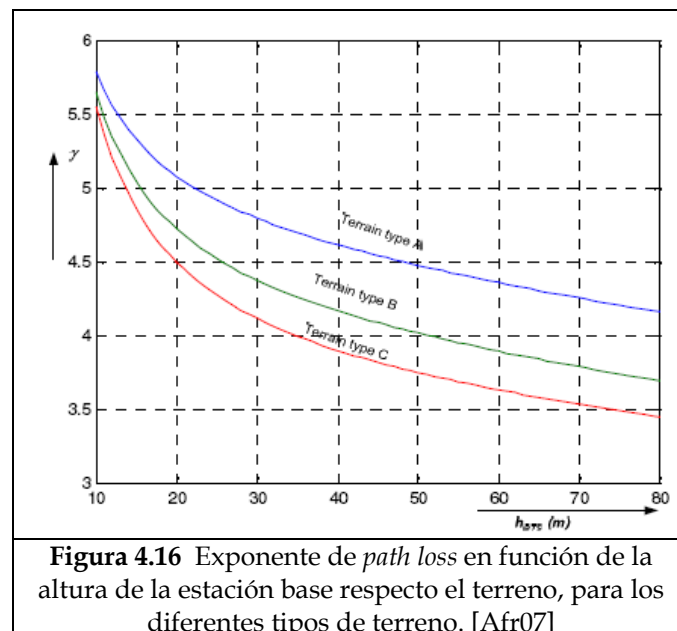
**Tabla 4.6** Valores numéricos de los coeficientes a,b y c del modelo

A modo de investigación se va a obtener el exponente de *path loss* para los diferentes tipos de terrenos; además se desconoce si el terreno donde se han realizado las medidas es exactamente uno de los que se especifican en la tabla anterior o ninguno de ellos. La tabla 4.7 resume los exponentes de *path loss* para las categorías de terreno A,B y C y para una altura aproximada de la estación base respecto del terreno de 13.5 m.

Categoría del terreno			
	A	B	C
$\gamma$	5.43	5.18	5.01

**Tabla 4.7** Valores de  $\gamma$  para las distintas categorías de terreno

Como se observa los valores que se obtienen de  $\gamma$  son superiores a 5 en las tres categorías de terreno, y esto significa pérdidas muy elevadas. La razón es porque la altura de la estación base respecto el terreno es bastante baja. Por ejemplo en el caso de  $h_b = 35\text{m}$  y un terreno tipo C,  $\gamma = 4.721$ . Para poder ver como influye  $h_b$  con  $\gamma$  para las diferentes categorías de terreno, se muestra en la figura 4.16 el comportamiento de  $\gamma$  versus  $h_b$ . Se observa como el terreno tipo C es el que tiene menores pérdidas de propagación porque el exponente de *path loss* es menor. Por otro lugar se puede decir que la altura de la estación base influye en las pérdidas de propagación, lógicamente porque a menor altura más robusto será el canal inalámbrico. Para obtener  $\gamma$  menores de 4 se necesitaría una  $h_b > 35\text{ m}$  para el terreno tipo C,  $h_b > 50\text{m}$  para el tipo B y  $h_b > 90\text{ m}$  para el tipo A. El caso que se aplica al proyecto es una  $h_b = 13.5\text{ m}$ , y como se puede observar para esta altura, las pérdidas de propagación son elevadas:



2. Estimación de  $\gamma$  con *least squares*, suponiendo una  $d_0 = 100\text{m}$  [Erc99]: El resultado de este modelo estima un valor para el exponente a partir de minimizar el error cuadrático medio entre las medidas empíricas y las que se obtengan por el modelo de predicción. Por lo tanto se van a obtener dos modelos de *path loss* distintos para los terminales empleados AD y AO cuyas funciones de *least squares* se muestran a continuación juntamente con la estimación de los valores de los exponentes de *path loss*:

$$F(\gamma) = \sum_{n=1}^{12} (L_{emp}(dB) - L_{mod}(dB))^2 = \sum_{n=1}^{12} (L_{emp}(dB) - (20\log(\frac{4\pi d_0}{\lambda}) + 10\gamma\log(\frac{d}{d_0}) + 6\log(\frac{f_{GHz}}{2})))^2 \quad (4.9)$$

$$F(\gamma)_{AD} = 705.38\gamma^2 - 8318.1\gamma + 26998 \quad \rightarrow \quad \hat{\gamma}_{AD} = \min_{\arg \gamma} (F(\gamma)_{AD}) = \partial(F(\gamma)_{AD}) / \partial \gamma = 0 \quad \rightarrow \quad \hat{\gamma}_{AD} = 5.9$$

$$F(\gamma)_{AO} = 175.13\gamma^2 - 2009.8\gamma + 74757 \quad \rightarrow \quad \hat{\gamma}_{AD} = \min_{\arg \gamma} (F(\gamma)_{AD}) = \partial(F(\gamma)_{AD}) / \partial \gamma = 0 \quad \rightarrow \quad \hat{\gamma}_{AD} = 5.74$$

Los nuevos modelos de *path loss* para ambos terminales se definen a continuación:

$$L(dB; d)_{AD} = 84.78 + 59 \cdot \log\left(\frac{d}{100}\right)$$

$$L(dB; d)_{AO} = 84.78 + 57.4 \cdot \log\left(\frac{d}{100}\right)$$

3. Estimación de los parámetros de interés  $\gamma$  y  $d_0$  mediante *least squares*: Este procedimiento sigue el descrito en [Afr07] y ejecutado por [Gro07]. A partir de las pérdidas de propagación empíricas y del modelo cuyos parámetros desconocidos son 'a' y ' $\gamma$ ' se realiza una estimación de *least squares* para hallar los parámetros de interés óptimos que minimizan el error. El procedimiento matemático es el siguiente:

$$\left. \begin{array}{l} L_1 = a_1 + 10\gamma \log(d_1) \\ L_2 = a_2 + 10\gamma \log(d_2) \\ \dots \end{array} \right\} \rightarrow \underline{L} = \begin{bmatrix} 1 & 10 \cdot \log(d_1) \\ 1 & 10 \cdot \log(d_2) \\ \dots & \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ \gamma \end{bmatrix} = \underline{A} \cdot \underline{b} \quad (4.10)$$

La solución de *least squares* de  $\underline{L} = \underline{A} \cdot \underline{b}$  es  $\underline{b}_{OPT} = \underline{A}^+ \cdot \underline{L}$ . El vector L son los valores empíricos de *path loss* y el vector  $\underline{b}_{OPT}$  incluye los coeficientes óptimos 'a' y ' $\gamma$ '. Los modelos que se obtienen mediante el procedimiento descrito para ambos terminales son:

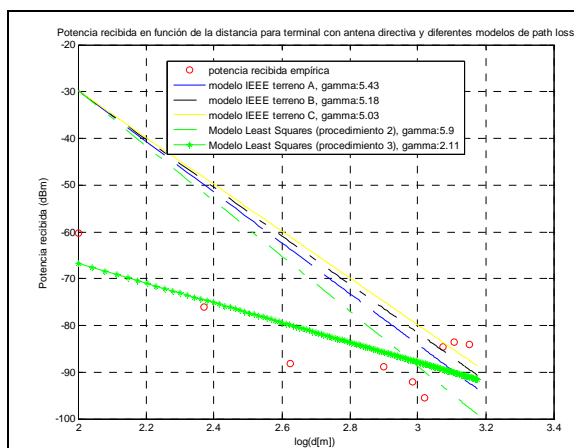
$$L(\text{dB}; d)_{AD} = 79.64 + 21.06 \cdot \log(d)$$

$$L(\text{dB}; d)_{AO} = 72.20 + 22.26 \cdot \log(d)$$

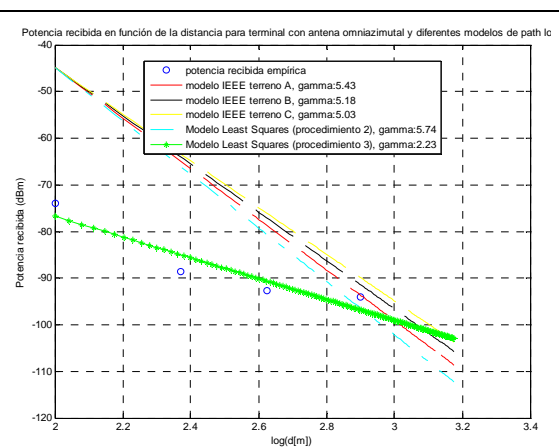
Una vez descritos los distintos modelos para cada tipo de terminal de usuario, se grafican todos ellos en las siguientes gráficas que se muestran a continuación para poder observar que procedimiento obtiene un modelo más aproximado a los datos. Las figuras 4.17 y 4.18 muestran una comparativa entre la potencia recibida empírica para ambos terminales empleados y los distintos modelos obtenidos mediante los tres procedimientos. Las potencia recibida depende de las pérdidas de propagación, de la potencia transmitida por la estación base y de las ganancias de las antenas transmisora y receptora. Para el caso del terminal AD (terminal con antena directiva):

$$P_{r\_AD} = P_t + G_t + G_r - L$$

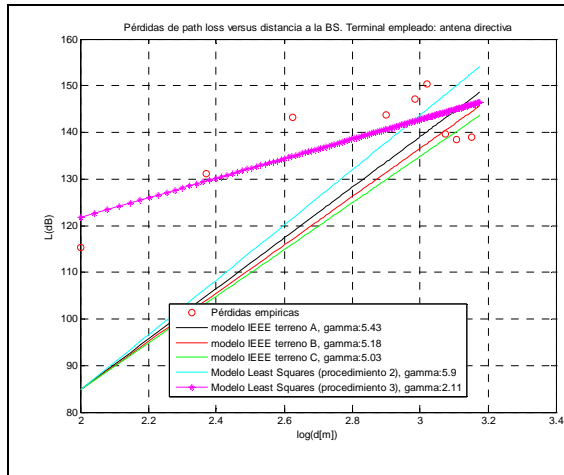
, donde  $P_t = 28$  dBm,  $G_t = 10$  dBi,  $G_r = 17$  dBi y  $L$  es el *path loss*. En el caso del terminal AO (terminal con antena omniazimutal),  $G_r = 2$  dBi. Las pérdidas de propagación para ambos terminales se muestran en las figuras 4.19 y 4.20 muestran como aumenta en función de la distancia.



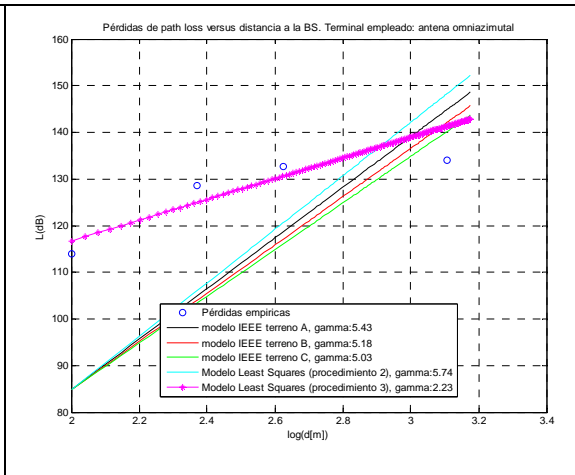
**Figura 4.17** Potencia recibida empírica y distintos modelos empíricos versus distancia.  
Terminal empleado: Antena directiva



**Figura 4.18** Potencia recibida empírica y distintos modelos empíricos versus distancia.  
Terminal empleado: antena omniazimutal



**Figura 4.19** Pérdidas empíricas y modelos distintos de *path loss* versus distancia. Terminal empleado: antena direccional



**Figura 4.20** Pérdidas empíricas y modelos distintos de *path loss* versus distancia. Terminal empleado: antena omni-azimutal

De los resultados obtenidos se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- ✚ El procedimiento que obtiene un modelo que se aproxima más a los resultados es el procedimiento 3.
- ✚ Los valores que se obtienen de  $\gamma$  para ambos terminales son inferiores a 3 por lo que es incoherente porque en este tipo de escenario  $\gamma$  debería ser mayor de 3. En otras palabras valores de  $2 < \gamma < 3$  se corresponden en ambientes con baja densidad de edificios como ocurre en las zonas rurales o semi-rurales.

Se acaba de demostrar que una variación respecto a la tendencia creciente o decreciente de la nube de puntos puede dar un valor erróneo de  $\gamma$  si se utilizan todos los puntos para encontrar un único modelo lineal de pendiente  $\gamma$ , por el hecho de que el modelo encontrado es aquel que minimiza el error cuadrático medio con todos los puntos. Se puede entender de otra manera, si se desprecian los últimos tres puntos de medida para el caso del terminal de antena direccional y el último punto para el caso del terminal de antena omni-azimutal, se van a obtener resultados más coherentes, es decir,  $\gamma > 3$ . El desprecio es debido a que las últimas tres medidas se corresponden a un canal mejor (la altura del terreno es mayor que en el resto de las posiciones) y por lo tanto un tramo con una pendiente distinta  $\gamma$ . Dicho de otra manera si se obtienen nubes de puntos que siguen la tendencia de tramos distintos el modelo resultante se comprenderá de pendientes distintas. Por lo tanto si se desprecian las últimas tres medidas se obtienen los siguientes modelos encontrados empleando el procedimiento descrito en 4.10:

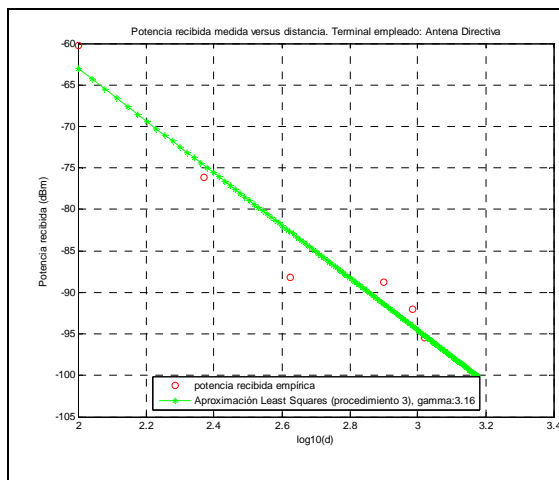
$$L(dB;d)_{AD} = 54.82 + 31.57 \cdot \log(d)$$

$$L(dB;d)_{AO} = 54.23 + 30.4 \cdot \log(d)$$

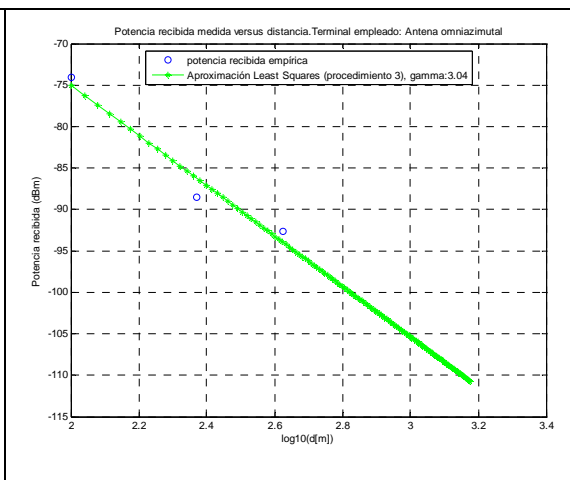
$$\gamma_{AD} = 3.157$$

$$\gamma_{AO} = 3.04$$

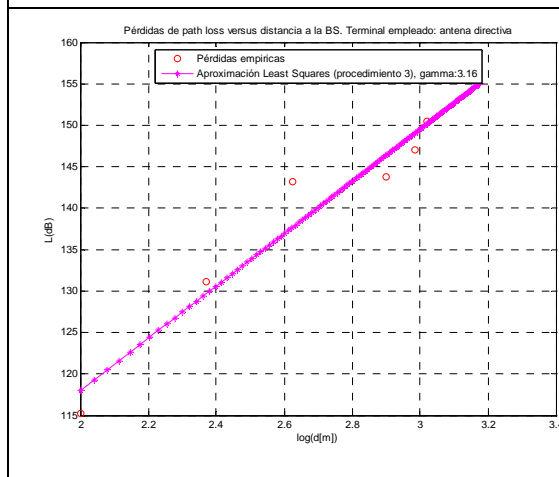
Las gráficas de las figuras 4.21 - 4.24 muestran los resultados aplicando los modelos acabados de definir.



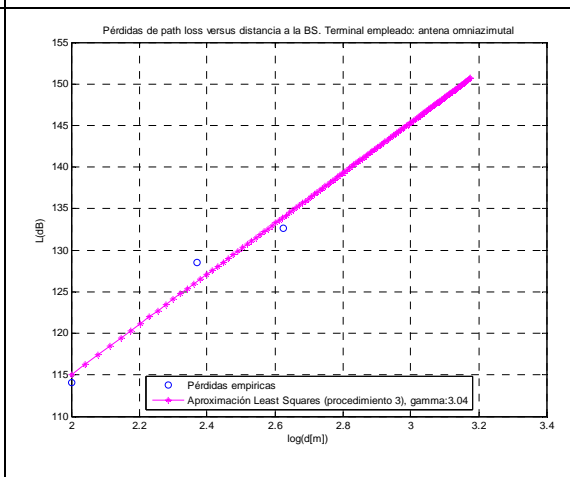
**Figura 4.21** Potencia recibida empírica y modelo empírico versus distancia Terminal empleado: Antena directiva



**Figura 4.22** Potencia recibida empírica y modelo empírico versus distancia. Terminal empleado: antena omniazimutal



**Figura 4.23** Pérdidas empíricas y modelos distintos de *path loss* versus distancia. Terminal empleado: Antena directiva



**Figura 4.24** Pérdidas empíricas y modelos distintos de *path loss* versus distancia. Terminal empleado: Antena omniazimutal

Cabe decir que el procedimiento empleado para encontrar un modelo bien ajustado a los datos sirve con un mínimo de 2 puntos pero que es habitual utilizar muchos más para poder tener una estadística más precisa y exacta. Los modelos encontrados por otras entidades como las mencionadas en el estado de arte de este capítulo en diferentes terrenos, han sido fruto de un análisis estadístico usando un mínimo de 100 puntos. De todas formas el valor que se ha obtenido del exponente de *path loss* ahora es coherente porque es comparable con lo que se ha obtenido en campañas de medidas disponibles en la literatura.

Tal y como se ha comentado al principio, el modelo encontrado válido para ambos terminales ha sido obtenido a partir de hacer el promediado en dB de 30 muestras de la potencia recibida en cada posición. Pues bien, se va a tratar a continuación de emplear el procedimiento descrito en 4.11, similar al 4.10 pero con la diferencia que ahora se utilizan todas las muestras. El vector  $L$  es un vector de 180 filas y 1 columna que tiene las pérdidas empíricas de *path loss* correspondientes a las potencias recibidas aleatorias de cada posición y para todas las posiciones.

$$\underline{L}^{30 \times 6,1} = \underline{A}^{30 \times 6,2} \cdot \underline{b} = \begin{bmatrix} 1 \log(d_1) \\ 1 \log(d_1) \\ \dots \\ 1 \log(d_1) \\ 1 \log(d_2) \\ 1 \log(d_2) \\ \dots \\ 1 \log(d_2) \\ \dots \\ 1 \log(d_6) \\ 1 \log(d_6) \\ \dots \\ 1 \log(d_6) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ L_{30} \\ L_{31} \\ L_{32} \\ \cdot \\ \cdot \\ L_{30 \times 6} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$\longrightarrow \begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{\gamma} \end{bmatrix} = (\underline{A}^H \cdot \underline{A})^{-1} \cdot \underline{A}^H \cdot \underline{L} = \underline{A}^+ \cdot \underline{L}$$

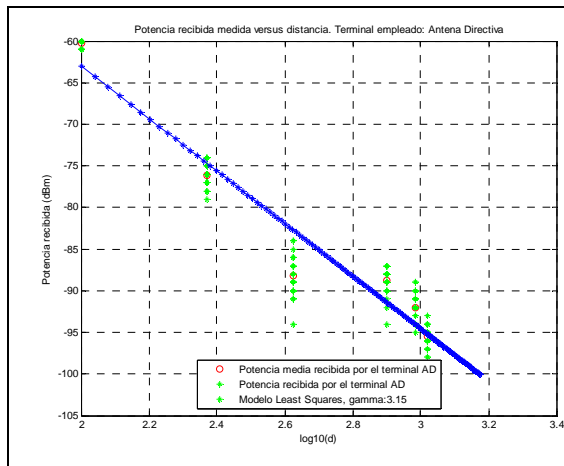
Aplicando el procedimiento 4.11 se obtienen los mismos modelos que realizando el promediado en dB. Los modelos resultantes se muestran a continuación con sus valores de los exponentes de *path loss* para cada terminal y se grafican en las figuras 4.25 y 4.26.

$$L(dB; d)_{AD} = 54.82 + 31.57 \cdot \log(d)$$

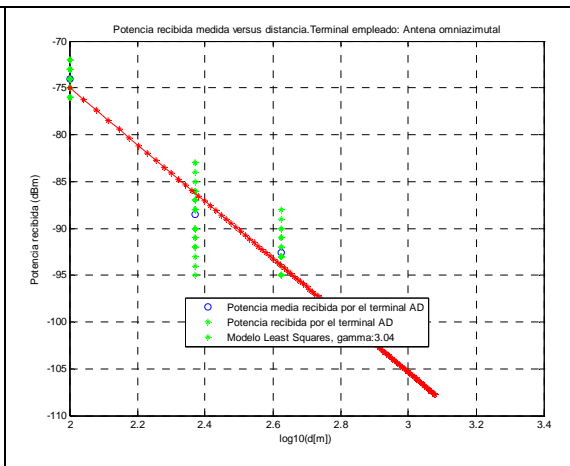
$$L(dB; d)_{AO} = 54.23 + 30.4 \cdot \log(d)$$

$$\gamma = 3.157$$

$$\gamma = 3.04$$



**Figura 4.25** Potencia recibida empírica y modelo empírico versus distancia a la BS.  
Terminal empleado: Antena direccional



**Figura 4.26** Potencia recibida empírica y modelo empírico versus distancia a la BS.  
Terminal empleado: Antena omniangular

Una explicación del porque se obtienen los mismos modelos, es que la aproximación de *Least Squares* utilizando todos los puntos de la nube obtiene un modelo lineal a partir de realizar una media en dB de la aleatoriedad que se tienen en cada posición.

Ahora que se ha demostrado que se puede considerar una manera correcta hacer un promediado en dB de N muestras en cada posición porque el mismo *Least Squares* lo aplica, se utilizará ésta técnica en los escenarios restantes porque se procesan menos datos. En un caso real que se quisiera planificar una red se podría obtener un modelo con solo partiendo del promediado en dB hecho que facilita un procesamiento menos costoso y más rápido.

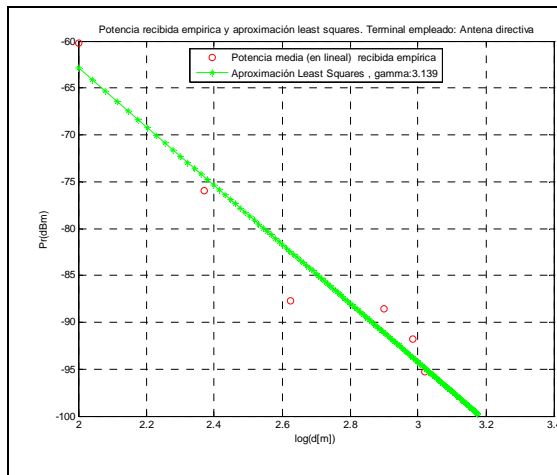
Para finalizar se van a analizar los resultados que se obtienen haciendo la media en lineal en lugar de en dB como se ha hecho anteriormente siguiendo de nuevo el procedimiento descrito en 4.10. Si se hace la media en lineal, el resultado de los modelos que se obtienen a continuación se grafican en las figuras 4.27 y 4.28.

$$L(dB;d)_{AD} = 55.051 + 31.39 \cdot \log(d)$$

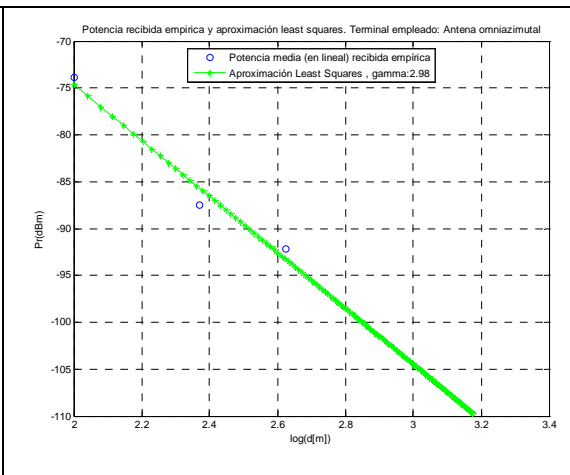
$$L(dB;d)_{AO} = 54.957 + 29.84 \cdot \log(d)$$

$$\gamma = 3.139$$

$$\gamma = 2.984$$



**Figura 4.27** Potencia recibida empírica y modelo empírico versus distancia a la BS.  
Terminal empleado: Antena direccional



**Figura 4.28** Potencia recibida empírica y modelo empírico versus distancia a la BS.  
Terminal empleado: Antena omniangular

Se observa que la diferencia entre hacer el promediado en dB y el promediado en lineal de las potencias recibidas es muy pequeña, es del orden de unidades de centésimas. Por lo tanto si se realiza el promediado en lineal se obtienen unos modelos casi parecidos a los obtenidos a partir de un promediado en dB.

Para terminar este escenario, la figura 4.29 muestra el mapa donde se han realizado las medidas juntamente con las indicaciones en colores sobre la modulación y *throughput* *downlink* medio conseguidos con el terminal de antena direccional. Prestar atención a las marcas señaladas en el mapa de cada posición.

En las posiciones iniciales 1 y 2 se recibe una QAM64 3/4 por estar cerca de la BS debido a que en media la potencia de la suma de los ecos recibidos es superior a la sensibilidad de la constelación QAM64 3/4 del mismo terminal.

En la posición 3 la potencia recibida media es menor porque aparecen más obstáculos (la mayoría de edificios de hormigón) que causan mayores pérdidas operando a 3.5 GHz, y por tanto la BS asigna al SS una constelación menor.

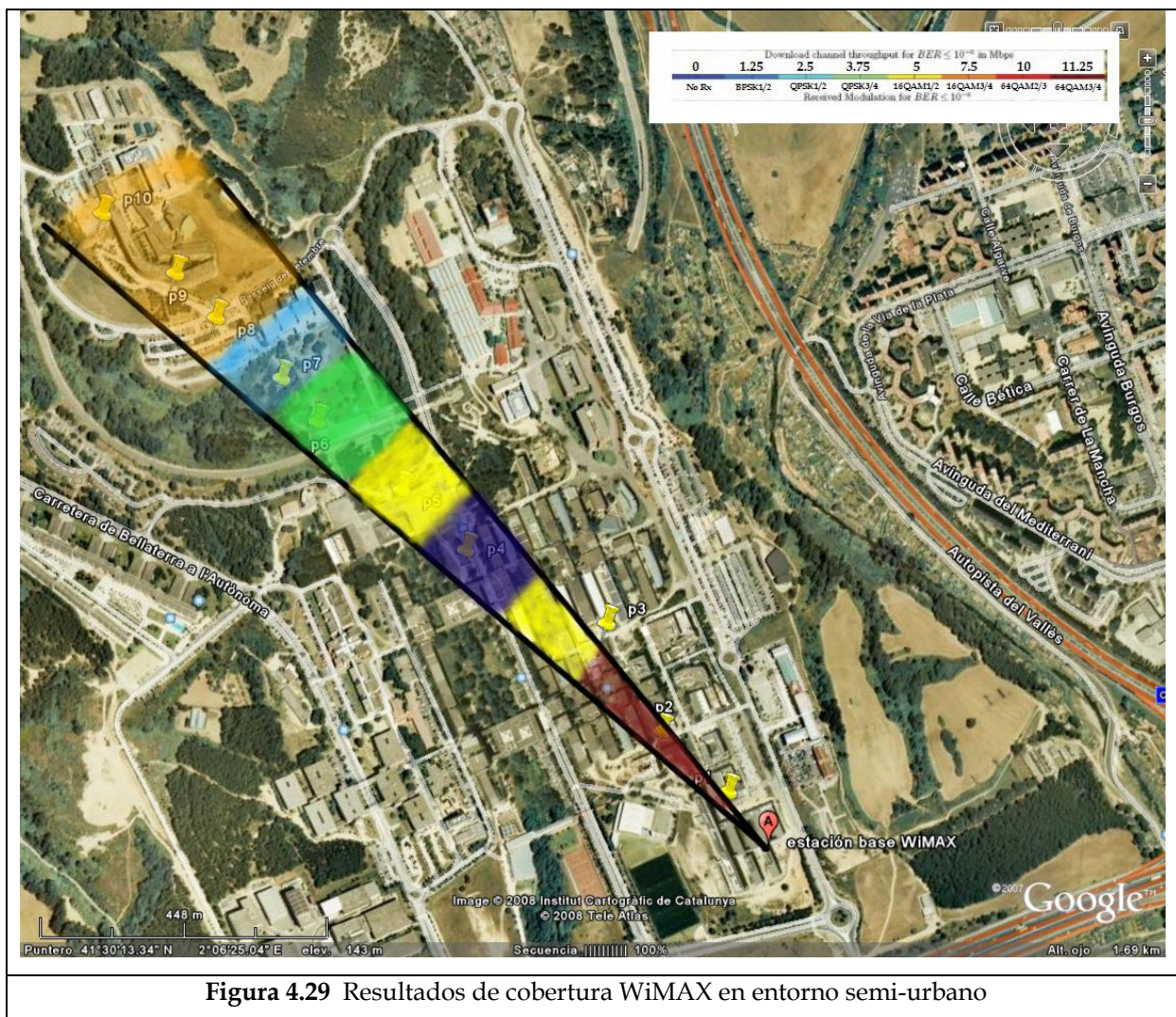
Siguiendo más adelante se encuentra que en la posición 4 la recepción es nula debido a un edificio que obstruye la propagación del rayo directo del lóbulo principal de la antena transmisora, hecho que ni por difracción en los edificios ni por reflexión en los objetos de alrededor se reciben ecos. Además los obstáculos que se encuentran anteriores empeoran más el radioenlace.

En la posición 5, al estar más alejada del edificio que se encuentra justo delante de la posición 4 y al estar a una altura un poco más elevada, se recibe señal aunque débil. La

difracción en el edificio de enfrente y la reflexión con los obstáculos laterales empiezan a contribuir en la recepción de señal.

En las posiciones 6 y 7, aún estando a una altura mayor que la posición 5 pero menor que la de los edificios, no es suficiente para contrarrestar las pérdidas causadas por la multitud de obstáculos y el incremento de distancia con la BS.

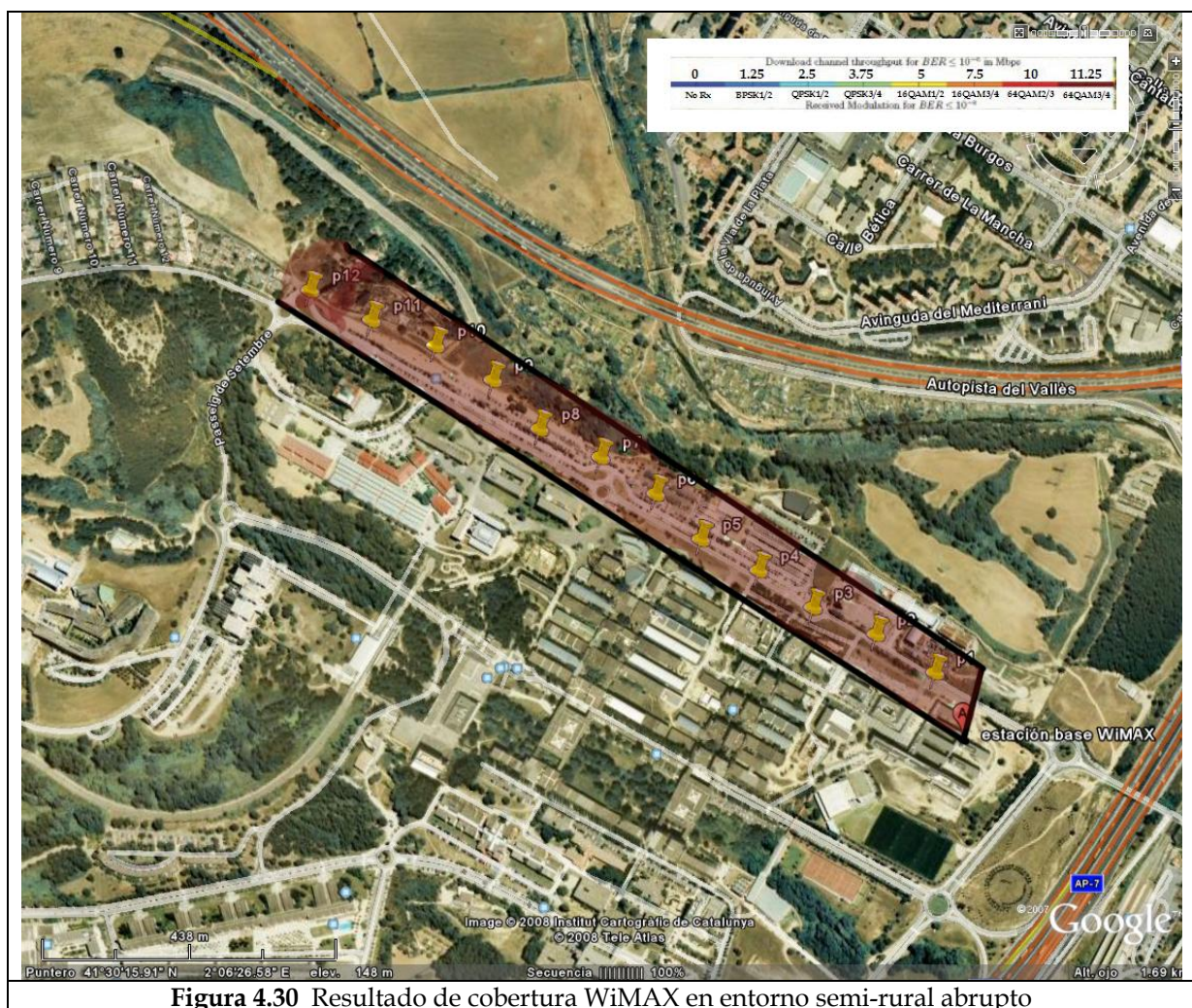
Por último, en las últimas tres posiciones, la altura del terreno se encuentra aproximadamente por el nivel de las cubiertas de los edificios y por lo tanto mejora el canal.



Observando la cobertura de la figura 4.29 se demuestra el potencial de WiMAX usando una  $\mu$ BST en un entorno tipo campus. Se comenta además que existen estaciones más potentes como por ejemplo la BS modular de BreezeMAX de Alvarion.

### 4.3.3 En escenario semi-rural

En este escenario se va a caracterizar el comportamiento de WiMAX en un entorno *outdoor* del campus de la UAB que pueda asemejarse a una zona semi-rural. El resultado de cobertura en este tipo de escenario se muestra en la figura 4.30. Así mismo, las tablas 4.8 y 4.9 muestran todos los parámetros de canal en *downlink* y también los que se obtienen en *uplink* utilizando las dos tipos de antenas de terminal WiMAX. Todos ellos han surgido a partir de realizar la media en dB (de 30 muestras también) que como ya se ha demostrado en la sección anterior es correcto emplear esta aproximación.



**ANTENA DIRECTIVA (terminal AD)**

Distancia SS-BS (m)	RSSI (dBm)		SNR (dB)		Modulación		Throughput Bruto (Mbps)		Potencia Transmisión (dBm)	
	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL
Posición 1: 100m	-61.87	-74	35	30	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	38	20
Posición 2: 200m	-56.3	-73	35	29	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	38	9
Posición 3: 300m	-67.4	-73	30.5	28.7	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	38	18
Posición 4: 400m	-64.7	-74.3	32.46	28.7	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	38	19
Posición 5: 500m	-71.6	-73.57	31.07	26.8	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	38	20
Posición 6: 600m	-42.23	-72.27	33.93	29.53	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	38	-3
Posición 7: 700m	-57.5	-73.07	34.07	29.07	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	38	20
Posición 8: 800m	-65.57	-76.73	31.77	24.87	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	38	20
Posición 9: 900m	-74.87	-78.2	26.47	24	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	38	20
Posición 10: 1000m	-71.3	-73.83	29.5	27.62	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	38	20
Posición 11: 1100m	-65.37	-75.93	31.9	24.03	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	38	20
Posición 12: 1200m	-81.2	-88.73	26.23	17.03	QAM64 3/4	QAM16 1/2	11.25	5	38	20

**Tabla 4.8** Parámetros del radioenlace medidos con la antena directiva. Escenario semi-rural abrupto**ANTENA OMNIAZIMUTAL (terminal AO)**

Distancia SS-BS (m)	RSSI (dBm)		SNR (dB)		Modulación		Throughput Bruto (Mbps)		Potencia Transmisión (dBm)	
	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL
Posición 1: 100m	-75.76	-82	28	24	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	38	20
Posición 2: 200m	-74.37	-84	28	22	QAM64 3/4	QAM16 3/4	11.25	7.5	38	20
Posición 3: 300m	-81.03	-88	22.87	-11.73	QAM64 3/4	QAM16 3/4	11.25	7.5	38	20
Posición 4: 400m	-85.4	-90.4	18.87	12.73	QAM16 3/4	QAM16 1/2	7.5	5	38	20
Posición 5: 500m	-88	-93.83	15.57	8.93	QAM16 3/4	QPSK 3/4	7.5	3.75	38	20
Posición 6: 600m	-79.4	-83.63	21.47	16.43	QAM64 3/4	QAM16 3/4	11.25	7.5	38	20
Posición 7: 700m	-94.03	-97.6	11.03	6.43	QPSK 3/4	BPSK 3/4	3.75	1.88	38	20

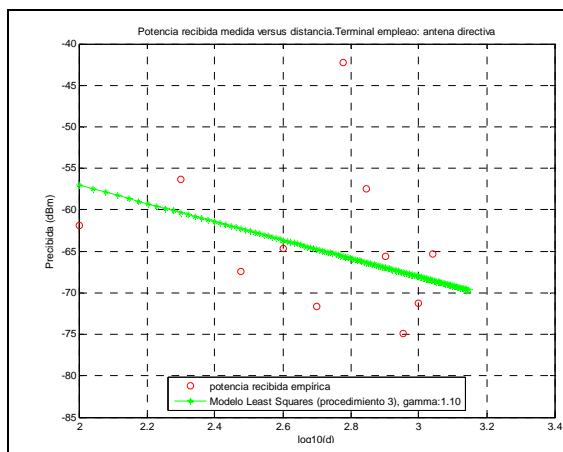
Posición 8: 800m	-95.4	-97.8	6.3	3	QPSK 1/2	BPSK 3/4	2.5	1.88	38	20
Posición 9: 900m	-96.3	-98.77	7.1	2.4	QPSK 1/2	BPSK 1/2	2.5	1.25	38	20
Posición 10: 1000m	-97.5	-98.3	8.6	2	BPSK 3/4	BPSK 1/2	1.88	1.25	38	20
Posición 11: 1100m	-94.3	-97.2	11	4.8	QPSK 1/2	BPSK 3/4	2.5	1.88	38	20
Posición 12: 1200m	-	-	-	-	-	-	-	-	38	-

**Tabla 4.9** Parámetros del radioenlace medidos con la antena omniazimutal. Escenario semi-rural abrupto

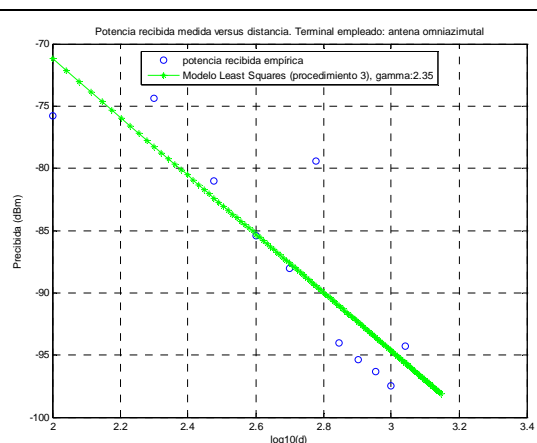
La RSSI de *downlink* de ambos terminales se grafica en las figuras 4.31 y 4.32 mostrando una comparativa con el modelo resultante que se muestra a continuación juntamente con los valores de los exponentes de *path loss* correspondientes. En cuanto al *path loss* las gráficas de las figuras 4.33 y 4.34 muestran como aumenta en función de la distancia.

$$L(dB;d)_{AD} = 89.97 + 11.03 \cdot \log(d) \rightarrow \gamma = 1.103$$

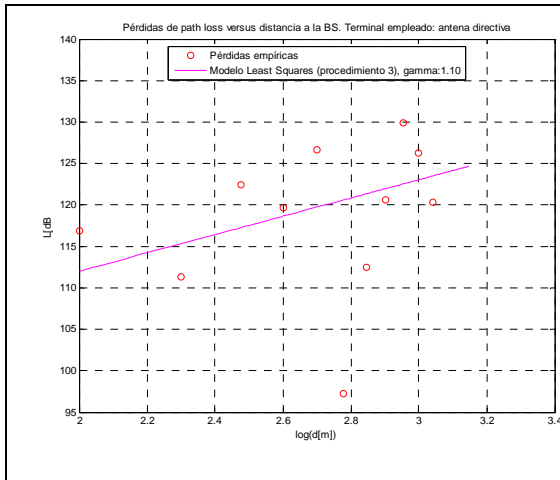
$$L(dB;d)_{AO} = 84.78 + 23.47 \cdot \log(d) \rightarrow \gamma = 2.347$$



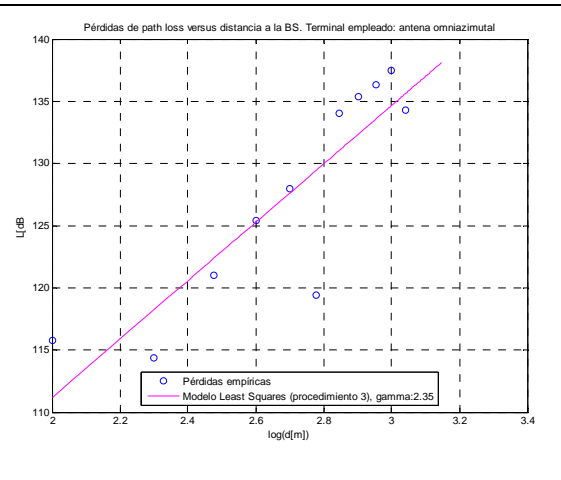
**Figura 4.31** Potencia recibida empírica y modelo empírico versus distancia a la BS.  
Terminal empleado: Antena directiva



**Figura 4.32** Potencia recibida empírica y modelo empírico versus distancia a la BS.  
Terminal empleado: Antena omniazimutal



**Figura 4.33** Pérdidas empíricas y modelo simplificado de *path loss* versus distancia a la BS. Terminal empleado: Antena direccional



**Figura 4.34** Pérdidas empíricas y modelo simplificado de *path loss* versus distancia a la BS. Terminal empleado: Antena omniazimutal

Los valores que se han obtenido para el exponente de *path loss* no son coherentes porque para este tipo de escenario más o menos abrupto descrito en la sección 4.2.2 se espera obtener  $\gamma$  mayores que las que se obtienen para el siguiente escenario semi-rural suave también descrito en la 4.2.2. Para hacerse una idea una  $\gamma = 3.9$  se corresponde a una zona urbana tal como se demuestra en [Val08] mientras que  $2 < \gamma < 3$  se puede corresponder a una zona rural [Imp07]. Una explicación de lo que realmente ocurre es que la medida obtenida a la primera posición es una medida corrupta, es decir, la potencia recibida medida al ser menor que las siguientes potencias recibidas a distancias mayores causa una pendiente de la recta que define el modelo cerca de 1. Por lo tanto se debe hacer una corrección en la posición 1 restando la atenuación del obstáculo que influye en el valor del exponente. Las siguientes posiciones no se corrigen porque el obstáculo afecta con mayor magnitud a la posición 1 como se muestra en la figura 4.10. Para obtener de manera aproximada la atenuación del obstáculo/conjunto de obstáculos que obstruye/n la visibilidad a la distancia de 100m se emplea la siguiente expresión. El terminal de antena direccional ha sido utilizado para el cálculo de la atenuación.

$$\hat{L}(dB) = P_r(dBm)_{LOS} - P_r(dBm)_{NLOS} \quad (4.12)$$

siendo  $P_r(dBm)_{LOS}$  la potencia recibida a una distancia de la BS en visión directa y  $P_r(dBm)_{NLOS}$  la potencia recibida sin visión directa a la misma distancia de la BS.

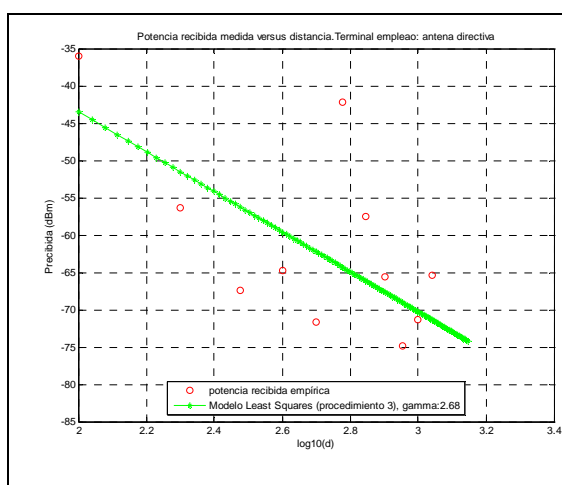
Distancia SS-BS		RSSI (dBm)		SNR (dB)		Mod/FEC		Pt (dBm)	
		DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL
100m	LOS	-36.03	-72	34.53	30.23	QAM64 3/4	QAM64 3/4	38	-10
	NLOS	-61.87	-74	35	30	QAM64 3/4	QAM64 3/4	38	20

**Tabla 4.10** Parámetros del radioenlace en condiciones LOS/NLOS a una distancia de la BS de 100m

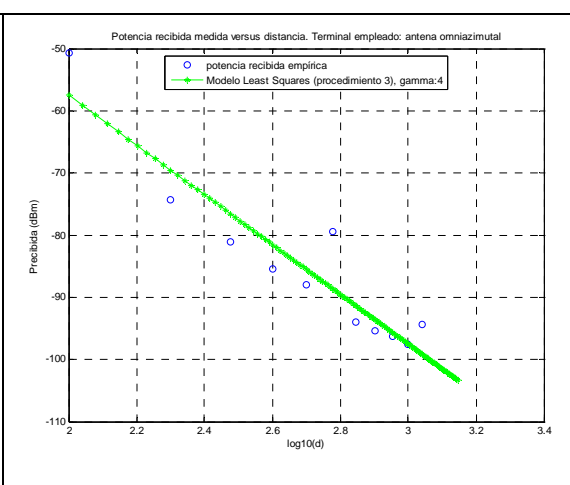
De la tabla 4.10 se puede estimar que la atenuación del obstáculo u conjunto de obstáculos es:

$$\hat{L}(dB) = \text{RSSI}_{\text{DL\_LOS}} - \text{RSSI}_{\text{DL\_NLOS}} = 25.84 \text{ dB}$$

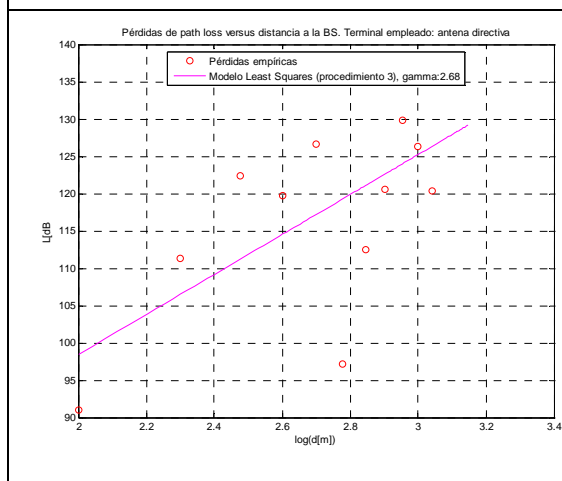
Actualizando la posición 1 de las tablas 4.8 y 4.9 con la potencia recibida en condiciones LOS se obtienen los siguientes resultados:



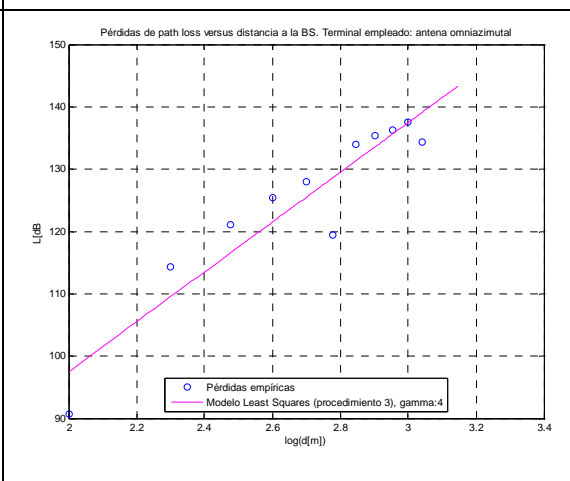
**Figura 4.35** Potencia recibida empírica y modelo empírico versus distancia a la BS.  
Terminal empleado: Antena direccional



**Figura 4.36** Potencia recibida empírica y modelo empírico versus distancia a la BS.  
Terminal empleado: Antena omniazimutal



**Figura 4.37** Pérdidas empíricas y modelo simplificado de *path loss* versus distancia a la BS. Terminal empleado: Antena direccional



**Figura 4.38** Pérdidas empíricas y modelo simplificado de *path loss* versus distancia a la BS. Terminal empleado: Antena omniazimutal

Como se puede comprobar en los resultados obtenidos el valor del exponente  $\gamma$  es más coherente: 2.68 frente al 1.10 del caso anterior. En conclusión los nuevos modelos que definen este tipo de escenario para cada uno de los terminales WiMAX empleados son:

- Modelo de *path loss* para el terminal WiMAX de antena directiva:

$$L(\text{dB}; d)_{AD} = 89.97 + 26.8 \cdot \log(d)$$

$$\gamma = 2.68$$

- Modelo de *path loss* para el caso del terminal WiMAX de antena omniazimuthal:

$$L(\text{dB}; d)_{AO} = 84.78 + 40 \cdot \log(d)$$

$$\gamma = 4$$

A continuación se va a analizar el escenario semi-rural suave tal y como se observa en el mapa de la figura 4.39 cuyas posiciones de medida se indican sobre el mismo así como los resultados de cobertura en cuanto a modulación y *throughput* bruto medio recibido.

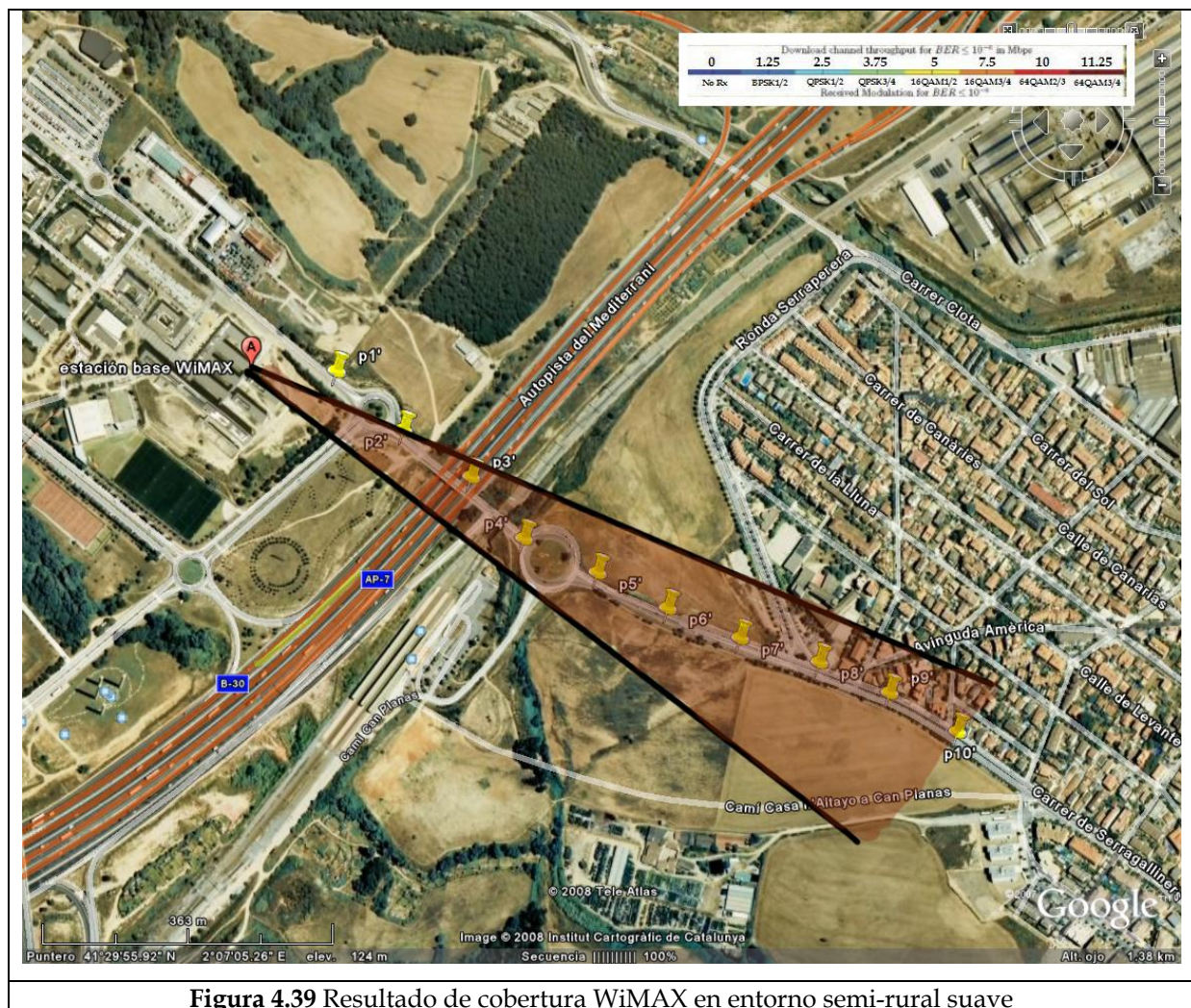


Figura 4.39 Resultado de cobertura WiMAX en entorno semi-rural suave

**ANTENA DIRECTIVA (terminal AD)**

Distancia SS-BS (m)	RSSI (dBm)		SNR (dB)		Modulación		Throughput Bruto (Mbps)		Potencia Transmisión (dBm)	
	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL
Posición 1: 100m	-62.57	-74.47	33.57	26.63	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	38	20
Posición 2: 200m	-45.97	-72.6	34.97	29.07	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	38	-3
Posición 3: 300m	-55.2	-72.6	34.83	28.87	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	38	12
Posición 4: 400m	-53.96	-72.33	34.95	30	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	38	14
Posición 5: 500m	-50.63	-72.63	34.93	29.3	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	38	8
Posición 6: 600m	-51.7	-72.7	35	29.4	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	38	10
Posición 7: 700m	-70.12	-78.3	30.16	24.13	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	38	20
Posición 8: 800m	-66.43	-75.1	32.4	27.2	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	38	20
Posición 9: 900m	-79.63	-84.2	23	17.9	QAM64 3/4	QAM16 3/4	11.25	7.5	38	20
Posición 10: 1000m	-80.13	-83.87	24.3	15.03	QAM64 3/4	QAM16 3/4	11.25	7.5	38	20

**Tabla 4.11** Calidad del canal en distintas posiciones empleando el terminal de antena directiva**ANTENA OMNIAZIMUTAL (terminal AO)**

Distancia SS-BS (m)	RSSI (dBm)		SNR (dB)		Modulación		Throughput Bruto (Mbps)		Potencia Transmisión (dBm)	
	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL
Posición 1: 100m	-71.2	-81.33	29.63	20.53	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	38	20
Posición 2: 200m	-78.17	-88.4	24.63	14.47	QAM64 3/4	QAM16 1/2	11.25	5	38	20
Posición 3: 300m	-88.87	-88.17	16	14	QAM16 1/2	QAM16 1/2	5	5	38	20
Posición 4: 400m	-83.6	-82.87	21.43	19.06	QAM16 3/4	QAM64 2/3	7.5	10	38	20
Posición 5: 500m	-82.9	-87.03	19.5	13.53	QAM64 2/3	QAM16 3/4	10	7.5	38	20
Posición 6: 600m	-84.57	-89.23	18.73	14.23	QAM16 3/4	QAM16 1/2	7.5	5	38	20
Posición 7: 700m	-94.53	-96.83	8.73	4.93	QPSK 1/2	QPSK 1/2	2.5	2.5	38	20
Posición 8: 800m	-89.83	-93.9	14.5	7.43	QAM16 1/2	QPSK 3/4	5	3.75	38	20
Posición 9: 900m	-95.35	-97.82	5.34	4.87	QPSK 1/2	BPSK 1/2	2.5	1.25	38	20
Posición 10: 1000m	-97	-96.2	6.43	4.26	QPSK 1/2	QPSK 1/2	2.5	2.5	38	20

**Tabla 4.12** Calidad del canal en distintas posiciones empleando el terminal de antena omniazimutal

De la misma manera que se ha realizado en los escenarios semi-urbano y semi-rural abrupto, a partir de los resultados sobre las potencias recibidas empíricas empleando ambos terminales se puede obtener el modelo que disponga el mínimo error cuadrático medio, es decir se deben encontrar aquellos coeficientes del modelo general (4.5) que minimizan el error cuadrático medio entre las datos empíricos y el modelo. Los modelos con sus coeficientes encontrados para ambos terminales se definen a continuación.

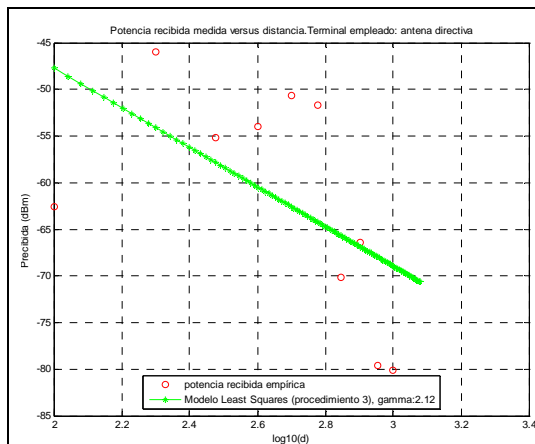
$$L(\text{dB};d)_{AD} = 58.85 + 21.21 \cdot \log(d)$$

$$L(\text{dB};d)_{AO} = 64.20 + 22.95 \cdot \log(d)$$

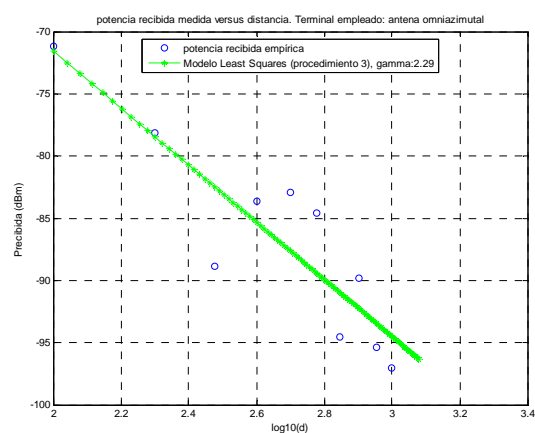
$$\gamma = 2.121$$

$$\gamma = 2.295$$

Con toda la información que se dispone es posible representar gráficamente la potencia recibida en función de la distancia a partir de los modelos hallados. Las siguientes gráficas definen la tendencia de la potencia recibida a lo largo del recorrido indicado en el mapa de la figura 4.39.



**Figura 4.40** Potencia recibida empírica y modelo empírico versus distancia a la BS.  
Terminal empleado: Antena direccional



**Figura 4.41** Potencia recibida empírica y modelo empírico versus distancia a la BS.  
Terminal empleado: Antena omniangular

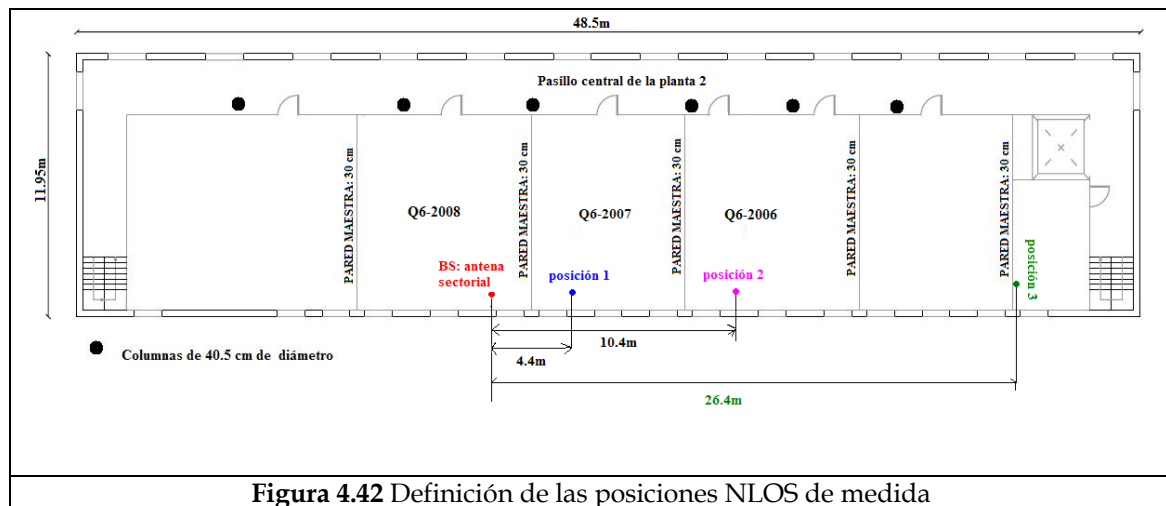
Claramente de las gráficas de las figuras 4.40 y 4.41 se puede decir que el modelo que se acerca más a los datos empíricos tiene una pendiente de  $\gamma \approx 2$  (el escenario es oLOS (*obstructed LOS*) en la mayoría de las posiciones). Las posiciones 1, 2, 3, 4, 5,6 son entorno a un canal oLOS y más o menos sobre la misma altura respecto el mar mientras que las posiciones 7, 8, 9,10 son entorno a un canal NLOS total debido a que la altura del terreno va

disminuyendo. Es decir un 60% es casi un canal LOS mientras que el restante es un canal NLOS. En este tipo de escenario más suave no es necesario corregir ninguna posición porque siendo el valor de  $\gamma$  menor que el del escenario semi-rural anterior, el obstáculo que rodea el edificio donde se encuentra la estación base (una montaña de una altura aproximada de entre 2-4 m mayor que la altura del terminal WiMAX sobre el terreno) afecta en gran parte a las medidas obtenidas desde las posiciones 1-6. Por lo tanto si se corrige la posición 1 en términos de potencia recibida en entorno LOS entonces se deben corregir también las demás posiciones. La figura 4.10 muestra el escenario con una vista de perfil.

#### 4.3.4 En escenario *indoor*

Para los resultados de cobertura en el escenario *indoor*, en un primer lugar se emplea como antena de la estación base una sectorial de 14.5 dBi de ganancia. Debido a las limitaciones de potencia para escenarios *indoor*, la potencia de transmisión de la estación base es la mínima que permita cobertura hasta la posición más lejana (posición 3 de la figura 4.42) que por las medidas obtenidas  $P_{t,min} = 18$  dBm. Además, se emplea el algoritmo de modulación y codificación adaptativa, y el soporte de ARQ<sup>67</sup>.

La figura 4.42 muestra las posiciones con escenarios NLOS a partir de las cuales se han obtenido los resultados aproximados de la tabla 4.14.



**Figura 4.42** Definición de las posiciones NLOS de medida

Tal como se ha comentado anteriormente el análisis que se quiere realizar sirve para la obtención de un modelo simplificado de pérdidas de propagación de WiMAX en interiores a la banda de 3.5 GHz, a partir de los resultados obtenidos empíricamente. Por ello se parte de un modelo de propagación general para escenarios *indoor* [Gol05] en el que tiene en cuenta

<sup>67</sup> Automatic Repetition Request

las pérdidas de propagación debidas a la distancia, que no es más que el *path loss*, y además la atenuación o pérdidas provocada por las paredes, los entresuelos entre plantas, y la penetración de la señal en el edificio, en el caso en que la antena de la estación base se encontrase localizada en la cubierta del mismo. El modelo según *goldsmith* para el cálculo de la potencia recibida en escenarios *indoor* se muestra en 4.13.

$$P_r(dBm) = P_t(dBm) + G_{BS} + G_{TU} - P_L(d) - \sum_{i=1}^{N_f} FAF_i - \sum_{i=1}^{N_p} PAF_i \quad (4.13)$$

donde:

$P_t(dBm)$ : Potencia de transmisión de la estación base: 18 dBm.

$G_{BS}$ : Ganancia de la antena de la estación base: 14.5 dBi (con la antena sectorial)

$G_{TU}$ : Para el caso de la antena del terminal de usuario: 9 dBi.

$P_L(d)$ : Pérdidas de propagación (en condiciones LOS)

$FAF_i$ : Atenuación causada por el entresuelo 'i'.

$PAF_j$ : Atenuación causada por la pared 'j'.

Con el objetivo de verificar que el modelo puede servir para un canal WiMAX 3.5 GHz *indoor* es necesario obtener los factores  $FAF^{68}$ ,  $PAF^{69}$  y  $P_L(d)$ . En un primer lugar se va a obtener la atenuación causada por una pared, por ejemplo la existente entre el laboratorio Q6-2008 y el Q6-2007 (ver arquitectura de la planta 2 en la figura 4.2a o figura 4.2d). De la misma manera que se ha hecho en el escenario semi-rural para el cálculo de la atenuación de un obstáculo o conjunto de obstáculos que impedían la visibilidad directa con la BS a una distancia de 100m, se recuerda de nuevo el método seguido.

$$PAF_i(dB) = P_r(dBm)_{LOS} - P_r(dBm)_{NLOS} \quad (4.14)$$

siendo  $P_r(dBm)_{LOS}$  la potencia recibida por el terminal *indoor* con visibilidad directa a la estación base y  $P_r(dBm)_{NLOS}$  la potencia recibida por el terminal *indoor* sin visibilidad directa, ambas obtenidas a la misma distancia de la estación base. El resultado es la atenuación causada por cada una de las paredes de la misma planta porque se supone que todas ellas están hechas con el mismo tipo de material.

Otro factor del modelo anterior que se debe obtener son las pérdidas de propagación en función de la distancia a la estación base. Por ello se parte de un escenario LOS con

<sup>68</sup> Floor Attenuation Factor

<sup>69</sup> Partition Attenuation Factor

distancias equiespaciadas 4.4m (con excepción la de 10.4m) de la estación base a lo largo del pasillo del mismo edificio. Los resultados se muestran en la tabla 4.13. Se ha realizado un promediado logarítmico que como ya se ha demostrado la certeza de que se puede hacer, todas las medidas que aparezcan a continuación son fruto de un promediado en dB.

Distancia SS <sup>70</sup> -BS (m)	RSSI (dBm)		SNR (dB)		Modulación		Throughput Bruto (Mbps)		Potencia Transmisión (dBm)	
	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL
4.4	-20	-68	35	30	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	18	-28
8.8	-15	-64	35	32	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	18	-28
10.4	-29	-71	35	30	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	18	-28
13.2	-18	-66	35	29	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	18	-20
17.6	-17	-70	34	30	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	18	-28
22	-18	-66	35	32	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	18	-28
26.4	-24	-72	35	30	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	18	-28
30.8	-24	-71	35	30	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	18	-28
35.2	-19	-68	35	32	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	18	-28
39.6	-24	-73	36	28	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	18	-18

**Tabla 4.13** Parámetros físicos de canal obtenidos a distancias equiespaciadas en escenario LOS

La tabla 4.14 muestra la información anterior pero en el caso NLOS para las 3 posiciones indicadas en la figura 4.42.

Distancia SS-BS (m)	RSSI (dBm)		SNR (dB)		Modulación		Throughput Bruto (Mbps)		Potencia Transmisión (dBm)	
	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL
4.4	-33	-73	34	26	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	18	-20
10.4	-54	-73	35	30	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	18	-3
26.4	-90	-78	15	25	QAM16 1/2	QAM64 3/4	5	11.25	18	22

**Tabla 4.14** Parámetros físicos de canal obtenidos a las posiciones de la figura 4.42. Escenario NLOS

<sup>70</sup> Subscriber Station

A partir de los resultados de las tablas 4.13 y 4.14 se puede obtener el PAF aproximado de la pared de 30 cm que impide la visibilidad entre la antena sectorial de la estación base localizada en el laboratorio Q6-2008 y el terminal WiMAX localizado en la posición 1:

$$PAF_1 = -20 \text{ dBm} - (-33 \text{ dBm}) = 13 \text{ dB}$$

Por lo tanto la atenuación que causa una pared de cartón yeso de 30 cm de grosor a la frecuencia de 3.5 GHz causa una atenuación media de 13 dB.

En cuanto a las pérdidas de propagación existentes a una distancia de 4.4m se obtiene

$$P_L(d = 4.4) = P_t + G_{BS} + G_{TU} - P_r = 18 \text{ dBm} + 14.5 \text{ dB} + 9 \text{ dB} - (-20 \text{ dBm}) = 61.5 \text{ dB} \quad (4.15)$$

Comparando el resultado con la ecuación de Friis:

$$P_L(d) = -20 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right) \quad (4.16)$$

$$P_L(d = 4.4 \text{ m}) = -20 \log\left(\frac{3 \cdot 10^8}{4\pi \cdot 4.4 \cdot 3.5 \cdot 10^9}\right) = 56.19 \text{ dB}$$

El resultado se acerca al que se obtiene empíricamente. La diferencia entre el valor obtenido en *indoor* y el que se obtiene por la ecuación de Friis es que el entorno donde se han obtenido los resultados aún siendo LOS, existen objetos alrededor que pueden disminuir las pérdidas debido a las reflexiones. En otras palabras, si las medidas se hubiesen obtenido en un entorno LOS total como el del espacio libre entonces las pérdidas de propagación a la misma distancia de 4.4 m serían de 56.19 dB. Al haber objetos alrededor puede provocar interferencias destructivas produciéndose pérdidas de potencia. A este efecto se le conoce como *fast fading*, o desvanecimiento a grande escala debido a la propagación multicamino.

Con el PAF obtenido se procede a verificar el modelo de predicción de la potencia recibida en interiores descrito anteriormente. Se va a tomar la distancia de 4.4 m y la de 10.4 m.

$$P_r(\text{dBm}, d = 4.4 \text{ m}) = 18 \text{ dBm} + 14.5 \text{ dB} + 9 \text{ dB} - 61.5 \text{ dB} - 13 \text{ dB} = -33 \text{ dBm}$$

$$P_L(d = 10.4 \text{ m}) = 18 \text{ dBm} + 14.5 \text{ dB} + 9 \text{ dB} - (-29 \text{ dBm}) = 70.5 \text{ dB}$$

$$P_r(\text{dBm}, d = 10.4 \text{ m}) = 18 \text{ dBm} + 14.5 \text{ dB} + 9 \text{ dB} - 70.5 \text{ dB} - 2 \cdot 13 \text{ dB} = -55 \text{ dBm}$$

La predicción de las potencias recibidas obtenidas con el modelo a distancias de 4.4m y de 10.4m de la estación base coincide con las potencias recibidas por el terminal WiMAX en las posiciones correspondientes. Por lo tanto se puede afirmar que el modelo indicado en

4.13 para interiores puede ser aplicado a la tecnología WiMAX a la frecuencia de 3.5 Ghz (siempre y cuando se conozca la atenuación de los obstáculos).

A continuación se procede con los cálculos para obtener  $P_L(d)$ , en condiciones LOS, basado en el modelo (4.1). Por ello se utiliza el método de *Least Squares* para buscar el valor de  $\gamma$  tal que la potencia del error entre los resultados medidos y los que se obtienen por el modelo sea el mínimo. Es decir el procedimiento seguido es el mismo que el que se ha realizado en el escenario semi-urbano en (4.9):

$$F(\gamma) = \sum_{i=1}^{10} [L_{medido}(d_i) - L_{modelo}(d_i)]^2 \rightarrow \frac{\partial F(\gamma)}{\partial \gamma} = 0 \rightarrow \gamma \quad (4.17)$$

donde  $L_{medido}(d_i)$  es el *path loss* obtenido a partir de los resultados empíricos en la distancia  $d_i$  y  $L_{modelo}(d_i)$  es la media (en dB) del modelo descrito en 4.5 a la distancia  $d_i$ , es decir, sin considerar la aleatoriedad del nivel de potencia de la señal recibida. La siguiente expresión es el modelo de *path loss* para WiMAX 802.16-2004 a 3.5 GHz con la incógnita  $\gamma$  (se fija  $d_0 = 1m$ ).

$$L_{modelo} = 20 \log\left(\frac{4\pi \cdot 3.5 \cdot 10^9}{3 \cdot 10^8}\right) + 10\gamma \log(d) + 6 \log(3.5/2) = 44.781 + 10\gamma \log(d)$$

Aplicando *Least squares* con los datos recogidos en la tabla 4.13:

$$\begin{aligned} F(\gamma) &= (61.5 - 44.78 - 6.43\gamma)^2 + (56.5 - 44.78 - 9.44\gamma)^2 + (70.5 - 44.78 - 10.17\gamma)^2 \\ &+ (59.5 - 44.78 - 11.21\gamma)^2 + (58.5 - 44.78 - 12.46\gamma)^2 + (59.5 - 44.78 - 13.42\gamma)^2 \\ &+ (65.5 - 44.78 - 14.22\gamma)^2 + (65.5 - 44.78 - 14.89\gamma)^2 + (60.5 - 44.78 - 15.47\gamma)^2 \\ &+ (65.5 - 44.78 - 15.98\gamma)^2 = 3235.10 + 1613.6\gamma^2 - 4381.7\gamma \\ \frac{\partial F(\gamma)}{\partial \gamma} &= 3227.2\gamma - 4381.7 = 0 \rightarrow \gamma = 1.36 \end{aligned}$$

El valor obtenido para el exponente de *path loss* no tiene mucha coherencia ya que debería acercarse a 2, porque el canal donde se obtuvieron los resultados era LOS, cercano al del espacio libre. Para obtener un modelo de *path loss* fiable fue necesario realizar las medidas en un pasillo 3 veces más largo y recoger muestras cada 14.8 m. Entonces se obtuvieron también otras 10 medidas con un canal LOS pero en una zona diferente fuera del edificio Q6. Los resultados obtenidos en media se muestran en la tabla 4.15.

Distancia SS-BS (m)	RSSI (dBm)		SNR (dB)		Modulación		Throughput Bruto (Mbps)		Potencia Transmisión (dBm)	
	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL
24	-30	-72	35	29	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	13	-28
38.8	-37	-71	35	29	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	13	-24
53.6	-37	-72	35	29	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	13	-20
68.4	-33	-72	34	29	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	13	-23
83.2	-47	-73	35	30	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	13	-3
98	-56	-74	35	29	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	13	-3
112.4	-60	-73	34	28	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	13	2
127.2	-40	-71	33	29	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	13	-15
142	-40	-72	34	29	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	13	-17
156.8	-48	-71	35	28	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	13	-13

**Tabla 4.15** Parámetros físicos de canal obtenidos a diferentes distancias de la BS en entorno LOS.

Con los nuevos datos de la tabla 4.15 se procede de nuevo al cálculo del valor del exponente de *path loss* siguiendo el procedimiento anterior:

$$\begin{aligned}
 F(\gamma) &= (66.5 - 44.78 - 13.80\gamma)^2 + (73.5 - 44.78 - 15.89\gamma)^2 + (73.5 - 44.78 - 17.29\gamma)^2 \\
 &+ (69.5 - 44.78 - 18.35\gamma)^2 + (83.5 - 44.78 - 19.20\gamma)^2 + (92.5 - 44.78 - 19.91\gamma)^2 \\
 &+ (96.5 - 44.78 - 20.51\gamma)^2 + (76.5 - 44.78 - 21.05\gamma)^2 + (76.5 - 44.78 - 21.52\gamma)^2 \\
 &+ (84.5 - 44.78 - 21.96\gamma)^2 = 12774 + 3652.5\gamma^2 - 13366\gamma \\
 \frac{\partial F(\gamma)}{\partial \gamma} &= 7305\gamma - 13366 = 0 \rightarrow \gamma = 1.83
 \end{aligned}$$

El valor del exponente de *path loss* se acerca más al valor del espacio libre; no es exactamente 2, porque el escenario no es espacio libre, el espacio libre es solo un modelo teórico que predice las pérdidas de propagación en un canal ideal sin obstáculos ni objetos alrededor. Por otro lugar el valor es coherente porque según [Kiv01] [Xu07] un valor del exponente menor a 2 es debido al efecto de guía de ondas que asemeja el pasillo. Por lo tanto y como aproximación, el modelo simplificado de *path loss* de WiMAX 802.16-2004 a 3.5 GHz para interiores es:

$$L_{\text{modelo\_WiMAX 3.5}}(d) = 44.781 + 18.3 \log(d) \quad \gamma = 1.83$$

Ahora que ya se tiene el modelo simplificado de *path loss*, se va a utilizar a continuación en el modelo de predicción de la potencia recibida (4.13) para comprobar si el resultado se acerca a los que se obtienen experimentalmente.

- Potencia recibida en la posición1

$$P_r(dBm, d = 4.4m) = 18 dBm + 14.5 dB + 9 dB - (44.78 + 18.3 \cdot \log(4.4)) - 13 dB = -28.06 dBm$$

- Potencia recibida en la posición2

$$P_r(dBm, d = 10.4m) = 18 dBm + 14.5 dB + 9 dB - (44.78 + 18.3 \cdot \log(10.4)) - 2 \cdot 13 dB \\ = -47.89 dBm$$

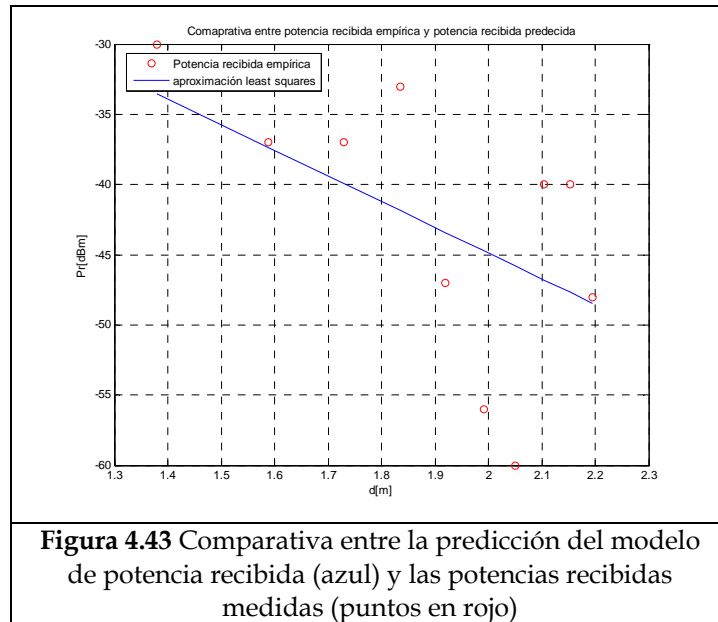
- Potencia recibida en la posición3

$$P_r(dBm, d = 26.4m) = 18 dBm + 14.5 dB + 9 dB - (44.78 + 18.3 \cdot \log(26.4)) - 4 \cdot 13 dB \\ = -81.3 dBm$$

Los resultados que se obtienen en las posiciones 1 y 2 con el modelo encontrado se acercan a los obtenidos de manera empírica en las posiciones de la figura 4.42. La diferencia entre lo que se predice por el modelo y lo que se mide, como ya se ha comentado anteriormente es debido a la propagación multicamino y además se cuenta con un nuevo efecto, local *scattering* o dispersión causada por pequeños cuerpos con una cierta sección recta radar  $\sigma$  [m<sup>2</sup>] (como si se tratase de un blanco radar), muy típico en escenarios de interiores.

La potencia que se predice en la posición 3 es prácticamente la que se puede medir experimentalmente. La potencia recibida que se ha podido medir en esta posición fluctúa entre -80 dBm y -90dBm. Por lo tanto se puede asegurar que el resultado que se predice por el modelo de (4.13) juntamente con el modelo de *path loss* con exponente de 1.83 obtenido a partir de unas medidas realizadas en escenario LOS es válido para poder hacer una aproximación de la potencia media recibida en una cierta distancia de la estación base en interiores conociendo la atenuación de las distintas particiones.

La gráfica de la figura 4.43 representa en azul la aproximación *least squares* del modelo simplificado de *path loss* y los puntos en rojo como las potencias recibidas medidas experimentalmente. Se observa como los resultados empíricos son variaciones o fluctuaciones de la media obtenida por *least squares* y que estos se encuentran entre aproximadamente entre 1dB y 15 dB. Cabe mencionar que con mayor número de medidas los resultados del modelo podrían ser más exactos.



A continuación se va a medir la potencia recibida en la planta 1 del edificio a una distancia aproximada de 8.8m de la estación base. Posteriormente se obtiene el FAF del entresuelo de 117 cm de grosor existente entre la planta 2 y la planta 1 y finalmente se compara la potencia recibida por el terminal y la que se obtiene por el modelo de predicción. Los resultados del canal obtenidos a una distancia de 8.8m, en la planta inferior se muestran en la tabla 4.16 (estos se han obtenidos para una potencia de transmisión de 13 dBm).

Distancia SS-BS		RSSI (dBm)		SNR (dB)		Mod/FEC		Pt (dBm)	
		DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL
8.8m	LOS	-19	-60	35	33	QAM64 3/4	QAM64 3/4	13	-28
	NLOS	-76.5	-72	26	29	QAM64 3/4	QAM64 3/4	13	7

**Tabla 4.16** Parámetros físicos de canal obtenidos a una distancia de 8.8m

de la BS para el cálculo del FAF

A partir de la tabla 4.16 se puede obtener de forma aproximada la atenuación de la partición entre la planta 2 y la planta 1 de la misma manera que se realizó para obtener la atenuación de una pared empleando la ecuación (4.12).

$$\text{FAF} = -19 - (-76.5) = 57.5 \text{ dB de atenuación la frecuencia de 3.5 GHz.}$$

La potencia recibida según 4.13 es:

$$\text{Pr} = 13 \text{ dBm} + 14.5 \text{ dB} + 9 \text{ dB} - (44.78 + 18.3 \cdot \log(8.8)) - 57.5 = -83.06 \text{ dBm}$$

Se demuestra que el modelo sirve para obtener una aproximación de la potencia recibida a una cierta distancia (en el caso que existan obstrucciones es necesario saber la atenuación de estos). Por ejemplo la potencia recibida en la última planta a una distancia de 21.42 m de la BS sería aproximadamente (suponiendo que la atenuación que añade la partición entre la planta 1 y la planta 0 es también de 57.5 dB):

$$Pr_2 = 13 + 14.5 + 9 - (44.78 + 18.3 \cdot \log(21.42)) - 2 \cdot 57.5 = -147.6 \text{ dBm}$$

La conclusión es que con una potencia de 13 dBm no es suficiente para cubrir la última planta del edificio ya que la potencia que se recibe es menor a la sensibilidad de una BPSK 1/2 que es de -100 dBm, para el equipo utilizado. En el caso de transmitir a la máxima potencia de 28 dBm tampoco no es suficiente para dar servicio a la planta 0 debido a que la potencia recibida sigue siendo menor a la sensibilidad de la BPSK 1/2.

El modelo analizado hasta ahora es un modelo que permite calcular la potencia recibida en un entorno *indoor* a partir de las pérdidas de propagación en espacio libre y de la atenuación causada por las particiones entre plantas y las paredes. El inconveniente que presenta es que se debe tener un conocimiento sobre la atenuación de cada tipo diferente de partición y en el caso de que existan muchas puede llegar a ser inviable la utilización de este modelo. Por esta razón se podría optar a la utilización del modelo de *path loss* pero con un exponente de *path loss* adecuado para un escenario *indoor* siendo normalmente mayor que 5. Para el escenario donde se realizan las medidas se va a obtener su exponente de *path loss* correspondiente a partir de los datos de las potencias recibidas de la tabla 4.17 y luego se compara el nuevo modelo resultante con el modelo obtenido anteriormente. La tabla 4.17 muestra las pérdidas de propagación para cada posición de la figura 4.42.

Distancia SS-BS	L (dB)
4.4m	74.5
10.4m	95.5
26.4m	131.5

**Tabla 4.17** Pérdidas de propagación para las tres posiciones de la figura 4.42

$$J(\gamma) = \sum_{i=1}^3 [L_{empírico}(dB) - L_{modelo}(dB)]^2 = [74.5 - 44.78 - 6.43\gamma]^2 + [95.5 - 44.78 - 10.17\gamma]^2 + [131.5 - 44.78 - 14.22\gamma]^2 = 10976 + 346.98\gamma^2 - 3880.2\gamma$$

$$\frac{\partial F(\gamma)}{\partial \gamma} = 693.96\gamma - 3880.2 = 0 \rightarrow \gamma = 5.59$$

El nuevo modelo obtenido de WiMAX 3.5GHz para interiores por medio de *Least Squares* es:

$$L_{\text{modelo\_WiMAX 3.5\_indoor}}(d) = 44.781 + 55.9 \log(d)$$

$$\gamma = 5.59$$

Con ese nuevo modelo no es necesario obtener la atenuación de cada obstáculo que aparece entre la antena transmisora y la antena receptora porque de alguna manera la atenuación causada por los obstáculos es “absorbida” por el exponente de *path loss* (por esta razón tiene un valor muy elevado). A continuación se compara este modelo con el que se ha optado a lo largo del análisis en el escenario *indoor*:

- Potencia recibida en la posición1

$$P_r(\text{dBm}, d = 4.4\text{m}) = 18 \text{ dBm} + 14.5 \text{ dB} + 9 \text{ dB} - (44.78 + 55.9 \cdot \log(4.4)) \text{ dB} = -39.25 \text{ dBm}$$

- Potencia recibida en la posición2

$$P_r(\text{dBm}, d = 10.4\text{m}) = 18 \text{ dBm} + 14.5 \text{ dB} + 9 \text{ dB} - (44.78 + 55.9 \cdot \log(10.4)) \text{ dB} \\ = -60.13 \text{ dBm}$$

- Potencia recibida en la posición3

$$P_r(\text{dBm}, d = 26.4\text{m}) = 18 \text{ dBm} + 14.5 \text{ dB} + 9 \text{ dB} - (44.78 + 55.9 \cdot \log(26.4)) \text{ dB} = -82.75 \text{ dBm}$$

A modo resumen la tabla 4.18 muestra una comparativa entre ambos modelos de *path loss* obtenidos empíricamente:

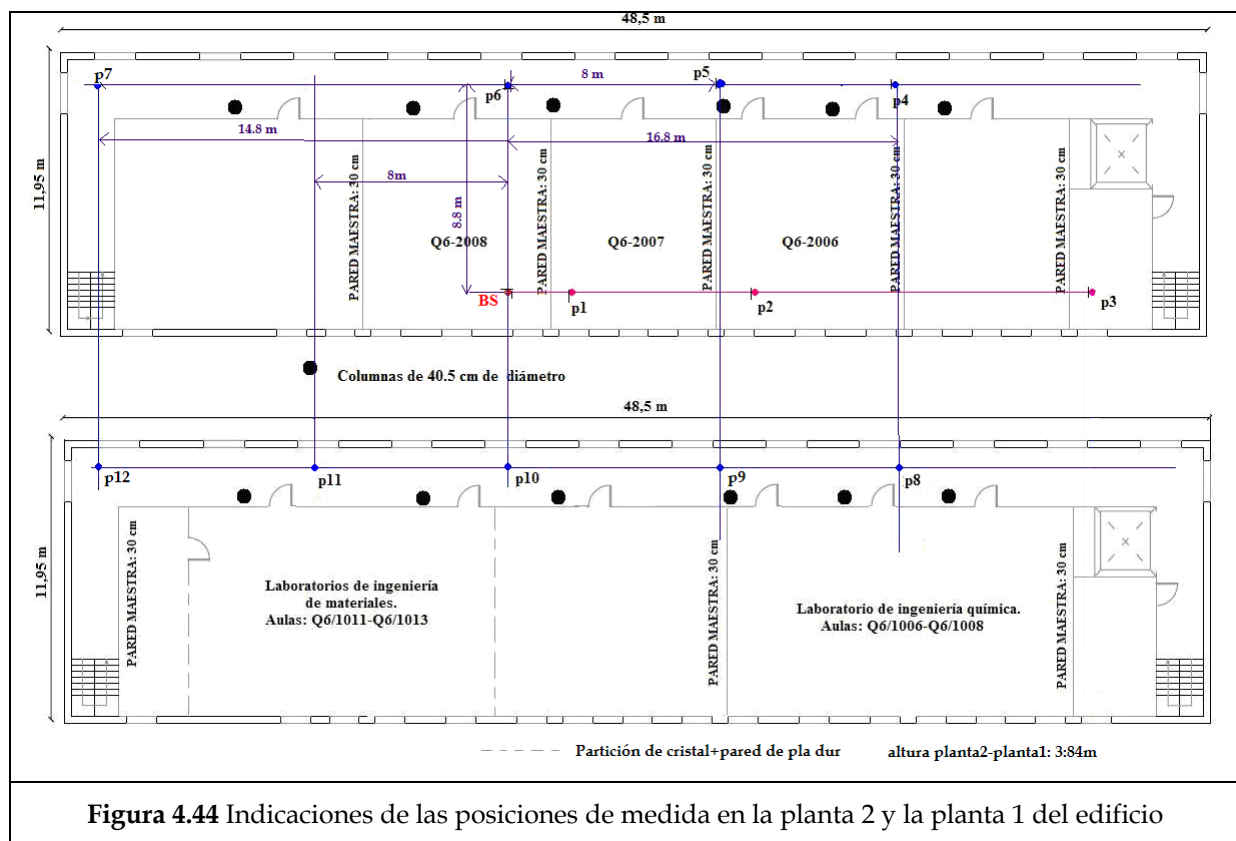
Distancia SS-BS	Pr (dBm) con el modelo 4.1	Pr (dBm) con modelo de exponente de <i>path loss</i> 5.59	Error entre modelos (dB)
<b>4.4m</b>	-28.06	-39.25	11.19
<b>10.4m</b>	-47.89	-60.13	12.24
<b>26.4m</b>	-81.3	-82.75	1.45

**Tabla 4.18** Comparativa y error absoluto entre los dos modelos de predicción

La tabla 4.18 muestra el error que se comete por el hecho de utilizar un modelo en el que no tiene en cuenta el número de obstáculos además de su atenuación y un modelo que sí lo tiene en cuenta. El modelo de interiores descrito en 4.13 se acerca más a las medidas obtenidas que el otro modelo simplificado de *path loss* para interiores. La explicación es porque el segundo modelo supone que existen obstáculos entre las antenas transmisora y

receptora pero sin embargo no los cuantifica; supone una distribución uniforme de obstáculos. De todas maneras no son valores exagerados.

Ahora que ya se conoce el modelo simplificado de *path loss* se procede a continuación el análisis en diferentes puntos de la planta 2 y la planta 1 del edificio Q6. La figura 4.44 muestra la indicación de los puntos de medida en la planta 2 y la planta 1. La posición de la BS indicada se corresponde con las medidas de la planta 2. Para las medidas en la planta 1 se ubica la BS 3.6 m más adelante en dirección a la posición 6. Para obtener las distancias entre la BS y el SS localizado en cada una de las indicadas posiciones se ha empleado trigonometría. Por otro lado, todas las medidas obtenidas han sido fruto de alinear las antenas y luego promediar en dBs los datos recibidos. Los resultados obtenidos que se muestran en la tabla 4.19 son aproximaciones al valor medio real, pero el objetivo no es que la predicción del modelo cuadre con lo que se mide sino que se aproxime como se ha comentado en la sección 4.3.1. Las posiciones p1, p2 y p3 no analizan porque ya se ha realizado anteriormente.



**Figura 4.44** Indicaciones de las posiciones de medida en la planta 2 y la planta 1 del edificio

Distancia SS-BS (m)	RSSI (dBm)		SNR (dB)		Modulación		Throughput Bruto (Mbps)		Potencia Transmisión (dBm)	
	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL
<u>Planta 2</u> Posición p1: 4.4m	-33	-73	34	26	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	18	-20
<u>Planta 2</u> Posición p2: 10.4m	-54	-73	35	30	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	18	-3
<u>Planta 2</u> Posición p3: 26.4m	-90	-78	15	25	QAM16 1/2	QAM64 3/4	5	11.25	18	22
<u>Planta 2</u> Posición p4: 18.97m	-57	-72	34	29	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	18	1
<u>Planta 2</u> Posición p5: 11.89m	-48	-72	35	30	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	18	-1
<u>Planta 2</u> Posición p6: 8.8m	-35	-72	35	29	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	18	-15
<u>Planta 2:</u> Posición p7: 17.22m	-50	-73	35	29	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	18	-2
<u>Planta 1</u> Posición p8: 17.25m	-76	-84	25	20	QAM64 3/4	QAM16 3/4	11.15	7.5	18	22
<u>Planta 1</u> Posición p9: 9.67m	-78	-72	25	30	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	18	20
<u>Planta 1</u> Posición p10: 6.46m	-59	-72	34	30	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	18	15
<u>Planta 1</u> Posición p11: 10.92m	-67	-72	30	30	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	18	11
<u>Planta 1</u> Posición p12: 16.88m	-74	-73	28	28	QAM64 3/4	QAM64 3/4	11.25	11.25	18	22

**Tabla 4.19** Resultados obtenidos con el terminal *Self-Install* en distintas posiciones de la planta 2 y la planta 1 del edificio Q6

Ahora que ya se tienen los datos sobre las potencias recibidas en *downlink*, entre otros parámetros se va a realizar una comparativa con el modelo de interiores que se recuerda de nuevo:

$$P_r(dBm) = 18 dBm + 14.5 dB + 9 dB - (44.78 + 18.3 * \log_{10}(d)) - \sum_{i=1}^{N_f} FAF_i - \sum_{i=1}^{N_p} PAF_i$$

A parte de las paredes como PAF, también existen otros obstáculos que afectan a la potencia recibida, de los cuales se ha tenido que obtener estudiar a *grosso modo* su atenuación mediante medidas en LOS y NLOS a la misma distancia como se muestra en la tabla 4.20.

		Bloque armario	Puerta
Grosor (cm)		71.5	4.5
Distancia tx-rx		3.6m	3.6m
Pr (dBm)	LOS	-22	-22
	NLOS	-33	-24.5
	L = Pr <sub>LOS</sub> - Pr <sub>NLOS</sub>	11 dB	2.5 dB

**Tabla 4.20** Análisis de la atenuación causada por otras particiones que separan el pasillo de la sala de la BS

Ahora que ya se tiene toda la información en cuanto a la atenuación añadida por diferentes particiones se procede a continuación al cálculo de las potencias recibidas en cada punto empleando el modelo y luego hacer una comparativa. Para saber el número de particiones que atraviesa la señal, se ha guiado con la figura 4.44.

#### Cálculo de las potencias recibidas en la planta 2

$$P_{r\_p4}(dBm, d = 18.97m) = 18 + 14.5 + 9 - (44.78 + 18.3 \cdot \log_{10}(18.97)) - 2 \cdot 13 - 2.5 = -55.17 dBm$$

$$P_{r\_p5}(dBm, d = 11.89m) = 18 + 14.5 + 9 - (44.78 + 18.3 \cdot \log_{10}(11.89)) - 13 - 11 = -46.96 dBm$$

$$P_{r\_p6}(dBm, d = 8.8m) = 18 + 14.5 + 9 - (44.78 + 18.3 \cdot \log_{10}(8.8)) - 11 = -31.56 dBm$$

$$P_{r\_p7}(dBm, d = 17.22m) = 18 + 14.5 + 9 - (44.78 + 18.3 \cdot \log_{10}(17.22)) - 13 - 11 = -49.9 dBm$$

#### Cálculo de las potencias recibidas en la planta 1

Con el FAF que se ha obtenido en su momento de 54.5 dB, si se emplea este valor entonces los resultados del modelo se alejan bastante de los datos empíricos. Es por esta razón que se ha vuelto a medir de nuevo el FAF a 6.46 m en LOS, distancia correspondiente a la posición 10. El nivel de potencia a esta distancia es de -12 dBm con lo que conlleva a un nuevo FAF = 47 dB, a *grosso modo*. Con este FAF se procede con el cálculo de las potencias recibidas en la planta 1:

$$P_{r\_p8} (dBm, d = 17.25m) = 18 + 14.5 + 9 - (44.78 + 18.3 \cdot \log 10(17.25)) - 47 - 13 = -85.91 dBm$$

$$P_{r\_p9} (dBm, d = 9.67m) = 18 + 14.5 + 9 - (44.78 + 18.3 \cdot \log 10(9.67)) - 47 - 13 = -81.31 dBm$$

$$P_{r\_p10} (dBm, d = 6.46m) = 18 + 14.5 + 9 - (44.78 + 18.3 \cdot \log 10(6.46)) - 47 = -65 dBm$$

$$P_{r\_p11} (dBm, d = 10.92m) = 18 + 14.5 + 9 - (44.78 + 18.3 \cdot \log 10(10.92)) - 47 = -69.28 dBm$$

$$P_{r\_p12} (dBm, d = 16.88m) = 18 + 14.5 + 9 - (44.78 + 18.3 \cdot \log 10(16.88)) - 47 = -72.74 dBm$$

La tabla 4.21 muestra una comparativa entre las potencias medidas experimentalmente y las que se obtienen por el modelo, así como el error existente. Las casillas sin número es porque no se ha considerado aquél PAF en el modelo.

Distancia SS-BS (m)	1. Pr_empírico (dBm)	PAF_puertas (dB)	PAF_armarios (dB)	PAF_paredes (dB)	FAF (dB)	2. Pr_oldsmith (dBm)	Abs(1-2) (dB)
<u>Planta 2</u> Posición p4: 18.97m	-57	2*2.5	-	2*13	-	-55.17	1.83
<u>Planta 2</u> Posición p5: 11.89m	-48	-	11	13	-	-46.96	1.04
<u>Planta 2</u> Posición p6: 8.8m	-35	-	11	-	-	-31.56	3.44
<u>Planta 2:</u> Posición p7: 17.22m	-50	-	11	13	-	-49.9	1.9
<u>Planta 1</u> Posición p8: 17.25m	-76	-	-	13	47	-85.91	9.91
<u>Planta 1</u> Posición p9: 9.67m	-78	-	-	13	47	-81.31	3.31
<u>Planta 1</u> Posición p10: 6.46m	-59	-	-	-	47	-65	6
<u>Planta 1</u> Posición p11: 10.92m	-67	-	-	-	47	-69.28	2.28
<u>Planta 1</u> Posición p12: 16.88m	-74	-	-	-	47	-72.74	1.26

**Tabla 4.21** Resultados de campo obtenidos en cada una de las posiciones de la figura 4.44.

El error que se obtiene en la tabla 4.21 no es muy exagerado. Es normal tener errores menores de 10 dB cuando se realizan aproximaciones de este tipo. Por otro lugar no es fácil saber exactamente el número de obstáculos y su atenuación que causa a la onda

electromagnética durante su propagación por el canal inalámbrico. Por ejemplo si que es cierto que el conjunto paredes/entresuelos que aparecen entre BS y SS afectan por igual a toda la onda electromagnética.

Aquí acaba el capítulo 4 correspondiente a una campaña de medidas llevado a cabo en diferentes tipos de escenarios.

## 5 DEMOSTRACIÓN DEL PROYECTO INTERRURAL

Este proyecto experimental basado en el estudio de la tecnología WiMAX 802.16-2004 ha formado parte de un proyecto PROFIT de dos fases aprobado por el MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO con referencia FIT-330210-2007-57 llamado InterRural. En dicho proyecto han participado varias empresas (Hispasat, Telefónica I+D, Iber-X, Giga) y también la misma Universitat Autònoma de Barcelona (UAB). El principal objetivo del proyecto InterRural es proponer y testear alternativas a ADSL para dar acceso a Internet a zonas rurales. La primera fase del proyecto InterRural que se demuestra en este capítulo trata de comparar dos alternativas de tecnologías radio competitivas, ambas integradas con satélite: WiMAX y la variante de WiFi a 5 GHz conocida también por su estándar IEEE 802.11a. La variante 802.11a WiFi permite realizar radioenlaces con visión directa y ofrecer coberturas no superiores a 1-1.5 Km con el uso de antenas muy directivas. Se demuestra en la sección 5.4 que WiFi supera a WiMAX en cuanto a *throughput* solo en canales LOS ya que en canales NLOS la tecnología no es capaz de operar debida a su elevada frecuencia de operación.

La duración de la primera fase del proyecto InterRural ha sido de 6 meses, desde octubre 2007 - marzo 2008, ambos incluidos.

### 5.1 Estado de arte

Antes de continuar con el estudio del proyecto InterRural se da a conocer en esta sección por otras entidades que la integración WiMAX-Satélite u otras tecnologías se han desplegado en ciertos lugares. Los artículos se muestran en la sección de referencias.

Empezando con el artículo de [Zot07] se explota una arquitectura de red en la que combinan la micro estación base WiMAX Alvarion BreezeMAX del proyecto con un radioenlace WiFi para ofrecer servicios a Internet vía satélite a un conjunto formado por una

PDA, un ordenador portátil, un PC de escritorio y un teléfono IP. Los servicios multimedia que se ofrecen a los clientes WiFi son: VoIP, Televisión por IP (mediante protocolo H.264), y servicios http.

El artículo de [Cor05] presenta un análisis de las diferentes posibilidades de conexión para la comunicación de voz y datos que se puede implementar en las zonas rurales de la costa ecuatoriana. El artículo se divide en 2 partes. En la primera parte se evalúa las posibles soluciones de Sistemas de Comunicaciones Inalámbricas (SCI) realizando un concienzudo análisis sobre las tecnologías WiFi<sup>71</sup>, y WiMAX. Además, se ha propuesto una arquitectura analizando los requerimientos de la misma y posibles variantes con sus ventajas y desventajas. Según [Cor05] algunas demostraciones sobre WiMAX se han realizado en California, US, y también en Reino Unido, con resultados muy favorables y otras redes de prueba/comerciales están siendo instaladas

El artículo de [Owe06] explica las diferentes tecnologías involucradas para ofrecer básicamente servicios de voz en comunidades locales de zonas rurales a través de una red IP conectada a Internet vía satélite. El proyecto del artículo ha sido desarrollado en Mongolia y Vietnam ejecutado por el organismo LMI (*USAID's Last Mile Initiative*). La nueva combinación de la red IP entregada a la comunidad mediante satélites de bajo coste, servicios VoIP ofrecidos a través de tecnologías de conmutación por soft sobre la red, en combinación con su distribución *wireless* a través de WiMAX y/o WiFi, y los teléfonos VoWiFi que están surgiendo, proporciona en la primera vez una nueva era de telecomunicaciones avanzadas en las zonas rurales.

[Ret06] desarrolló un artículo en el que comenta los desafíos y las aplicaciones de *Wireless IPTV*<sup>72</sup> sobre WiMAX. IPTV es crucial para aquellas áreas con escasos recursos para obtener servicios con elevada calidad como la televisión. IPTV es una de las alternativas viables que utilizan las operadoras para la entrega de televisión al usuario final, sin embargo, en áreas con dificultad de acceso por cable a la red de la operadora como es el caso de las zonas rurales, ofrecer IPTV podría llegar a ser caro. Por este motivo se utiliza WiMAX como alternativa de transporte de IPTV debido a que puede ofrecer diferentes calidades de servicio, diferentes anchos de banda, elevadas tasas de transmisión, robustez frente canales NLOS y elevadas distancias con la estación base en bandas de frecuencia licenciadas y exentas de licencia.

---

<sup>71</sup> *Wireless Fidelity*

<sup>72</sup> *Internet Protocol-Television*

Además de los artículos mencionados también existen noticias de prensa que informan la situación de WiMAX en España o en el resto del mundo. La noticia [Not2] afirma que han existido infraestructuras WiMAX de Alvarion a zonas de Tarragona o la Valle de Aran por medio del operador IberBanda. Alvarion también trabaja suministrando equipos a Telefónica.

Mobile WiMAX ya está en funcionamiento en Korea [Not3] y se conoce como WiBro. El servicio comercial WiBro se lanzó en junio del 2006 y la tarifa ronda los 35 euros. El 10 de febrero de 2006 Telecom Italia, la telefonía dominante e *Internet Service Provider* en Italia, junto con *Samsung Electronics* de coreana, demostraron al público un servicio de red de WiBro durante los juegos olímpicos de invierno del 2006, llevados a cabo en Turín, con una velocidad de bajada de 10 Mbit/s y una de subida de algunos centenares de kbit/s incluso en movimiento hasta 115 Kmp/h. En el mismo acontecimiento aseguraron un futuro de 20-30 Mbit/s para el final de este año (2006) y 100+ Mbit/s de bajada / 1+ Mbit/s de subida en 2008.

Carlos Martínez García, *Spain Channel Manager* de Alvarion anuncia en el artículo [Not4] que se han llevado a cabo varios proyectos en Ayuntamientos de Cataluña donde sobre una red de transporte WiMAX de Alvarion, se han desplegado múltiples servicios para el municipio como gestión de cámaras de tráfico, comunicaciones VoIP y datos de la red municipal, así como interconexión de servicios municipales de Internet para la ciudadanía.

Raymond Forado Bechimol informa en [Not5] que desde Alvarion actualmente ya tienen desplegada –en cerca de 150 países incluyendo a España- redes WiMAX de banda ancha entre otros clientes y operadores como Iberbanda, Euskatel en el País Vasco, así como los proyectos de extensión de banda ancha en Cataluña, y el más extenso de todos en Castilla y León. En este último, a principios del 2006, se desplegó una red WiMAX de Alvarion por parte del operador Iberbanda y en abril del 2007 ya existían cientos de estaciones base y miles de unidades de cliente dando servicios de banda ancha de alta velocidad tanto de voz como de datos, tanto para hogares como para empresas y PYMES.

En Cádiz también se comercializa WiMAX tanto para voz, datos y televisión [Not6]. Se ha implantado conexiones WiMAX de forma comercial en la ciudad de Sevilla por el operador Instanet (*Clearwire*). El operador de telecomunicaciones Marín Telecom de Andalucía ofrece a través de su red WiMAX aeromax con una superficie de cobertura actual de 2000 km<sup>2</sup> varias modalidades de banda estrecha hasta banda ancha de hasta 34 Mbps y también línea de voz/fax a través del mismo sistema en el Vinalopó Mitjà, Baix Vinalopó y Vega Baja. Actualmente en Murcia, concretamente en Bullas también se ha instalado un

operador de WiMAX que ofrece datos en banda ancha, pero no funciona correctamente. En la localidad valenciana de Ontinyent, “OSF Xarxa de Telecomunicacions” ofrece WIMAX de hasta 1 Mbps simétrico, garantizado al 100%. Por otro lugar la empresa “Neomedia” ha realizado los proyectos con infraestructura WiMAX sobre banda de uso común que más tráfico están soportando; el Ayuntamiento de Alcorcón dispone de una red WiMAX formada por más de 70 radioenlaces con soporte a más de 100 cámaras, agregando un total aproximado de 1,5 Gbps en la banda de 5 GHz. Otro gran mercado de actuación de estas infraestructuras WiMAX es el de *backhaul* de infraestructuras *Mesh*. De la misma manera, Neomedia ha desplegado un *backhaul* WiMAX que da soporte a la Red inalámbrica *Mesh* del Ayuntamiento de Barcelona, iniciada en la zona de 22@ y en María Cristina. Además, Lleida se ha convertido en una de las zonas WiMAX de España mejor cubiertas, gracias a la intervención de NXT-Telecom, operador catalán, que dota de cobertura a más de 500 poblaciones. Cuenta con infraestructura propia de repetidores, con total independencia de operadoras como Telefónica.

En varios países de América Latina WiMAX ya se ha implementado, tanto experimental como comercialmente [Not6]. En la India ya se ha desarrollado WiMAX con un total de 250 millones de usuarios conectados [Not7] y con una cobertura a un total de 400 ciudades ofreciendo un ancho de banda de 1.5 Mbps.

Las noticias de Ibersystems [Not8] publican que Alvarion, uno de los principales fabricantes de soluciones de banda ancha inalámbrica, de diseño y despliegue de soluciones WiMAX, ha anunciado la disponibilidad de su nuevo sistema BreezeMAX, diseñado para abarcar 802.16e, cuya misión es responder la cada vez mayor demanda de soluciones basadas en la última versión del estándar WiMAX. Actualmente está en funcionamiento en diferentes países del planeta como en Angola, Costa Rica, El Salvador, Francia, Guatemala, Japón, México, Noruega, Rumanía, EE.UU. y España.

El objetivo del proyecto InterRural trata de una comparativa experimental de la calidad que ofrecen los radioenlaces WiFi/WiMAX a aplicaciones multimedia como por ejemplo VoIP (llamadas IP y videoconferencia) a través de satélite pero en lugares parecidos a zonas rurales alrededor de un campus universitario y en dos tipos de entornos: LOS y NLOS. Los artículos de [Owe06] y [Cor05] están basados con la misma idea del proyecto InterRural y en cambio el artículo [Ret06] estudia la viabilidad de televisión por IP a través de WiMAX, que no ha sido contemplado por el proyecto InterRural.

Por otro lugar, en el servicio de videoconferencia testeado en el proyecto InterRural participaron tres usuarios conectados a Internet a través de distintas tecnologías: el primer

usuario conectado a Internet por medio de una LAN, el segundo mediante WiFi-Satélite y el tercero mediante WiMAX-Satélite. Los dos últimos simulaban un usuario que podría estar en una zona rural mientras que el primero podría estar localizado en cualquier otra parte del mundo. Con esta videoconferencia a tres se pudo comprobar que el retardo de la voz y el vídeo tanto para WiMAX como para WiFi era despreciable, incluso en canales NLOS WiMAX era capaz ofrecer buenas prestaciones. No obstante no se realizaron videoconferencias con más de un usuario conectados a la BS WiMAX para estudiar el efecto.

## 5.2 Descripción del demostrador

El demostrador implementa una red PMP<sup>73</sup> de bajo coste para el acceso por banda ancha en entornos rurales, en la que se integran diversas tecnologías terrestres por satélite. El acceso vía satélite mediante la tecnología DVB-S suele ser más rentable en aquellos lugares en los que no resulta interesante para los proveedores de servicios Internet desplegar redes terrestres, tanto de radio como de cable, para pocos usuarios.

La tecnología vía satélite tiene como objetivo hacer llegar la señal hasta zonas remotas de difícil acceso. El esquema del demostrador se muestra en la figura 5.1.

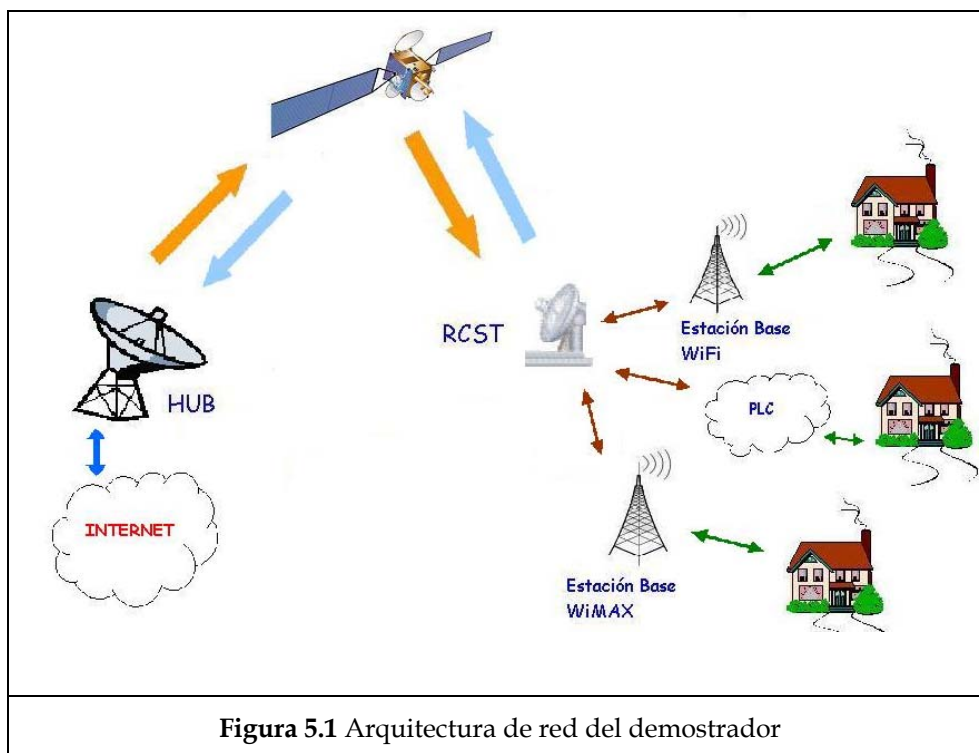


Figura 5.1 Arquitectura de red del demostrador

<sup>73</sup> Point-to-Multipoint

La topología de red elegida consta de un nodo central o HUB, que actúa de puente entre los enlaces satélite y terrestre permitiendo conectar la red de Internet con cada uno de los bucles de acceso local o de última milla (*last mile*). Por otro lado existe el terminal RCST (*Return Channel Satellite Terminal*) cuya función es conectar al satélite las estaciones base WiFi y WiMAX y realizar la adaptación de los protocolos participantes en la red. Los elevados costes de implementar dicha red de manera cableada hacen necesaria la definición de los escenarios en los que se combina la tecnología satélite con algunas tecnologías de acceso inalámbricas o WLL<sup>74</sup> o de acceso por la red eléctrica (PLC, *Power Line Connection*) o una combinación de todas ellas. Las tecnologías de acceso inalámbricas son eficaces cuando existen gran número de usuarios que se conectan a la estación base ya que los elevados anchos de banda que estas tecnologías ofrecen permiten compartir el mismo bucle local radio a un elevado número de usuarios (ej: mayor de 400 usuarios), es decir, el ancho de banda del sistema es compartido para todos los usuarios que se conectan a la estación base (20 MHz de ancho de banda para la tecnología WiFi y 3.5 MHz para la tecnología WiMAX 802.16-2004).

## 5.3 Arquitecturas

### 5.3.1 Arquitectura satélite

La arquitectura de satélite de Hispasat que forma parte del demostrador utiliza la plataforma transparente RCS para la transmisión de datos. La topología de una red de satélite es de tipo estrella donde el nodo central es el HUB y los puntos de acceso adyacentes son los satélites. La figura 5.2 muestra la arquitectura de red satélite y a continuación se describen los terminales que intervienen en la interconexión entre el canal de satélite y el canal terrestre.

---

<sup>74</sup> *Wireless Local Loop*

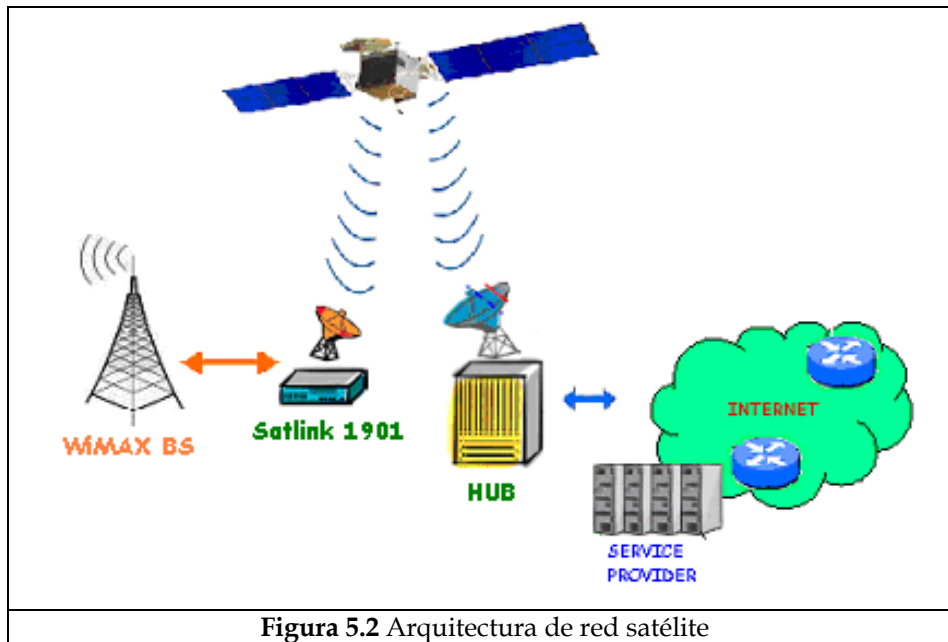


Figura 5.2 Arquitectura de red satélite

### Estación HUB “Nera” de Hispasat

La estación HUB “Nera” se encarga de ofrecer el ancho de banda necesario de subida/de bajada a todos aquellos satélites que se conectan a Internet u a otras redes a través del satélite. Este equipo se compone de los siguientes componentes: antena, equipamiento de RF, *gateway* e interfaces terrestres con las redes necesarias que proporcionen servicios de banda ancha. La conectividad entre el HUB y los puntos de acceso satelital se basa en los estándares DVB-S en el sentido *forward* (desde el HUB a los satélites) y DVB-RCS en el sentido *return* (desde los satélites a los terminales RCST).

La banda de frecuencias utilizada es la banda Ku, transmitiéndose entre 14 y 14.5 GHz desde el HUB al satélite, y entre 12.25 y 12.75 GHz desde el satélite al HUB.

### Terminal de satélite SatLink de Hispasat

Los terminales de satélite “SatLink” son los puntos de acceso del satélite y son los responsables de la interconexión con las redes de acceso del sistema. Están compuestos por dos unidades:

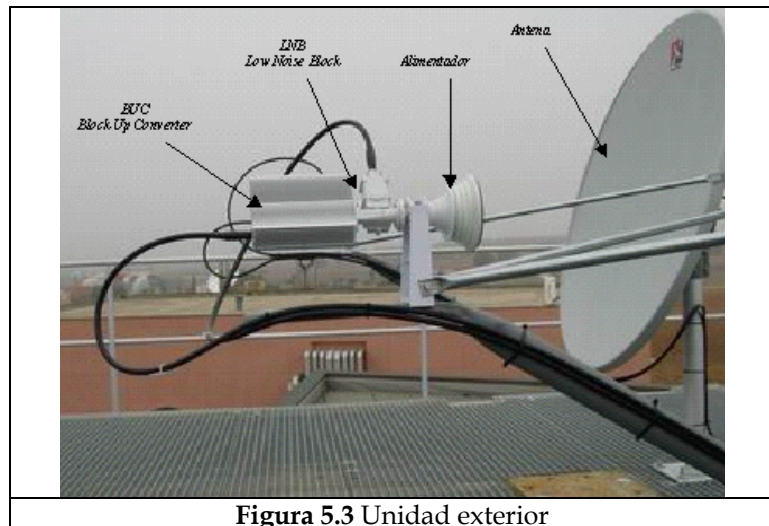
- ODU: unidad exterior (VSAT)
- IDU: unidad interior *Nera SatLink*

La unidad exterior se compone por los siguientes elementos:

- antena de 96 cm. de diámetro, con sus elementos de sujeción.

- alimentador
- LNB (*Low Noise Block*)
- BUC (*Block Up Converter*)
- cableado RF en banda L.

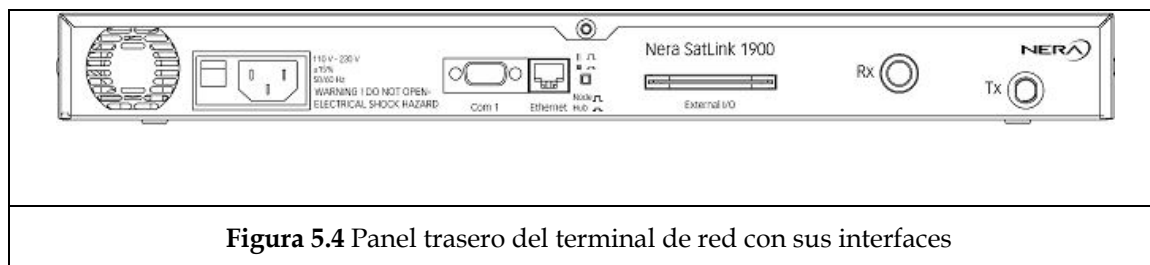
La figura 5.3 muestra un ejemplo de unidad exterior.



**Figura 5.3** Unidad exterior

La unidad interior se llama “*Nera SatLink*”. Las interfaces que dispone y que se muestran en la figura 5.4 son:

- Interfaz DVB-RCS para la conectividad con el satélite a través de la unidad exterior. La conexión entre dicha interfaz y la unidad ODU se realiza mediante un cable en banda L.
- Interfaz *Ethernet* para la conectividad con las estaciones base WiMAX y WiFi.



**Figura 5.4** Panel trasero del terminal de red con sus interfaces

La tabla 5.1 describe cada uno de los componentes del panel trasero del terminal.

Elemento	Descripción
Interruptor On/Off	Interruptor de alimentación. On (I) o Off (O).
Conector de alimentación	Enchufe estándar para cables de alimentación.
Conector COM1	Conector de 9 pines para conectar la interfaz de comandos de consola (CLI) a una interfaz serie RS-232 de ordenador.

Conector <i>Ethernet</i>	Conector RJ-45 para tráfico IP hacia/desde un PC, <i>switch Ethernet</i> , <i>router IP</i> etc. Los modos 10BASE-T o 100BASE-T se detectan automáticamente.
Pulsador <i>Node/Hub</i>	Selecciona la configuración HUB o NODE (nodo) en el puerto <i>Ethernet</i> . El modo HUB se selecciona normalmente cuando se conecta el terminal a un <i>switch Ethernet</i> o a un <i>Hub Ethernet</i> , mientras que el modo NODE se usa al conectarse directamente a un solo PC (en vez de poner un cable cruzado).
External I/O	No usado.
Coaxial Rx	Jack coaxial de 75 $\Omega$ con conector tipo F para el cable de recepción de la ODU.
Coaxial Tx	Jack coaxial de 75 $\Omega$ con conector tipo F para el cable de transmisión de la ODU.

**Tabla 5.1** Elementos de conexión del panel trasero.

La figura 5.5 muestra el terminal RCST empleado en el proyecto InterRural y sus características en la tabla 5.2.



**Figura 5.5** Terminal de satélite “Nera Satlink 1901”

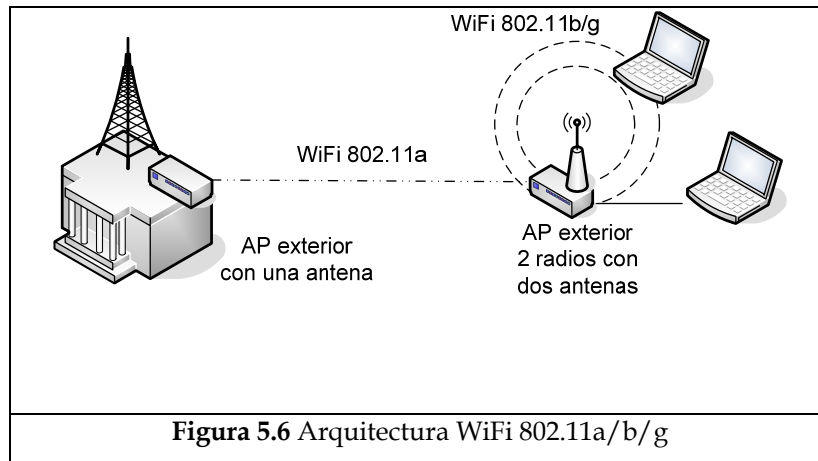
<b>Throughput máximo</b>	
IP (después del filtro de MAC)	4 Mbps
MPEG2 (después de filtro PID)	10 Mbps
MPEG2 (antes de filtro PID)	45 Mbps
<b>Forward Link</b>	
Número de receptores del enlace de bajada	1
Tasa de símbolos	2-45 Msbs
Modulación	QPSK
FEC ( <i>Forward Error Correction</i> )	Reed-Solomon/Convolucional
<b>Return Link</b>	
Tasa de símbolos	128 Ksbs-3 Msbs
Modulación	QPSK
FEC	Turbo y Reed-Solomon/Convolucional
<i>Frequency hopping</i>	Sí (saltos lentos)
Formato de tráfico de <i>bursts</i>	ATM y MPEG
Formato de los mensajes MAC	Prefijo, DULM, SYNC, Contención basado en SYNC

Tipos de petición de capacidad	CRA, RBDC, VBDC, FCA
<b>Interfaz ODU</b>	
Número de cables	2
Tipos de conector TX, RX	tipo-F, 75 $\Omega$
Señales sobre el cable de TX	Datos, referencia de reloj, 24 VDC, canal de control
Señales sobre el cable de TX	Datos, 13/18 DC, canal de control
Rango de frecuencia a la salida del TX	950-1460 MHz
Niveles de señal a la salida del TX	-40 dBm hasta +10 dBm
Ruido de fase en TX	De acuerdo con las pautas del estándar DVB-RCS
Niveles de señal a la entrada del RX	-65dBm hasta -25 dBm
Rango de frecuencia a la entrada del RX	950-2150 MHz
Canal de control en TX	DiSEqC extendido usando 22 KHz PWK (de acuerdo con las pautas del estándar DVB-RCS)
Canal de control en RX	13/18 V y señalización 0/22KHz
Tensión de alimentación TX	24V, 1.2A máx. Protección a corto circuito
Tensión de alimentación RX	13/18V, 500mA máx. Protección a corto circuito
<b>Características físicas y ambientales</b>	
Tensión de alimentación	110-240 VAC, 50-60Hz
Temperatura de operación	desde 0°C hasta +40°C
Temperatura de almacenamiento	desde -20°C hasta +85°C
Humedad	20% hasta 90%, no-condensación

**Tabla 5.2** Especificaciones del terminal *Nera SatLink*

### 5.3.2 Arquitectura WiFi

El estándar 802.11a de WiFi se ha desarrollado en el proyecto InterRural para un estudio comparativo con WiMAX en los diferentes escenarios descritos en el punto 5.4. Este estándar de WiFi permite realizar radioenlaces punto a punto de 54 Mbps de *throughput* en condiciones con visibilidad directa y coberturas entre 1-1.5 Km. En el extremo del enlace inalámbrico implementado con 802.11a y cercano al usuario final, se realiza la conversión a 802.11b/g para permitir la compatibilidad con los equipos de usuario y para una mayor flexibilidad en la arquitectura que se muestra en la figura 5.6.



El punto de acceso 802.11a se localiza en el edificio principal, dispone de una antena sectorial de 90° de ancho de haz, 17 dBi de ganancia y opera en la banda de 5.4 – 5.7 GHz.

En el otro extremo del radioenlace, se utiliza un punto de acceso con dos unidades radio (802.11a, y 802.11b/g) y dos antenas. Una de las antenas se utiliza para el radioenlace punto a punto y se trata de una antena de panel direccional de 19 dBi en la banda de 5.4-5.7 GHz. La otra antena es una omnidireccional de 8 dBi en la banda de 2.4 GHz usada para proporcionar acceso WiFi 802.11b/g. Las figuras 5.8-5.10 muestran las distintas antenas que se pueden emplear en la arquitectura de la figura 5.6.

Los equipos WiFi utilizados son de la marca Orinoco y el modelo es el AP4000R. Las principales características que definen a este dispositivo son:

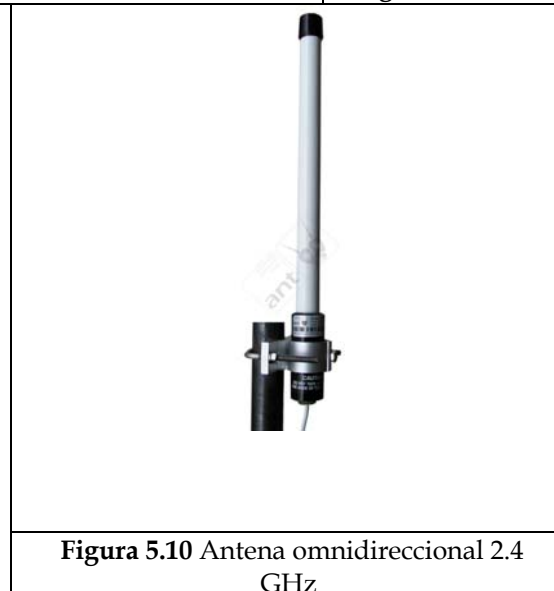
- Instalación en exteriores, resistente a inclemencias del tiempo.
- Soporte para dos unidades radio WiFi en bandas distintas: 802.11a y 802.11b/g
- Alimentación por cable *Ethernet* RJ-45.
- 4 conectores para antenas externas.

La figura 5.7 muestra uno de los puntos de acceso WiFi empleados en el demostrador y la tabla 5.3 las especificaciones técnicas.



Ítem	Descripción
Radio	Punto de Acceso con doble unidades radio: 802.11a + 802.11b/g
<i>Throughput</i>	802.11b : 1, 2, 5.5 y 11 Mbps
	802.11g: 1, 2, 5.5, 6, 9, 11, 12, 18, 24, 36, 48 y 54 Mbps
	802.11a: 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 y 54 Mbps
Estándares de red	IEEE 802.11a
	IEEE 802.11b o IEEE 802.11g
<i>Uplink</i>	<i>Autosensing 802.3 10/100BASE-T Ethernet</i>
Bandas frecuenciales	802.11b/g: 2.412 -2.462 GHz
	802.11a: 5.15- 5.825 GHz
Arquitectura de red	Infraestructura
Multiplexación	802.11b: DSSS
	802.11g :OFDM
	802.11a: OFDM
Protocolo de acceso al medio	CSMA/CA
Modulación	OFDM BPSK @ 6 y 9 Mbps
	QPSK @ 12 y 18 Mbps
	16-QAM @ 24 y 36 Mbps
	64-QAM @ 48 y 54 Mbps
	DSSS DBPSK @ 1 Mbps
	DQPSK @ 2 Mbps
	CCK @ 5.5 y 11 Mbps
Autenticación	Soporte para 802.1X incluyendo los métodos PEAP, EAP-TLS, EAP-TTLS EAP-SIM, y otros métodos EAP que conforman el RFC 3748 para ofrecer autenticación mutua y llaves de encriptación dinámicas por sesión y por usuario. Direcciones MAC basadas con el protocolo RADIUS. Listas de control de acceso por MAC
Encriptación	Soporte 802.11i para llaves CCMP/AES de 128 bits (WPA2) Mejoras de la encriptación TKIP (para WEP) con signature de llaves (llaves por paquetes) y rotación <i>broadcast</i> de llaves (WPA). Soporte WEP con llaves de 64 y 128 bits.
Autenticación de mensajes	Autenticación de mensajes encriptados mediante 802.11i AES con llaves de 128 bits. Verificación de la Integridad de Mensajes mediante TKIP con llaves de 128 bits.
Tension de alimentación	802.3af ( <i>Power over Ethernet</i> ) y AC power

**Tabla 5.3** Especificaciones técnicas del punto de acceso Orinoco AP4000R

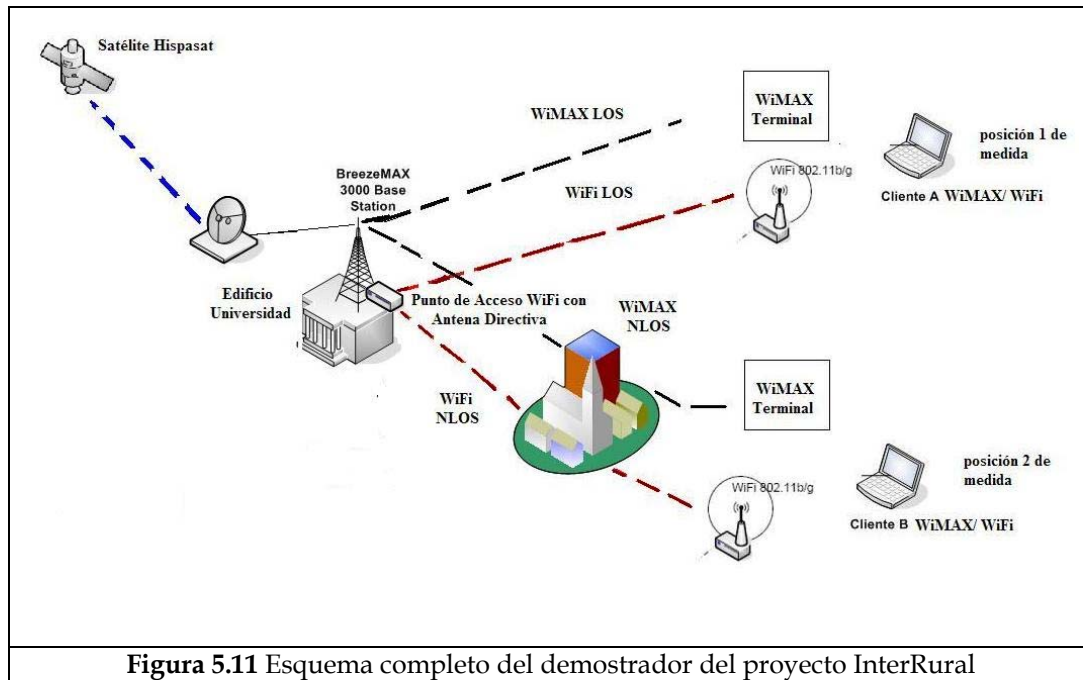


### 5.3.3 Arquitectura WiMAX

La arquitectura WiMAX empleada en el proyecto PROFIT se explica en el capítulo 3.

## 5.4 Descripción del escenario

El esquema del demostrador completo de la figura 5.11 muestra los diferentes escenarios con WiMAX y WiFi que se han llevado a cabo en la primera fase del proyecto.



Como se puede observar el demostrador es una comparativa entre WiMAX y WiFi 802.11a en dos posibles escenarios: LOS y NLOS. Los servicios utilizados en el demostrador son:

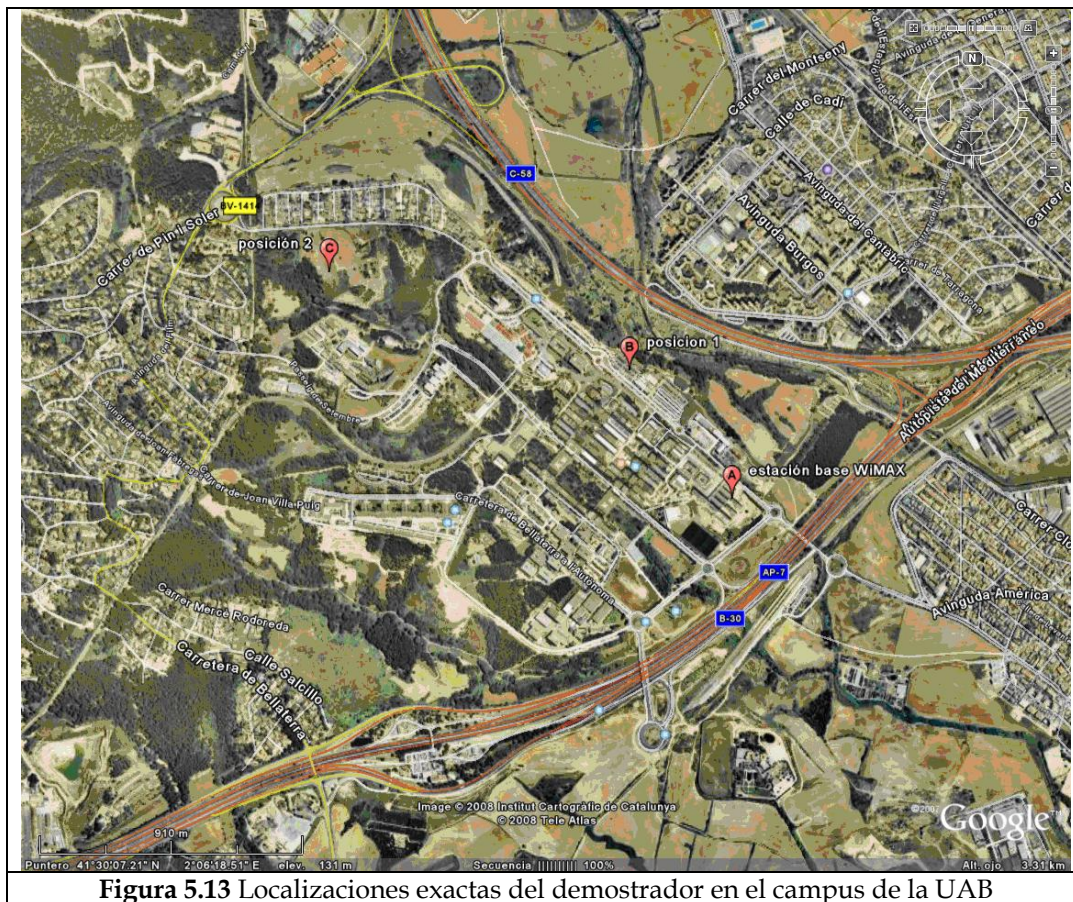
- Videoconferencia con la aplicación ooVoo.
- VoIP sobre WiMAX con un teléfono analógico.

Ambos servicios utilizan el acceso a Internet vía satélite para la comunicación *peer-to-peer*.

La figura 5.12 muestra la antena WiMAX omnidireccional instalada en el edificio universidad que se representa en el esquema completo de la figura 5.11.



La demostración que se realizó el día 28 de febrero de 2008 delante de la coordinadora del proyecto PROFIT InterRural del MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO, se basó en una comparativa entre las soluciones de banda ancha WiFi 802.11a y WiMAX 802.16-2004 en dos posiciones que se indican sobre el mapa de la figura 5.13. En la posición 1 se tiene visibilidad directa y en la posición 2 la visibilidad con las estaciones base WiMAX/WiFi se reduce debido a los obstáculos, la mayoría árboles, siendo un caso típico de un ambiente rural en el que aparecen prados, árboles y montañas. Las coordenadas de las posiciones indicadas así como su altura respecto el nivel del mar y la distancia a la estación base WiMAX/WiFi localizada en el edificio principal indicada como “A” se encuentran en la tabla 5.4



Posiciones de medida	Coordenadas UTF	Altura (m)	Distancia a la BS	Escenario
Estación base (A)	41.500068,2.11298	140	-	-
Posición 1 (B)	41.504142,2.10871	147	570 m	LOS
Posición 2 (C)	41.508626,2.09517	155	1.75 Km	NLOS

**Tabla 5.4** Coordenadas y otras indicaciones de los puntos de interés mostrados en el mapa de la figura 5.13

## 5.5 Medidas obtenidas

En esta sección se describen los resultados obtenidos en el demostrador para los sistemas Satélite, WiMAX y WiFi. Los resultados WiMAX son los que se han obtenido en las posiciones 1 y 2 mientras que los resultados de WiFi son los obtenidos en la posición 1. Se demuestra que WiFi 802.11a ofrece mayor *throughput* que el estándar WiMAX utilizado en el proyecto en entornos con visibilidad directa (posición 1) con la antena transmisora. Para entornos sin visibilidad directa (posición 2) entonces WiMAX supera en cuanto a *throughput* el estándar de WiFi IEEE 802.11a.

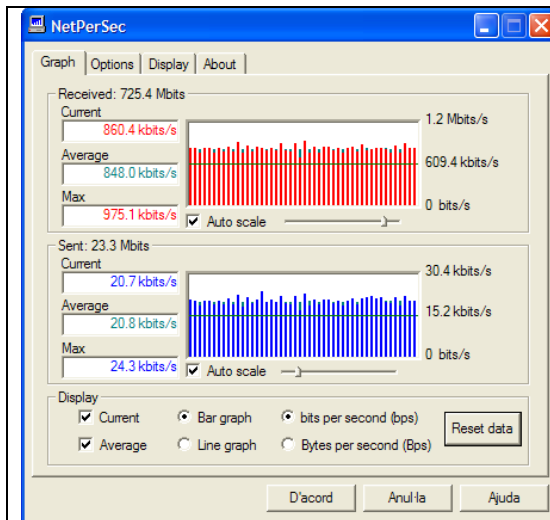
### 5.5.1 Medidas del enlace vía satélite

Para poder ofrecer un enlace vía satélite con Hispasat se orientó la antena de la unidad exterior o ODU al satélite de Hispasat 1D (30° oeste). Posteriormente se realizó la configuración del terminal RCST con los parámetros de red establecidos por Hispasat además de fijar la potencia de señal óptima de transmisión. La figura 5.14 muestra información referente a la configuración de red establecida en el terminal IDU *Nera SatLink*.

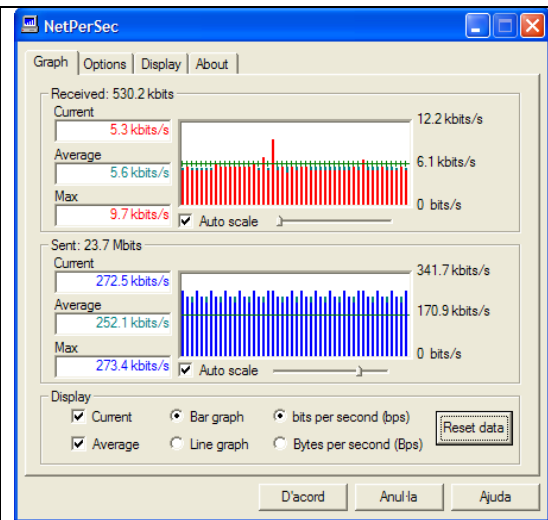
Identificación del terminal			
Nombre	SBA-INTERRURAL-01	MAC add.	00:60:C0:2F:AD:48
Configuración IP			
Ip DVB	192.168.255.54	Máscara	255.255.255.0
Ip Red Eth.	192.168.26.80	Máscara	255.255.255.240
Ip ethernet	192.168.26.81	Máscara	255.255.255.240
Ip NAT		Máscara	

**Figura 5.14** Configuración del terminal de satélite

El enlace de satélite durante el demostrador presentaba los siguientes parámetros de canal:  $E_b/N_o = 8$  dB y SNR: 12.7 dB. Una vez el enlace de satélite entró en operación se realizaron medidas de tráfico IP con el programa “*NetPerSec*” para verificar el ancho de banda acordado por Hispasat en los enlaces *forward/return*. Los resultados o medidas sobre las velocidades de los enlaces *forward* y *return* presentados en las figuras 5.15 y 5.16 presentan unos valores de 850 Kbps y 252 Kbps respectivamente.



**Figura 5.15** Enlace descendente (*forward*)  
(aproximadamente 1Mbps)



**Figura 5.16** Enlace ascendente (*return*)  
(aproximadamente 256Kbps)

### 5.5.2 Medidas WiMAX

La tabla 5.5 muestra los resultados obtenidos del radioenlace WiMAX en las posiciones 1 y 2 del mapa de la figura 5.13.

	Posición 1	Posición 2
<b>Potencia de Tx (dBm)</b>	20	20
<b>SNR recibida (dB)</b>	34	28
<b>Wireless Data Rate (Mbps)</b>	12	12
<b>TCP Throughput (Mbps)</b>	4.36	4.31

**Tabla 5.5** Parámetros del radio enlace WiMAX obtenidos en la posición 1 del mapa de la figura 5.13 empleando el terminal de usuario *outdoor* PRO-DMe-SA

### 5.5.3 Medidas WiFi

Los resultados obtenidos por la tecnología WiFi 802.11a en la posición 1 se muestran en la tabla siguiente. En la posición 2 del mapa de la figura 5.13 no se recibe señal WiFi 802.11a debido a que este estándar requiere visibilidad directa con el punto de acceso WiFi al funcionar a una frecuencia superior a la de WiMAX.

En la tabla 5.6 también aparecen los parámetros físicos del estándar WiFi 802.11g utilizado en el extremo del enlace WiFi 802.11a más cercano al usuario final actuando como una red WLAN tal y como se muestra en el esquema del demostrador completo de la figura 5.11 o en el esquema de la arquitectura WiFi de la figura 5.6.

	WiFi 802.11a	WiFi 802.11g
<b>Potencia de Tx (dBm)</b>	17	17
<b>SNR recibida (dB)</b>	18	22
<b>Wireless Data Rate (Mbps)</b>	48	54
<b>TCP Throughput (Mbps)</b>	17	20

**Tabla 5.6** Parámetros del radioenlace WiFi 802.11a y WiFi 802.11g obtenidos en la posición 1 del mapa de la figura 5.13

#### 5.5.4 Comparativa de WiMAX y WiFi 802.11a

En esta sección se comparan las dos tecnologías de banda ancha WiFi 802.11a y WiMAX capaces de proporcionar enlaces vía radio con una elevada velocidad de bits o *wireless data rate* y elevada fiabilidad superiores a las ofrecidas por ADSL y otras tecnologías actuales en la ultima milla. Si se comparan los resultados de los parámetros del enlace WiMAX y de los del enlace WiFi obtenidos en la primera posición se observa que:

- La SNR recibida de WiMAX es superior a la SNR recibida de WiFi.
- El *throughput* del radioenlace es 4 veces mayor en WiFi (48 Mbps) que en WiMAX (12 Mbps).
- El *throughput* TCP conseguido por WiFi es bastante superior al conseguido por WiMAX.
- La potencia de transmisión del equipo WiFi es 3 dB inferior a la del equipo WiMAX.

Por lo tanto los resultados obtenidos confirman que el estándar de WiFi 802.11a supera a la tecnología WiMAX empleada en entornos donde existe visibilidad directa con el punto de acceso WiFi, es decir, WiFi 802.11a solamente puede trabajar correctamente en escenarios LOS. En escenarios NLOS, la ventaja es para WiMAX que es capaz de ofrece SNR altas permitiendo conectividad con la estación base WiMAX. Las ventajas de WiMAX frente a WiFi 802.11a son:

- Mayor número de portadoras, en concreto 4 veces mayor. WiMAX 802.16-2004 ofrece 256 portadoras OFDM mientras que WiFi solamente 64 portadoras OFDM.
- WiMAX dispone de diferentes anchos de banda en la capa física. En el proyecto se ha utilizado un ancho de banda de 3.5 MHz. No obstante existen estaciones base

más potentes que la micro estación base WiMAX del proyecto capaces de ofrecer *throughputs* hasta 75 Mbps empleando el mismo ancho de banda que WiFi de 20 MHz.

- WiMAX puede trabajar en escenarios NLOS con diversidad de obstáculos.
- Las estaciones base WiMAX son capaces de transmitir a potencias superiores que los puntos de acceso WiFi. La micro estación base WiMAX del proyecto transmite hasta 38 dBm de PIRE existiendo en el mercado estaciones base WiMAX de más prestaciones.
- WiMAX puede ofrecer QoS a sus estaciones suscriptoras mientras que el estándar 802.11a no lo contempla.
- WiMAX es un tipo de tecnología WMAN y por lo tanto puede ofrecer conectividad a un gran número mayor de usuarios, superior a las que ofrece WiFi. Por ejemplo la micro estación base WiMAX puede soportar un máximo de 250 unidades suscriptoras.

Para finalizar, la tabla 5.7 resume las comparativas entre WiMAX y WiFi:

	802.11	802.16	Explicación técnica
<b>Cobertura</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Máximo de 300 m.</li> <li>• Para mayor cobertura se necesitan más puntos de acceso o antenas directivas.</li> <li>• Optimizado para coberturas en interiores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hasta 50 Km. Dependerá del tipo de estación base.</li> <li>• Optimizado para coberturas en exteriores.</li> <li>• El estándar de WiMAX ofrece la posibilidad de soportar técnicas de antenas avanzadas y <i>mesh</i>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La capa PHY de WiMAX tolera 10 veces más el retardo multicamino que 801.11.</li> <li>• Modulación adaptativa</li> </ul>
<b>Escalabilidad</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ancho de banda de canal fijo de 20 MHz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ancho de banda de canal flexible, desde 1.5 MHz hasta 20 MHz para bandas licenciadas y no licenciadas.</li> <li>• Reutilización de</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 802.11b. Solamente soporta 3 canales no solapados. 802.11a soporta 5.</li> <li>• 802.16: Limitado solo por el espectro</li> </ul>

		frecuencias (mediante sectorización).  • Habilita la planeación de celdas para WISPs.	disponible.
<b>Eficiencia espectral</b>	• Valor máximo: 2.7 bps/Hz; hasta 54 Mbps en canal de 20 MHz.	• Máximo: 3.8 bps/Hz; hasta 75 Mbps en canal de 20 MHz.  • 5bps/Hz → 100 Mbps en canal de 20 MHz.	• 802.16: 256 OFDM versus 64 OFDM en 802.11.
<b>QoS</b>	• Los estándares comerciales (a,b,g) no soportan QoS.	• QoS para soportar voz/video, servicios diferenciados.	• 802.11: MAC basado en contención (CSMA)  • 802.16: MAC basado en solicitud garantizada

**Tabla 5.7** Comparativa entre WiFi 802.11 y WiMAX 802.16

## 5.6 Conclusiones del proyecto InterRural

En este capítulo se han presentado los resultados obtenidos en la campaña de medidas del proyecto InterRural realizado en el campus de la Universidad Autónoma de Barcelona.

Para llevar a cabo estas medidas se ha implementado un demostrador basado en una red híbrida integrando conexión vía satélite (para unir la zona rural con la red troncal de Internet) con redes de acceso terrestres (encargadas de hacer llegar la conexión Internet a las zonas rurales remotas). En esta primera fase del proyecto se han considerado las tecnologías de acceso WiFi y WiMAX. La segunda fase del proyecto con la integración de la tecnología PLC se realizará en principio el próximo año.

A partir de los resultados obtenidos en el demostrador, se ha validado que la solución WiMAX es totalmente viable para dar servicio Internet a zonas rurales. Se ha demostrado que servicios que requieren elevados anchos de banda como son los de videoconferencia, se pueden llevar a cabo con una alta calidad. Además, se ha probado que estas prestaciones se pueden conseguir a unas distancias de unos 1.5 - 2 Km entre la estación base y el terminal de usuario.

En cuanto a la comparación entre tecnologías WiFi y WiMAX, se ha observado que la primera de ellas es más apropiada para entornos donde existe visibilidad directa ofreciendo

velocidades de transmisión obtenidas en la descarga de ficheros del orden de 20 Mbps frente a los 5 Mbps con WiMAX y la cobertura no pretende ser superior a 1-1.5 Km. En caso contrario, es más apropiado apostar por la tecnología WiMAX debido a su superior robustez frente las pérdidas de propagación y la aparición de obstáculos.

## 5.7 Divulgación del proyecto InterRural

En primer lugar se anuncia que se han aceptado en la URSI<sup>75</sup> dos artículos valorados con notas de 4 y 5 (el 5 es excelente) con título “InterRural: Internet Rural mediante Redes Heterogéneas e Itinerantes” cuyos autores son Albert Anglès, Gonzalo Seco, José López Vicario, y todos los que han participado en el proyecto provenientes de las conocidas empresas.

En segundo lugar el proyecto InterRural se divulgó en diferentes medios de comunicación: televisión, radio y prensa. En el caso de la televisión participó Televisión local de Barcelona con José López Vicario como locutor. La figura 5.17 muestra una demostración de una videoconferencia WiMAX ante la televisión española tve1 el día 28 de febrero del 2008 (no se llegó a transmitir).



**Figura 5.17** Demostración a tve1 de una videoconferencia con WiMAX a una distancia de 1.3 Km de la BS

<sup>75</sup> Union Radio-Scientifique Internationale

En el caso de la radio, radio4 entrevistó a los coordinadores del proyecto InterRural: Gonzalo Seco y José López. Varios medios de prensa como es el periódico u otros que se referencian más a bajo también dieron a conocer al público la importancia que presenta este proyecto en que combinan diferentes tecnologías de banda ancha integradas con satélite para ofrecer una mejor alternativa a aquellas zonas rurales o casa aisladas de la ciudad con escasas alternativas de comunicación

La figura 5.18 muestra uno de los artículos publicados en el periódico.



Figura 5.18 Divulgación del proyecto InterRural en el periódico.

Otras de las divulgaciones en otros artículos de prensa se pueden encontrar en los siguientes enlaces web:

- <http://www.lamalla.net/digitals/article?id=190823>
- <http://www.deminorias.com/noticia.php?ID=12173>
- <http://www.noticiesdot.com/2008/02/28/investigadors-de-la-uab-posen-a-punt-un-sistema-d%E2%80%99acces-a-internet-de-qualitat-optima-per-a-zones-rurals/>
- <http://www.universia.es/rssNoticias/universidad/uni-UAB.xml>
- <http://www.hoytecnologia.com/noticias/Investigadores-elaboran-sistema-hibrida/47116>

## 6 CONCLUSIONES

En este proyecto final de carrera se ha podido experimentar por primera vez el despliegue de una red WiMAX 802.16-2004 con algunos de los equipos que ofrece Alvarion. Este proyecto ha servido para aprender a configurar una estación base comercial WiMAX y una vez en funcionamiento se ha podido analizar su cobertura en diferentes entornos: entorno *indoor* y entorno *outdoor*. En ambos entornos se han obtenido modelos empíricos simplificados de *path loss* a partir de medidas empíricas realizadas con los terminales WiMAX.

En el caso de *outdoor* se han definido dos escenarios: escenario semi-urbano y escenario semi-rural. En cada escenario *outdoor* se ha analizado la cobertura que ofrece WiMAX y se han obtenido modelos de propagación empíricos aproximados a partir de medidas realizadas en varios puntos (equiespaciados 100m, exceptuando el escenario semi-urbano donde se han tomado en distintas distancias no equiespaciadas por el impedimento de los obstáculos). El resultado es que en el entorno semi-urbano, tipo campus universitario, la calidad del radioenlace WiMAX es débil obteniendo  $3 < \gamma < 3.5$  debido a la gran diversidad de obstáculos a los que se enfrenta WiMAX. En cambio en ambientes más robustos como un caso semi-rural, se obtienen  $2 < \gamma < 3$ .

En el caso *indoor* se ha utilizado un modelo que tiene en cuenta las pérdidas de propagación en condiciones con visibilidad directa así como el número de paredes y su atenuación de las paredes y el número de entresuelos y su atenuación. Se han realizado medidas en diferentes puntos localizados en plantas diferentes en el interior de un edificio para comprobar la validez del modelo. El modelo encontrado para estimar las pérdidas de propagación en entorno LOS se ha realizado en un pasillo de unos 150 m de largo dando un resultado de una  $\gamma = 1.83$ , valor coherente por el efecto de que el pasillo actúa como si fuese una guía de ondas (hay reflexiones por todos los laterales).

Por último, este proyecto ha formado parte de la primera fase de un proyecto nacional llamado InterRural en el que se ha integrado WiMAX con satélite y se han realizado demostraciones y comparativas entre WiMAX y la variante WiFi 802.11a en diferentes situaciones: LOS y NLOS. Se ha demostrado que WiMAX es una alternativa frente a WiFi en situaciones NLOS. En situaciones LOS WiFi puede ofrecer *throughputs* hasta 54 Mbps. El sistema WiMAX empleado ha sido la variante de acceso fijo con un *throughput* de 12 Mbps tanto en *downlink* como en *uplink*, no obstante WiMAX puede ofrecer *throughputs* de hasta 70 Mbps en canales de 20 MHz en condiciones LOS (hasta 50 Km) y punto a punto fijo.

## 7 REFERENCIAS

- [Abi06] Zakhia Abichar, Yanling Peng, and J.Morris Chang. *WiMAX: The Emergence of Wireless Broadband*. IT Pro July, August 2006.
- [And07] J.G.Andrews, A.Ghosh and R.Muhamed. *Fundamentals Of WiMAX. Understanding Broadband Wireless Access*. Prentice Hall, June 2007.
- [IEEE04] IEEE.Standard 802.16-2004. *Part 16. Air interface for fixed broadband wireless access systems*. October 2004.
- [And05] J.G.Andrews. *Broadband Wireless Access with WiMAX/802.16: Current Performance Benchmarks and Future Potential*. IEEE Wireless Communications Magazine, February 2005.
- [Sha05] M.Shakeel. *Signal Processing Requirements for WiMAX (802.16e) Base Station* (Máster Thesis). Signal Processing Group, Department of Signals and Systems. Chalmers University of Technology, Sweeden,2005.
- [Yan05] Hongwei Yang. *A Road to Future Broadband Wireless Access: MIMO-OFDM-Based Air Interface*. IEEE Communications Magazine, January 2005.
- [Roc07] Amalia Roca. *Implementation of a WIMAX Simulator in Simulink* (Máster Thesis).Viena, February, 2007.
- [Gol05] Andrea.J.Goldsmith. *Wireless Communications*, Standford University, 2005.
- [W.Ho04] Sam W.Ho *Adaptative Modulation (QPSK,QAM)*. Application Note. Intel Communications, 2004.
- [White Paper.Motorola] White Paper from Motorola. *A Practical Guide to WIMAX Antennas: MIMO and beamforming technical overview*.  
[http://www.motorola.com/mot/doc/6/6745\\_MotDoc.pdf](http://www.motorola.com/mot/doc/6/6745_MotDoc.pdf)
- [Ges03] D.Gesbert, M.Shafi, D.Shiu, P.Smith, A.Naguib. *“From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space-Time Coded Wireless Systems”*. IEEE Journal on selected areas in communications, Vol.21, No3, April 2003.
- [Car02] A.Cardamá, “Antenas”. Edicions UPC [2ª edición], Barcelona 2002.

## Capítulo 4. *Papers* basados sobre el *path Loss* de WiMAX en *outdoor* y de otras tecnologías en *indoor*

---

[Afr07] W.Afric, B.Zovko, S.Grgic. *Methodology of Path Loss Calculation using Measurement Results*. Croatia, June 2007.

[Vak06] D.Vakante, W.Afric, N.Matosic, *WiMAX on 3.5 GHz Cell Size Calculation*. T-Com, Croatian Telecom, June 2006.

[Imp07] P.Imperatore, E.Salvadori, I.Chlamtac. *Path Loss Measurements at 3.5GHz: A Trial Test WiMAX Based in Rural Environments*. CREATE-NET, Trento, Italy, May 2007

[Gro07] P.Gronsund, P.Engelstad, T.Johnsen, T.Skeie. *The Physical Performance and Path Loss in a Fixed WiMAX Deployment*. Honolulu, Hawaii, USA. August 2007.

[Erc99] V.Erceg, L.Greenstein, S.Tjandra, S.Parkoff, A.Gupta, B.Kulic, A.Julius, R.Bianchi. *An empirically based path loss model for wireless channels in suburbans environments*. IEEE Journal on selected areas in communications, vol.17, no.7, July 1999.

[Luc07] D.Luca, F.Fiano, F.Mazzenga, C.Monti, S.Ridolfi, F.Vallone. *Outdoor Path loss models for IEEE 802.16 in suburban and campus-like environments*. International Conference on Communications proceedings, IEEE-ICC 2007, Beijing.

[Val08] A.Valcarce, H.Krauss, J.Hauck, M.Buchholz, F.Aguado. *Empirical propagation model for WiMAX at 3.5 GHz in an urban environment*. Microwave and optical technology letters /Vol.50, No.2, February 2008

[Kon07] Konstantinos G. Filis, Eleni D. Theodoropoulou, George L. Lyberopoulos. *The Effect of a Rapidly Changing Urban Environment on Nomadic WiMAX Performance*. COSMOTE Mobile Telecommunications SA, Athens. July 2007..

[Xu07] D.Xu, X.Gao, P.Zhang, Y.Wu. *Indoor Office Propagation Measurements and Path Loss Models at 5.25 GHz*. Vehicular Technology Conference, VTC-2007. October 2007.

[Kiv01] J.Kivinen, X.Zhao, P.Vainikainen. *Empirical Characterization of Wideband Indoor Radio Channel at 5.3 GHz*. IEEE Transactions on antennas and propagation, Vol.49, No8, August 2001.

## Capítulo 5. *Papers* basados en la interacción WiMAX-Satélite

---

[Zot07] N.Zotos, G. Gardikis. *Deliverable D12. Terrestrial Access Network*. IMOSAN (Integrated Multi-layer Optimization in broadband DVB-S.2. Satellite Networks., November 2007.

[Cor05] H.Córdova, *Anàlisis de Comunicació para las zonas rurales de la Costa Ecuatoriana: Parte I*. Revista Tecnológica ESPOL, Vol.18, N° 1, 9-16, Octubre 2005.

[Owe06] D.Owen.. *PartII of Rural Telecom: Technology, Architecture and Design*. Community Telecommunications January, 2006.

[Ret06] F.Retnasothie, M. Kemal, T.Yücek, H.Celebi, J.Zhang, and R.Muththaiah, *Wireless IPTV over WiMAX: Challenges and Applications*, Wamicon, 2006.

## Noticias de Prensa

---

[Not1] “Que es WiMAX?” Compostela Wireless, 2005.

[Not2] “Alvarion ultima un proyecto de WiMAX para Cataluña”. CincoDias.com, Barcelona, Febrero, 2007.

[Not3] “WiBro”, Wikipedia. Marzo 2008.

[Not4] C.Martínez (*Spain Channel Manager* de Alvarion). “Mercado WiMAX en España”. Asociación AsLAN, 2008.

[Not5] R.Forado (*Regional Manager* de Alvarion). “El presente y el futuro de WiMAX en España y los Servicios Personales de Banda Ancha” Asociación AsLAN, 2007.

[Not6] “WiMAX”, Wikipedia. Junio, 2008.

[Not7] <http://www.xataka.com/2008/01/28-WiMAX-en-la-india-250-millones-de-usuarios-conectados>

[Not8] “Alvarion lanza BreezeMAX para WiMAX”. Ibersystems, 2008.

## Resum

Aquest projecte tracta de l'estudi de la cobertura WiMAX basada en la variant 802.16-2004 en la que opera a 3.5 GHz en diferents escenaris d'un campus universitari. Primerament es realitza una introducció general a WiMAX i es defineixen els equips utilitzats. Posteriorment es comença a dur a terme un estudi de la cobertura WiMAX en diferents escenaris: *indoor* y *outdoor* per tal de poder extreure models empírics simplificats de *path loss* a partir de mesures realitzades amb els terminals WiMAX. Per últim, s'introdueix al projecte InterRural del MINISTERI D'INDUSTRIA, TURISME I COMERÇ dut a terme durant els mesos Octubre 2007-Març 2008 amb altres empreses col·laboradores: Telefónica, Hispasat, Gigle i Iber-X. La finalitat del projecte InterRural és comparar diferents tecnologies *wireless* de banda ample com alternatives per un bucle local ràdio de la última milla. En concret es comparen experimentalment les tecnologies WiMAX i WiFi 802.11a en diferents escenaris: LOS i NLOS.

## Resumen

Este proyecto trata del estudio de la cobertura WiMAX basada en la variante 802.16-2004 en la que opera a 3.5 GHz en diferentes escenarios de un campus universitario. Primeramente se realiza una introducción general a WiMAX y se definen los equipos empleados. Posteriormente se empieza a llevar a cabo un estudio de la cobertura WiMAX en diferentes entornos: *indoor* y *outdoor* con la finalidad de extraer modelos empíricos simplificados de *path loss* partiendo de las medidas obtenidas con los terminales WiMAX. Por último se introduce al proyecto InterRural del MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO llevado a cabo durante los meses Octubre 07-Marzo 08 con otras empresas colaboradoras: Telefónica, Hispasat, Gigle y Iber-X. La finalidad de este proyecto InterRural es comparar diferentes tecnologías *wireless* de banda como alternativas para un bucle local radio de la última milla. En concreto las tecnologías de banda ancha comparadas experimentalmente en dos tipos de escenarios: LOS y NLOS son WiMAX y WiFi 802.11a.

## Abstract

This thesis consists of studding the WiMAX coverage based over the IEEE 802.16-2004 standard operating at 3.5 GHz in different scenarios of a university campus. Firstly it realizes a general introduction to the WiMAX as one of the considered BWA (Broadband Wireless technology) and then it defines the employed equipment. Subsequently it begins to study the WiMAX coverage at different environments: indoor and outdoor with the aim to extract simplified empirical path loss models using the measurements obtained by WiMAX terminals. Finally it introduces to the InterRural project of the Spain's Ministry of Industry realized between October 2007-March 2008 with other colaborator enterpirses such as Telefonica, Hispasat, Gigle and Iber-X. The aim of InteRural's project is to compare different wireless broadband access technologies like WiMAX and WiFi 802.11a as WLL (Wireless Local Loop) alternatives. Both technologies have been put in practice in two scenarios: LOS and NLOS just for comparison.