



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE COMUNICACIONES

TESIS DOCTORAL

**Planificación de sistemas UMTS mediante sistemas de
información geográfica**

Presentada Por: Mohammed Khalil Hassan Alghamri

Director: Dr. Narcís Cardona Marcet

Valencia, Diciembre 2003

Prefacio

En esta Tesis Doctoral se lleva a cabo un análisis de las redes celulares de Tercera Generación basadas en WCDMA desde el punto de vista de planificación y estimación de capacidad. Un análisis de este tipo es una tarea compleja debido a la gran cantidad de factores que intervienen. El estudio abarca un modelo de planificación para sistemas de 3G basado en un Sistema de Información Geográfica considerando los factores más importantes que afectan a la capacidad, como por ejemplo la estructura celular utilizada, el escenario, ubicación de antenas, los modelos de propagación, correlación entre caminos de propagación, parámetros de *handover*, ortogonalidad de los códigos, calidad requerida en términos de (E_b/N_0) .

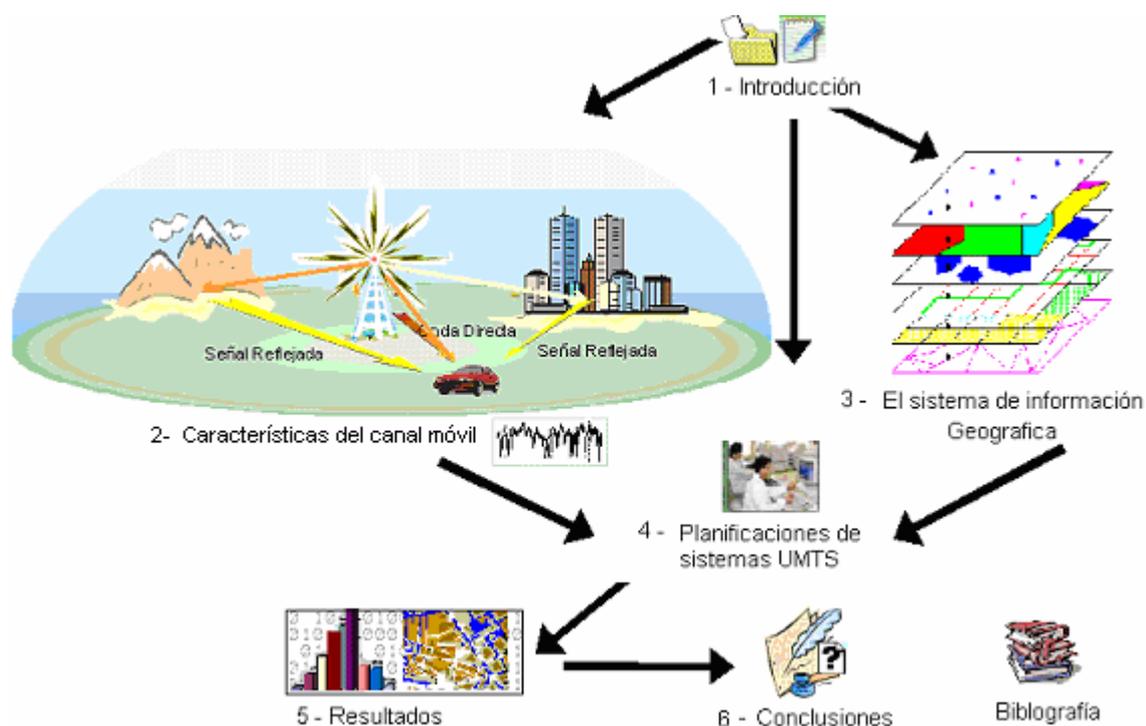
Esta tesis se sitúa dentro del marco de la investigación dedicada a los Sistemas de Telefonía móvil de Tercera Generación UMTS desarrollada por el Grupo de Comunicaciones Móviles de la Universidad Politécnica de Valencia. Este grupo ha mantenido desde sus inicios una destacable actividad en el ámbito de planificación de sistemas de comunicaciones móviles, mediante el desarrollo de herramientas informáticas y la elaboración de estudios de tipo tecnológico para apoyo en la toma de decisiones relacionadas con las telecomunicaciones.

La tesis que aquí se presenta es la última aportación en esta línea y presenta un modelo de planificación para el *software* DC-CELL, una aplicación de planificación de sistemas celulares sobre el sistema operativa Unix y sobre el GIS de Arc/Info que aglutina muchos de los estudios realizados en este grupo de trabajo y que los complementa con un interfaz grafica amigable con funciones propia de manejo, procesado y presentación de la información.

En esta dirección se ha desarrollado con éxito el trabajo que se recoge en este documento, cuya estructura se desglosa a continuación.

Estructura y formato:

El presente documento se ha estructurado en 6 capítulos y un apéndice. Se ha intentado de que cada uno de los capítulos sea autocontenido; manteniendo un carácter tratando un tema en su totalidad. La figura siguiente muestra un resumen de esta estructura:



Un esquema general de la estructura de la tesis

El capítulo primero se dedica a introducir los principios básicos de los Sistemas de Tercera Generación. En este capítulo se presentan las características generales del sistema y los servicios ofrecidos por el mismo, así como la clasificación según la finalidad del servicio; este apartado será el punto de partida del planteamiento de la tesis, como se verá en el capítulo 4. Veremos también en este primer capítulo una breve explicación de la evolución histórica de los estándares de telefonía móvil desde la primera generación hasta llegar al estado actual de las comunicaciones móviles. En este capítulo se explica también la arquitectura del sistema a nivel físico y a nivel de interfaces entre sí; el objetivo de este punto es entender los fundamentos del sistema UMTS en los que se basa esta tesis. En este capítulo se explica algunos conceptos

teóricos del sistema UMTS relacionados con esta tesis, como por ejemplo el concepto de ensanchado y desensanchado de la señal y los elementos principales del W-CDMA tales como el receptor RAKE, el control de potencia y los tipos de *handover*. Por último se presenta en este capítulo, una revisión del estado del arte en planificación de sistemas de 3G.

El capítulo segundo, se centra en el canal móvil. En este capítulo se pretende dar una visión global sobre los problemas que sufre el canal móvil en un entorno real. Se presentan los parámetros que afectan al canal móvil y se describen los modelos de propagación que fueron utilizados en esta tesis.

El capítulo tercero se dedica al GIS. En primer lugar empieza con una explicación general del sistema, ventajas, desventajas y la necesidad de utilizar una herramienta de planificación basada en GIS. En segundo lugar se explica de forma detallada el sistema GIS de Arc/Info; este bloque está redactado como un compendio de diversos libros y manuales de Arc/Info para ayudar al lector a entender el modo de trabajo sobre un GIS. Finalmente se muestra un escenario del sistema de referencia para simulaciones UMTS.

El capítulo cuarto es el núcleo de esta tesis cuyo título, planificación de sistemas de 3G, este capítulo situará al lector en el entorno del trabajo, mostrando, en general los pasos realizados para implementar nuestro modelo de planificación y los parámetros que tienen cierta influencia sobre la capacidad y se analiza cada uno y el efecto que tienen sobre el sistema bajo estudio.

En el capítulo quinto se muestran los resultados del trabajo, esto es los resultados de las simulaciones realizadas que incluye las gráficas obtenidas más significativas y comentarios a las mismas.

El capítulo sexto recoge las conclusiones obtenidas acerca de la planificación y capacidad en Sistemas 3G, así como las propuestas de líneas de investigación futuras para ampliar el análisis realizado.

En esta tesis se ha incluido un apéndice que es el apéndice A: DC-CELL como una herramienta de planificación celular donde se muestra un resumen de las principales funciones que dota esta herramienta.

Finalmente, las siglas se definen la primera vez que se utilizan en el desarrollo de los capítulos y aparecen recogidas en un glosario al final de esta tesis para mayor comodidad. En esta tesis, los términos en inglés se ponen en el texto de forma cursiva, y las referencias bibliográficas se identifican mediante numeraciones entre corchetes.

Objetivos de la tesis:

Esta tesis persigue los objetivos resumidos en los siguientes puntos:

- Estudio de las redes celulares de Tercera Generación basadas en WCDMA desde el punto de vista de planificación y estimación de capacidad.
- Estudio de varios modelos de propagaciones y los factores radioeléctricos que afectan a la planificación de sistemas de UMTS.
- Diseño de un modelo de planificación de sistemas UMTS mediante sistemas de información geográfica.
- Estudio general de los factores más importantes que afectan a la capacidad y en especial evaluar el efecto del coeficiente de correlación sobre la capacidad de los sistemas UMTS en entornos urbanos.

Agradecimientos

En particular, quiero expresar mi agradecimiento al director de esta tesis doctoral, Catedrático Narcís Cardona Marcet por su incondicional apoyo y dedicación, así como por sus sugerencias sin las cuales no hubiera sido posible la elaboración de este trabajo.

A D. Lorenzo Rubio Arjona por su colaboración en la parte de la capacidad de esta tesis. También a mis compañeros del laboratorio, porque entre todos hemos resultado los problemas que nos han ido surgiendo a cada uno. Especialmente a Miguel Ángel Pastor López y a todas aquellas personas que me han ayudado, de alguna manera y me olvido de nombrar.

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a la Agencia Española de Cooperación Internacional por su beca durante más de cuatro años para la realización de esta tesis.

Y por último, pero no por ello menos importante, quiero agradecer la paciencia y comprensión que desde el principio han tenido mi esposa, Tahany, y mis hijos: Omar, Asmaa y Alaa.

Resumen

En esta Tesis Doctoral se lleva a cabo un análisis de las redes celulares de Tercera Generación basadas en WCDMA desde el punto de vista de planificación y estimación de capacidad.

En la planificación tradicional debido al excesivo uso de campañas de medidas, esto hace que el coste sea muy elevado. En esta tesis se ha realizado un modelo de planificación de sistemas UMTS mediante sistemas de información geográfica (ARC/INFO) potente que provee una base de datos geográfica adaptable y capaz de hacer todo tipo de tareas sobre esta información utilizando mapas digitales que reflejan el estado real del entorno en el área a planificar. El hecho de elegir el ARC/INFO, un Sistema de Información Geográfica potente para nuestra aplicación de planificación de sistemas celulares, es por sus grandes ventajas y su sencillez de uso sobre sistemas operativos robustas como el Unix.

Este modelo de planificación utiliza modelos de propagación que dan buen margen de la predicción de las pérdidas de propagación que tienen en cuenta los edificios y las calles del entorno urbano, así los resultados tendrán más precisión a la hora de planificación.

La planificación radio en UMTS tiene por finalidad realizar los cálculos de cobertura y capacidad, con objeto de optimizar el despliegue de las estaciones bases y así cumplir los objetivos de calidad de servicio establecidos por el operador. En esta tesis se ha analizado en general los factores más importantes que afectan a la capacidad y en especial se ha estudiado en más detalles el efecto del coeficiente de correlación entre estaciones bases sobre la capacidad de los sistemas UMTS en entornos urbanos.

Resum

En aquesta tesi doctoral es duu a terme un anàlisi de les xarxes cel·lulars de Tercera Generació basades en WCDMA des del punt de vista de planificació i estimació de capacitat.

En la planificació tradicional, degut a l'excessiu ús de campanyes de mesures, açò fa que el cost siga molt elevat. En aquesta tesi s'ha realitzat un model de planificació de sistemes UMTS mitjançant sistemes d'informació geogràfica (ARC/INFO) potent que proveeix una base de dades geogràfica adaptable i capaç de fer tot tipus de tasques sobre aquesta informació utilitzant mapes digitals que reflexen l'estat real de l'entorn en l'àrea a planificar. El fet d'elegir el ARC/INFO, un Sistema d'Informació Geogràfica potent per a la nostra aplicació de planificació de sistemes cel·lulars, és pels seus grans avantatges i per la seva senzillesa d'ús sobre sistemes operatius robusts com L'Unix.

Aquest model de planificació utilitza models de propagació que donen bon marge de la predicció de les pèrdues de propagació que tenen present els edificis i els carrers de l'entorn urbà, així els resultats tindran més precisió a l'hora de planificació.

La planificació radio en UMTS té per finalitat realitzar els càlculs de cobertura i capacitat, amb objecte d'optimitzar el desplegament de les estacions base i així complir els objectius de qualitat i servei establerts per l'operador. En aquesta tesi s'ha revisat en general els factors més importants que afecten a la capacitat, i en especial s'ha estudiat amb més detall l'efecte del coeficient de correlació entre estacions base sobre la capacitat dels sistemes UMTS en entorns urbans.

Abstract

An analysis of the 3G cellular networks based on WCDMA from the point of view of planning and capacity estimation is carried out in this thesis.

In the traditional planning due to the excessive use of campaigns of measurement, this strongly increased the cost. In this thesis a model of UMTS planning systems based on a powerful (ARC/INFO) GIS has been developed. The advantages of selecting the ARC/INFO GIS software for our application of 3G planning systems, is that it provides built-in functions for processing geographic data, performing specialized tasks using digital maps that reflect the real state of the environment of the area selected to be planned, and for its simplicity of use on robust operating systems like UNIX.

The propagation models employed in this thesis, that take into account the buildings and the streets of the urban environment, provide a suitable margin of the prediction of the propagation losses that leads to a more precision in the results of the planning.

The most important factors that affect on the capacity have been studied in general in this thesis, and especially the effect of the correlation coefficient between base stations in urban areas on the UMTS systems capacity was analysed in more details.

1

Introducción a los sistemas de UMTS

Este capítulo presenta una breve introducción a los sistemas de UMTS. En primer lugar se presentan las características generales del sistema y los servicios ofrecidos por el mismo y la clasificación según la finalidad del servicio, este punto será el punto de partida del planteamiento de la tesis como se verá en el capítulo 4. En segundo lugar se explica la evolución hacia la tercera generación, en este punto se pretende hacer un enlace con una breve explicación de la evolución histórica de los estándares de telefonía móvil desde la primera generación hasta llegar al estado actual del mundo de Comunicaciones móviles. En tercer lugar se explica la arquitectura del sistema a nivel físico y a nivel de interfaces entre sí, el objetivo de este punto es entender la base del sistema UMTS en que se basa esta tesis. En cuarto lugar se explican algunos conceptos teóricos del acceso radio UMTS, entre los que se encuentran la tecnología W-CDMA utilizada en este sistema para el acceso radio, el concepto de ensanchado y desensanchado de la señal y los elementos principales del W-CDMA, tales como el receptor RAKE y el mecanismo de control de potencia. Por último se presenta una revisión del estado del arte en planificación de sistemas de 3G.

En resumen se pretende dar respuestas a las siguientes preguntas:

- ¿Que es UMTS?
- ¿Cómo funciona UMTS?
- ¿Qué diferentes modos de funcionamiento dentro de los sistemas UMTS?
- ¿Qué ventajas tiene el UMTS sobre los demás sistemas?

1.1 Características generales

Los sistemas de 3ª generación, surgen con el propósito de aumentar la versatilidad de los actuales sistemas de telefonía móvil. Es decir se intenta aumentar las prestaciones de los servicios ofrecidos a los usuarios. En 2G se tenía la posibilidad de realizar Comunicaciones de voz y mensajes cortos. Además, empiezan a aparecer las aplicaciones que permiten la transmisión de datos hacia y desde las actuales redes de transmisión de datos, gracias a las mejoras incorporadas por nuevos estándares de 2G como por ejemplo GPRS.

La tercera generación, no podía únicamente surgir con el propósito de mejorar los servicios existentes, sino que debía incorporar gran cantidad de servicios. Estos nuevos servicios, están íntimamente relacionados con aplicaciones multimedia en un entorno móvil.

Analizando estos nuevos servicios, podemos concluir que sus características no mantienen una pauta común. Por ejemplo, la tasa binaria necesaria para la transmisión de un servicio de videoconferencia, es muchísimo mayor que la necesaria para la transmisión de información de interés de ámbito local (policía, ambulancias, museos, etc). También es evidente que los requerimientos de calidad de los servicios que acabamos de comentar son profundamente diferentes. El ancho de banda en DL y UL es asimétrico en algunos servicios. (Tiempo real como por ejemplo voz, o no tiempo real como por ejemplo web)

Todo esto nos lleva a la necesidad de que la nueva tecnología, posea la versatilidad suficiente, para acoger un amplio espectro de servicios de muy diversa índole. Si traducimos estas características de servicio, en características técnicas, obtenemos la siguiente lista [1] de requisitos para los sistemas de tercera generación:

- Transmisión simétrica/asimétrica de alta fiabilidad.
- Uso de ancho de banda dinámico, en función de la aplicación.
- Velocidades binarias mucho más altas: 144 kbit/s en alta movilidad, 384 kbit/s en espacios abiertos y 2 Mbit/s en baja movilidad.
- Soporte tanto de conmutación de paquetes (PS) como de circuitos (CS).

- Soporte IP para acceso a Internet (navegación WWW), videojuegos, comercio electrónico, y vídeo y audio en tiempo real.
- Diferentes servicios simultáneos en una sola conexión.
- Calidad de voz como en la red fija.
- Soporte radioeléctrico flexible, con utilización más eficaz del espectro, con bandas de frecuencias comunes en todo el mundo.
- Personalización de los servicios, según perfil de usuario.
- Servicios dependientes de la posición (localización) del usuario.
- Incorporación gradual en coexistencia con los sistemas actuales de 2G.
- Itinerancia (roaming), incluido el internacional, entre diferentes operadores y tipos de redes.
- Ambientes de funcionamiento marítimo, terrestre y aeronáutico.
- Capacidad de terminales telecargables, multibanda y multientorno.
- Economías de escala y un estándar global y abierto que cubra las necesidades de un mercado de masas.
- Provisión de un “ambiente local virtual “ VHE: el usuario podrá recibir el mismo servicio independiente de su ubicación geográfica.

1.2 Servicios ofrecidos para UMTS

Los servicios de tercera generación proporcionarán diversas ventajas sobre los de las generaciones anteriores, entre las que se encuentran el acceso móvil a Internet a velocidades elevadas y servicios multimedia. Básicamente, combinan el acceso móvil de alta velocidad con los servicios basados en el protocolo IP. Esto no sólo conlleva una conexión rápida a Internet, sino también realizar transacciones bancarias a través del teléfono, hacer compras o consultar todo tipo de información.

Mientras que el sistema actual GSM y los terminales móviles no están preparados para la transmisión rápida de datos, la tercera generación UMTS permite la transmisión de información multimedia a una velocidad de hasta 2 Mbps. Además, permite estar conectado a la red de forma permanente sin tarificar más que cuando se utilice el terminal para realizar una operación.

UMTS evoluciona para integrar todos los servicios ofrecidos por las distintas tecnologías y redes actuales (GSM, DECT, ISDN, Internet, etc.) y se podrá utilizar con casi cualquier tipo de terminal: teléfono fijo, inalámbrico, celular, terminal multimedia, etc., tanto en ambientes profesionales como domésticos, ofreciendo una mayor calidad de los servicios y soportando la personalización por parte del usuario y los servicios multimedia móviles en tiempo real.

Las principales clasificaciones de los tipos de servicios que hasta ahora se han realizado, vienen dadas en función de la calidad del servicio y en función de la finalidad del servicio.

1.2.1 Clasificación en función de la QoS (*Quality of Service*)

En general, las aplicaciones y servicios pueden ser divididos en diferentes grupos, dependiendo de que factores determinemos como más importantes. En UMTS han sido identificados 4 tipos distintos de aplicaciones [2], son las denominadas 'Clases de Calidad de Servicio de UMTS (*UMTS QoS clases*) que son:

- Conversacional: son aquellos servicios en los que mantienen una conversación en tiempo real. Los usuarios finales van a ser personas, por lo que sus características están impuestas por la percepción humana. El retardo extremo a extremo debe ser bajo (<400 ms). El tráfico suele ser bastante simétrico. Ejemplo: voz, videotelefonía, videojuegos.
- De flujo continuo: son aquellos servicios en los que la información puede ser procesada y presentada al usuario final conforme van llegando los paquetes del flujo de información. Es decir, no es necesario esperar a que el conjunto entero de la información sea recibido. Muy indicado cuando la velocidad de descarga de información es baja. Tráfico muy asimétrico. Ejemplo: multimedia en ráfaga (se ejecutan sobre plugs-in que poseen los navegadores). Figura 1.1 muestra un ejemplo del concepto de videoconferencia
- Interactivo: es aquel servicio en el que uno de los extremos solicita información a un equipo remoto. Tráfico muy asimétrico. Ejemplo: información relacionada con la ubicación en cada instante del terminal móvil (emergencias, tiendas más próximas...), navegación por internet, etc.



Figura 1.1: Un ejemplo del concepto de videoconferencia

- No críticos: son aquellos servicios que no tienen requerimientos temporales, dado que forman parte de aplicaciones que no requieren una actuación inmediata sobre la información.

La principal distinción entre estos tipos de tráfico es la sensibilidad que poseen frente al retardo, que va desde la clase más sensible a retardos (conversacional) hasta la menos sensible (no críticos). La siguiente tabla muestra un resumen de cada una de las clases anteriores con sus características generales y algunos ejemplos de aplicaciones.

Tabla 1.1: Clasificación de las clases de servicios del UMTS

Clases "UMTS Qos"	Características	Ejemplo de aplicación
Conversacional	Necesidad de retardo temporal corto y fijo entre unidades de información.	Voz, vídeo telefonía y vídeo juegos
Flujo continuo	Necesidad de retardo temporal fijo.	Multimedia de flujo continuo (TV, radio, etc.)
interactivo	Integridad de los datos (sin errores) y de respuesta del usuario (respuesta temporal no muy alta).	Aplicaciones de navegación web o juegos de red.
No crítico	Integridad de los datos, sin respuesta inmediata del usuario.	Correo electrónico, mensajes cortos.

1.2.2 Clasificación según la finalidad del servicio

Existe otra posibilidad de agrupar los servicios ofrecidos por el sistema UMTS, en esta clasificación, además de tener en cuenta la naturaleza del tráfico generado por cada servicio se destaca la velocidad requerida por cada servicio. En esta clasificación encontramos 6 tipos de servicios:

- Voz
- Mensajes
- Datos conmutados
- Multimedia a velocidad Media (MM)
- Multimedia de alta interactividad (HIMM)
- Multimedia de Alta velocidad (HMM)

El UMTS Forum ha estimado el tráfico que cada uno de estos servicios generará dependiendo del área en la que nos movamos. Esta información nos ayudará a realizar una planificación de un sistema UMTS. Esta clasificación la volveremos a ver en detalle en el capítulo 4, puesto que nuestro modelo de planificación está basado en esta clasificación.

1.3 Evolución hacia la 3ª generación

En este punto se muestra una breve explicación de la evolución de los sistemas de telefonía móvil hacia la tercera generación.

1.3.1 Primera generación

Los estándares de primera generación se caracterizaron por hacer uso de comunicaciones analógicas. Su aparición se produjo a finales de los años 70 y principio de los 80. Las características que los definen son:

- Uso de una modulación FM de banda estrecha, lo que las hacía muy robustas frente a ruido, interferencias y desvanecimientos
- Acceso múltiple por división en la frecuencia (FDMA).
- El duplexado se realizaba también por división en la frecuencia (FDD).

- El traspaso de llamadas entre estaciones base o hand-over era asistido por la red. Es decir, la decisión de realizar el hand-over la tomaban las estaciones base.

Los principales estándares pertenecientes a esta generación son:

- AMPS (*Advanced Mobile Phone System*): Es un sistema norteamericano.
- NMT (*Nordic Mobile Telephony*): Generado por los países nórdicos.
- E-TACS (*Extended Total Access Communications System*): es un sistema de comunicaciones para telefonía móvil celular dúplex en la banda de 900 MHz.

1.3.2 Segunda generación

Los estándares de la segunda generación introdujeron las comunicaciones digitales. Los sistemas se centraron en la mejora de la calidad de voz, la cobertura y la capacidad. Estos sistemas fueron diseñados para soportar servicios de voz y datos de baja velocidad.

Los cuatro sistemas más representativos de esta generación (que actualmente siguen desplegados y proporcionando servicio) son los siguientes:

- GSM (*Global System for Mobile phone communications*): Apareció en 1992 y fue el primer estándar digital disponible que permite *roaming*. Se basa en la transmisión de la información a través de conmutación de circuitos. La transmisión de datos a baja velocidad (menos de 9.6 kbps) se ha utilizado principalmente para la transmisión de mensajes cortos (*Short Message Service-SMS*).
- IS-95: Utiliza la tecnología de Acceso Múltiple por División en el Código de banda estrecha (*Narrowband CDMA*). Se utiliza en Norte América y Corea del Sur
- TDMA IS-136: este sistema proviene del IS-54 y ha sido el estándar digital utilizado en parte de Norte América, América Latina, la parte asiática del Pacífico y la Europa de Este.
- PDC: Personal Digital Communications. Es el principal estándar digital funcionando en Japón.

1.3.3 Segunda generación mejorada

También llamada 2.5G, es una evolución de la anterior generación con el fin de aumentar la tasa binaria y la capacidad de los sistemas. La variación de tasas va desde 57.6 kbps hasta 171.2 kbps. La figura 1.2 muestra la evolución de los sistemas de comunicaciones móviles desde 2G. Los principales estándares aparecidos son:

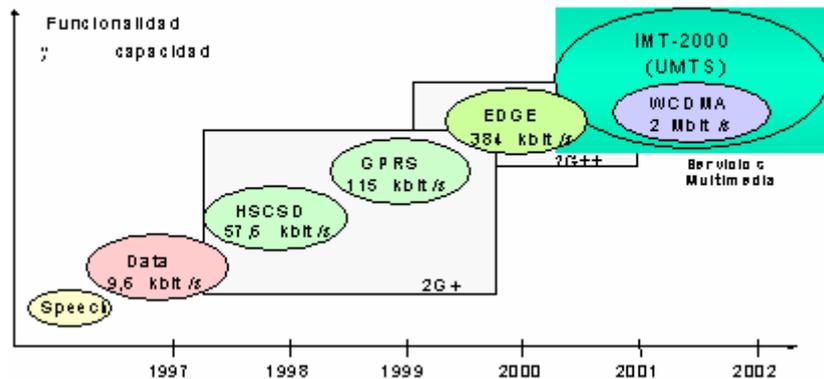


Figura 1.2: Evolución de los sistemas de comunicaciones móviles desde 2G

- HSCSD (*High-Speed Circuit Switched Data*) es una evolución del actual servicio de transmisión de datos por conmutación de circuitos que permite obtener velocidades de transmisión superiores a los 9.6 Kbps a través del uso de múltiples time slots para generar un canal de tráfico de hasta 57.6 Kbps. Con esta tecnología, el número de time slots utilizado en cada instante por una comunicación de datos puede ser variable, dependiendo de la saturación de la célula en la que se encuentre conectado el móvil.
- GPRS (*General Packet Radio System*) es el estándar del ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) que permite la transmisión de paquetes de datos sobre sistemas GSM. Teóricamente soporta tasas de hasta 171.2 kbps haciendo uso de los 8 canales simultáneamente. Esto supone aumentar 3 veces la velocidad de transmisión de las actuales redes fijas de telecomunicación, y hasta 10 veces la velocidad de los actuales servicios de conmutación de circuitos en redes GSM.

- EDGE (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*) el sistema EDGE, también llamado GSM384, considerado en su momento como la puerta hacia las comunicaciones personales multimedia. Utiliza un esquema de modulación y codificación alternativo que alcanza transferencias de datos de hasta 384 Kbps, o sea 48 Kbps por slot (ya adecuada para soportar vídeo con calidad) sobre la portadora estándar de 200 KHz propia de GSM, siendo comparable con las que promete UMTS. Esta posibilidad permite seguir utilizando las redes GSM existentes (con una nueva interfaz radio) por mucho tiempo, lo que es un factor muy importante para los operadores que actualmente ofrecen servicios de comunicaciones móviles celulares vía radio, y para los fabricantes que están desarrollando terminales duales compatibles GSM y WCDMA.

1.3.4 Tercera generación

Los servicios de tercera generación proporcionarán diversas ventajas sobre los de las generaciones anteriores, entre las que se encuentran el acceso móvil a Internet a velocidades elevadas y servicios multimedia. Básicamente, combinan el acceso móvil de alta velocidad con los servicios basados en el protocolo IP. Esto no sólo conlleva una conexión rápida a Internet, sino también realizar transacciones bancarias a través del teléfono, hacer compras o consultar todo tipo de información.

La familia de sistemas móviles de tercera generación es denominada *International Mobile Telecommunications 2000* (IMT-2000), cuyas especificaciones son responsabilidad de la ITU. IMT-2000 se presenta como una guía a seguir por los estándares de tercera generación para garantizar la compatibilidad mutua, además de sentar bases para desarrollos futuros. El acceso a las redes de tercera generación ha de garantizarse en todo momento, sea cual sea el lugar donde se encuentre el usuario. Por eso, se planteó como esencial la compatibilidad entre todos los distintos sistemas de tercera generación, definiendo entre todos los organismos una única familia que engloba todos los sistemas móviles terrestres y vía satélite.

Una vez se tuvo definida cuál debía ser la base IMT-2000, las distintas organizaciones de estandarización comenzaron a desarrollar el sistema que se utilizaría en cada zona geográfica. En Europa el sistema de tercera generación compatible con IMT-2000 se denomina UMTS (*Universal Mobile Telecommunications*

System). La figura 1.3 muestra un esquema general de la evolución de los estándares de telefonía móvil hacia los sistemas de tercera generación.

La aparición de UMTS está dirigida a conseguir una transición suave desde las redes de segunda generación actuales (GSM principalmente) hasta las redes de tercera generación. En los primeros momentos coexistirán ambos sistemas para que, añadiendo cada vez mayor funcionalidad a las redes UMTS, finalmente se proceda a sustituir las redes existentes.

Mientras que el sistema actual GSM y los terminales móviles no están preparados para la transmisión rápida de datos, la tercera generación UMTS permitirá la transmisión de información multimedia a una velocidad de hasta 2 Mbps. Además, permitirá estar conectado a la red de forma permanente sin tarificar más que cuando se utilice el terminal para realizar una operación.

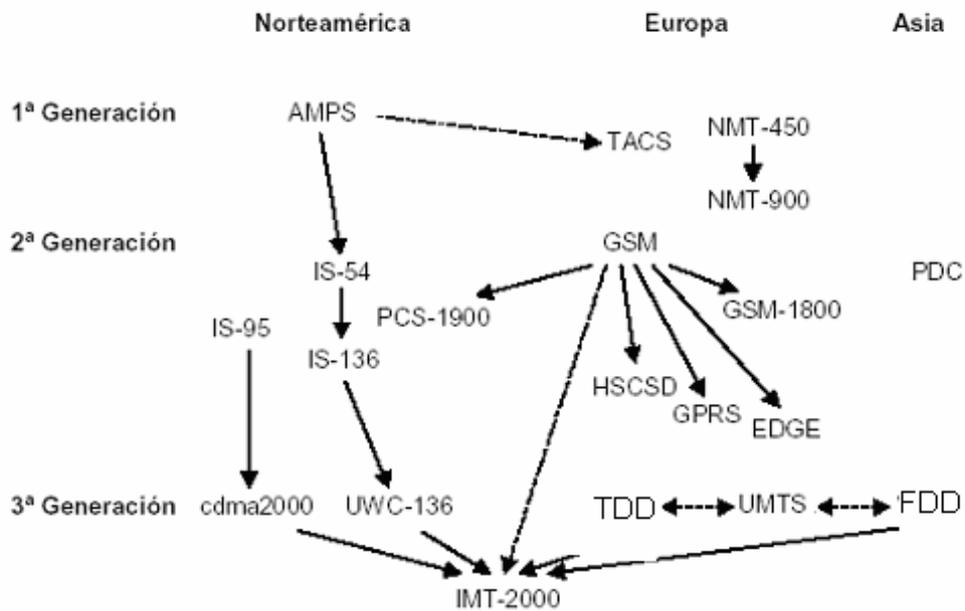


Figura 1.3: Evolución de los estándares de telefonía móvil hacia los sistemas de tercera generación

UMTS evoluciona para integrar todos los servicios ofrecidos por las distintas tecnologías y redes actuales (GSM, DECT, ISDN, Internet, etc.) y se podrá utilizar con

casi cualquier tipo de terminal: teléfono fijo, inalámbrico, celular, terminal multimedia, etc., tanto en ambientes profesionales como domésticos, ofreciendo una mayor calidad de los servicios y soportando la personalización por parte del usuario y los servicios multimedia móviles en tiempo real.

La principal característica de los sistemas UMTS son las altas tasas binarias a las que tendrá acceso el usuario:

- 384 Kbps en conexiones de conmutación de circuitos
- 2 Mbps en conexiones de conmutación de paquetes

Estas elevadas velocidades permiten la aparición de nuevos servicios, como la video-telefonía y un acceso mucho más rápido a Internet. Esto último precisa de una gestión efectiva de tráfico basado en TCP/UDP/IP sobre las redes UMTS.

Inicialmente, el tráfico de UMTS será fundamentalmente voz, y posteriormente se prevé que el porcentaje de tráfico de datos irá creciendo. Asimismo, aparecerá una transición de conexiones de conmutación de circuitos hacia conmutación de paquetes.

El reto que aparece en estos momentos es la fusión de dos tipos de servicio hasta ahora separados. Por un lado se tiene la portabilidad de los terminales móviles existentes, la cobertura del sistema y la gran base de usuarios, y por otro lado se encuentran las nuevas necesidades de comunicación, como el acceso a Internet y las aplicaciones multimedia. La unión de todo ello se ha denominado *Mobile Internet*.

En comparación con GSM y otras redes de telefonía móvil existentes, UMTS proporciona una importante característica: permite la negociación de las propiedades de una portadora radio, entre ellas el *throughput*, el retardo permitido y la BER (bit error rate). Para lograr el éxito, los sistemas UMTS deberán soportar una amplia variedad de aplicaciones con diferentes requisitos de calidad de servicio.

Actualmente no es posible determinar la naturaleza y el uso que se hará de dichas aplicaciones, por lo que no se podrán optimizar los sistemas para ellas. De esta forma, las portadoras de UMTS deberán concebirse de forma genérica, para permitir un soporte adecuado para aplicaciones existentes y facilitar la evolución de nuevas aplicaciones. Puesto que la mayoría de aplicaciones de telecomunicación actuales son

aplicaciones de Internet o ISDN, parece evidente que estas aplicaciones determinarán el transporte de la información en las portadoras UMTS.

Entre los servicios ofrecidos por los sistemas de telefonía móvil 3G, destacarán aquellas aplicaciones que alcancen no sólo el ámbito de la comunicación, sino el mayor conjunto de actividades interactivas posibles. Además, merecen especial mención los servicios de localización, cuyo perfil depende del lugar en que se encuentre el terminal del usuario, personalizando así los servicios y permitiendo acceder a aquello que más se necesita en cada momento.

1.4 Arquitectura del sistema UMTS

La arquitectura de los sistemas de tercera generación de telefonía móvil no presenta grandes diferencias con la de los actuales sistemas GPRS. Por tanto, el despliegue conjunto de la red para UMTS con la red existente de los sistemas de segunda generación, posibilita el uso de las *Core Networks* de segunda generación en los sistemas de tercera generación. El esquema básico de la arquitectura UMTS [3] es el siguiente: (ver figura 1.4 y 1.5)

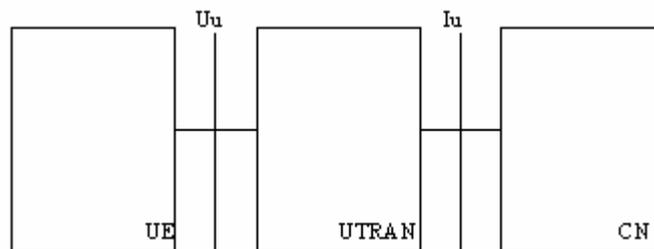


Figura 1.4: Arquitectura del sistema UMTS de alto nivel

Los elementos que forman el anterior esquema son los siguientes:

- Terminal de usuario (UE – *User Equipment*): es el conjunto de elementos que permiten que el usuario final pueda hacer uso del interfaz radio.
- UTRAN (UMTS *Terrestrial Radio Access Network*): se encarga de toda la funcionalidad radio del sistema.
- Red Troncal (CN – *Core Network*): parte fija de la red, que posibilita la interconexión de UTRANs y/o la conexión a redes externas.

En la siguiente figura se observan los componentes, de los anteriores elementos de red, así como los interfaces definidos por el 3GPP, que son los puntos de unión entre los diferentes elementos:

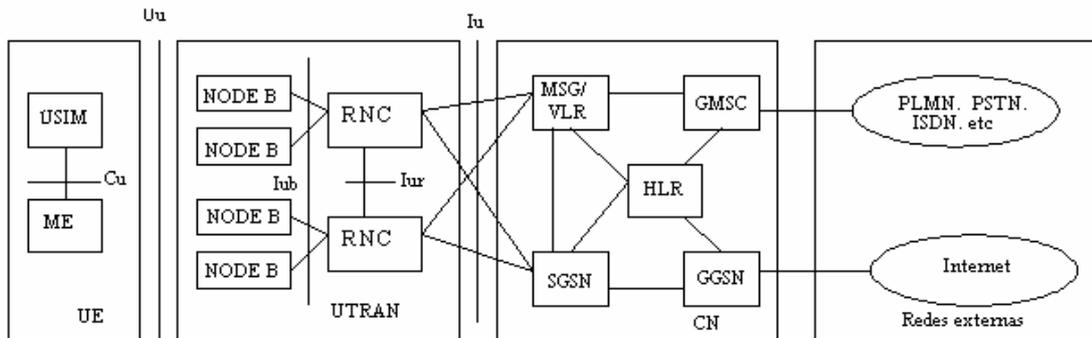


Figura 1.5: Elementos e interfaces de red en un nivel más profundo

1.4.1 Terminales móviles

El terminal de usuario (UE) consiste en dos partes:

- Equipo móvil (ME): es el terminal radio que permite la radiocomunicación.
- Módulo de identidad de Usuario UMTS (USIM – UMTS *Subscriber Identity Module*): Es la tarjeta que contiene información sobre la identidad del usuario, realiza las tareas de autenticación y guarda las claves necesarias para autenticación y encriptado.

1.4.2 Red de acceso radio (UTRAN)

En la UTRAN también consiste en dos bloques:

- Nodo B: participa en las tareas del control de los recursos radio y transforma el flujo de datos para que se entiendan los interfaces Iub y Uu. Este elemento es la típica estación base (BS) de los sistemas de segunda generación.
- Controlador de la Red Radio (RNC – *Radio Network Controller*): mantiene y controla todos los recursos radios de los Nodos B que se encuentran en su dominio. Es el equivalente al Controlador de Estaciones Base (BSC) en

sistemas de segunda generación. Es el punto de acceso que la *Core Network* tiene hacia la UTRAN.

1.4.3 Núcleo de Red (*Core Network*)

El núcleo de red incorpora funciones de transporte y de inteligencia. Las funciones de transporte soportan el transporte de la información de tráfico y señalización, incluida la conmutación. Las funciones de inteligencia incluyen prestaciones como el encaminamiento y la gestión de la movilidad. A través del núcleo de red, la red UMTS se conecta con otras redes de telecomunicación, de forma que resulte posible la comunicación no sólo entre usuarios móviles de UMTS, sino también con los que se encuentran conectados a otras redes.

En una primera fase de UMTS, el núcleo de red se configura en dos dominios: de conmutación de circuitos CS (*Circuit Switch*) y de paquetes PS (*Packet Switch*). A través del modo CS (como por ejemplo ISDN y PSTN) se encaminarán los tráficos de voz y datos en modo circuito, mientras que el PS (como por ejemplo Internet) haría lo propio con datos en modo paquete. En una futura configuración se evolucionaría a una solución “todo IP” en la que el modo paquete absorbería todo el tráfico, incluyendo la voz.

Los elementos del Núcleo de Red que aparecen en la figura 1.5 son los siguientes:

- Registro de Localización en zona habitual (HLR – *Home Location Register*): Es una base de datos que guarda los perfiles de los usuarios que generalmente se encuentran en esa zona. También se encarga de almacenar la posición de sus usuarios (referenciando a una MSC, VLR o SGSN), cuando no se encuentran en la zona. Esto sirve para enrutar las llamadas hacia el terminal cuando no se encuentra en la zona propia.
- Centro de Conmutación y Registro de Localización de Visitantes (MSC/VLR – *Mobile Services Switching Center/Visitor Location Register*): son el conmutador y la base de datos que sirven al usuario en una zona no habitual, para servicios de conmutación de circuitos. El VLR guarda una copia del perfil de usuario obtenida del HLR.

- GMSC (*Gateway MSC*): es el punto del conmutador donde la red se conecta a redes externas. Utilizado por servicios de conmutación de circuitos.
- SGSN (*Serving GPRS Support Node*): tiene una función muy parecida al MSC/VLR pero para servicios de conmutación de paquetes.
- GGSN (*Gateway GPRS Support Node*): tiene una función muy parecida al MSC pero para servicios de conmutación de paquetes.

Todos estos elementos funcionales definidos en la red de acceso radio se comunican entre sí por una serie de interfaces [4]:

- Interfaz Núcleo de Red – RNC (I_U): Es el punto de conexión entre el subsistema de red radio (RNS) y el núcleo de red. Se estructura en tres componentes separadas, cada una destinada a un dominio concreto del núcleo de red:
 - I_U -CS: Conmutación en modo circuito, por donde se encaminan las conexiones en este modo
 - I_U -PS: Conmutación en modo paquete
 - I_U -BC: Difusión
- Interfaz RNC – RNC (I_{UR}): Es la interfaz existente entre dos RNC pertenecientes a la red de acceso UTRAN. Este enlace no existía en los sistemas 2G, y su implantación es opcional. Permite liberar al Núcleo de Red de las decisiones relativas a trasposos entre celdas adscritas a RNC diferentes. En esta interfaz se sitúa la gestión de la movilidad de las conexiones radio dentro de la red de acceso.
- Interfaz RNC – Nodo B (I_{UB}): Es la interfaz entre un Nodo B y su RNC. El RNC puede indicar al Nodo B mediante este enlace que establezca o libere los enlaces radio en el área de cobertura del grupo de celdas que el nodo controla.
- Interfaz radio (U_U): Esta interfaz supone la verdadera revolución de UMTS, ya que en el tramo radioeléctrico se opta por una técnica de acceso múltiple DS-CDMA, frente a la TDMA utilizada en 2G.

1.5 Conceptos teóricos del acceso radio UMTS

En este punto, se explica las diferentes tipos de técnicas de acceso al medio, técnicas de duplexado y técnica de ensanchamiento estandarizadas en UMTS.

1.5.1 Técnicas de acceso radio

Uno de los puntos más importantes en un sistema móvil, como la telefonía celular, es la forma en como se accede al medio de comunicación. A estas técnicas se les conoce como "acceso múltiple". Es decir, una gran cantidad de subscriptores en un servicio móvil comparten un conjunto de canales de radio y cualquier usuario puede competir para acceder cualquiera de los canales disponibles. Un canal puede ser visto como una porción del espectro radioeléctrico, el cual es asignado temporalmente para un propósito específico, tal como una llamada telefónica.

Una técnica de acceso múltiple define cómo se divide el espectro de frecuencias en canales y cómo los canales son asignados a los múltiples usuarios en el sistema. Visto de otra manera, el seleccionar una técnica eficiente de acceso múltiple significa que los operadores telefónicos obtendrán más ganancias al acomodar más usuarios en sus redes móviles.

Las técnicas de acceso múltiple son utilizadas en el ambiente de las comunicaciones para que varios dispositivos, como por ejemplo: computadoras, teléfonos, radios, etc. puedan acceder al medio o canal de comunicación de manera ordenada. Las técnicas de acceso múltiple nos permiten compartir un mismo canal de comunicación para varios usuarios.

Existen tres tipos básicos de técnicas de acceso, que son los siguientes (ver figura 1.6):

- FDMA (*Frequency Division Multiple Access*)
- TDMA (*Time Division Multiple Access*)
- CDMA (*Code Division Multiple Access*)

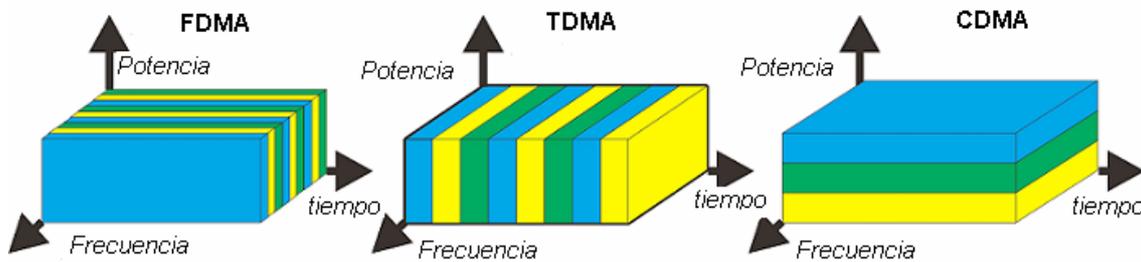


Figura 1.6: Tipos básicos de técnicas de acceso radio

A continuación hablamos en breve de cada una de estas técnicas de acceso al medio.

1.5.1.1 FDMA

Consiste en asignar una frecuencia diferente a cada transmisión durante todo el tiempo. Se asigna a cada uno de éstos una frecuencia específica, la cual debe estar dentro del rango de frecuencias que constituyen el canal total. En este esquema, a cada comunicación se le asigna un canal virtual particular.

El móvil y la base deben filtrar la información recibida de tal manera que solo escuchen la conversación que estén llevando a cabo. Este esquema de acceso es muy común.

1.5.1.2 TDMA

Consistente en la segmentación del tiempo en que los usuarios pueden acceder al medio para transmitir datos. De esta manera, todos los abonados comparten la totalidad del ancho de banda disponible pero sólo lo utilizan durante los períodos de tiempo en los que les es permitido.

Estos períodos se llaman *slots* o ranuras temporales. En un esquema de transmisión TDMA rígido, a cada abonado le corresponde una ranura determinada y sólo puede transmitir en ella. Un sistema más eficiente asignaría dinámicamente los *slots* a los usuarios que los requirieran para optimizar el uso del espectro.

1.5.1.3 CDMA

Consiste en asignar todo el espectro durante todo el tiempo a cada usuario, diferenciado del resto mediante la utilización de secuencias de códigos ortogonales entre sí, el cual se usa para codificar la señal de información que se desea transmitir. El receptor, conociendo la secuencia de código del usuario, decodifica la señal recibida y regenera los datos originales.

En los sistemas móviles celulares esta técnica de acceso proporciona importantes ventajas, respecto a las técnicas clásicas FDMA o TDMA, en cuanto a capacidad y calidad, derivadas de la mejor adaptación de las señales de espectro ensanchado a este tipo de entornos.

El uso de este tipo de técnicas de acceso al medio por división de códigos resulta especialmente interesante debido a la mayor eficiencia espectral que aportan frente a otro tipo de técnicas de acceso. Esta mejora es debida a los siguientes factores:

- CDMA se aproxima a las condiciones ideales que, según el Teorema de Shannon [5], permiten optimizar la capacidad de los canales.
- Las técnicas CDMA permiten aprovechar las pausas en la comunicación de la voz y los datos, de forma que se puede mejorar la eficiencia limitando la potencia transmitida en estos periodos de pausa para que pueda ser aprovechada por otros usuarios, ya que CDMA reparte potencia entre ellos, en lugar de espectro o tiempo, como hacen FDMA y TDMA respectivamente.
- Con la técnica CDMA se puede usar un receptor específico conocido como RAKE (se habla en más detalles sobre esta receptor en el punto 1.6.1), mediante el uso de este receptor, un móvil basado en CDMA puede estar conectado simultáneamente a dos o más estaciones base, lo que proporciona una ganancia adicional por diversidad, denominada macrodiversidad.
- Tecnológicamente el diseño de receptores CDMA con mejor eficiencia espectral es más sencillo que el diseño de receptores TDMA. Esta es una de las razones más importantes por las que se propone el uso de CDMA en la interfaz radio de los sistemas 3G.

Sin embargo, CDMA tiene también algunos inconvenientes que no aparecen en otras técnicas de acceso, entre los que destaca la necesidad de utilizar un control de potencia muy estricto. Esta necesidad de control de potencia implica la transmisión de un exceso de información que reduce la capacidad útil disponible.

1.5.2 Técnicas de duplexado

Permiten la comunicación Duplex (transmisión y recepción simultanea) del sistema. Las técnicas de duplexado utilizadas en UMTS son:

- TDD (*Time Division Duplex*): cada sentido de la comunicación transmite en instantes diferentes de tiempo, y en intervalos temporales suficientemente pequeños como para no producir discontinuidades en la comunicación.



Figura 1.7: TDD; enviar ↑ y recibir ↓ en intervalos temporales pequeños

- FDD (*Frequency Division Duplex*): ambos sentidos transmiten simultáneamente pero en bandas de frecuencia distintas. Las bandas asignadas a UMTS en Europa, a repartir entre los operadores existentes en cada país, como se ve en la siguiente grafica:



Figura 1.8: FDD; espectro dedicado para el enlace ascendente y descendente en UTRA

1.5.3 Ensanchado y desensanchado

Los sistemas de espectro ensanchado (*Spread Spectrum*) son aquellos en los que el ancho de banda de las señales transmitidas es mucho mayor que el mínimo necesario para transportar la información. Existen diversas técnicas de ensanchado de espectro. Las dos principalmente utilizadas son:

- FH-CDMA (Frequency Hopping Spread Spectrum)
- DS-CDMA (Direct Sequence Spread Spectrum)

Puesto que para UMTS se utiliza DS-CDMA, esta punto presta más atención a esta última técnica de ensanchamiento

1.5.3.1 FH-CDMA

Este método utiliza saltos de frecuencia para lograr ampliar el espectro de la señal, De forma similar al caso anterior, el método está basado en la utilización de códigos. Estos códigos definen diferentes secuencias de salto en la frecuencia portadora de la señal.

La mayor capacidad de supresión de interferencias se consigue con secuencias aleatorias, pero esto provoca colisiones cuando distintos canales intentan ocupar una misma frecuencia. Esto limita el aislamiento entre canales y, por tanto, la capacidad del sistema. Se pueden distinguir dos formas de realizar estos saltos de frecuencias:

- *Fast Frequency Hopping*
- *Slow Frequency Hopping*

En el primero, los saltos se producen como mínimo tan rápidamente como la señal de entrada al modulador. En el segundo método, los saltos se producen a menor velocidad que la tasa de la información. Esto implica que muchos bits se transmiten en cada salto, generalmente usando una modulación de banda estrecha.

El principal problema del salto de frecuencia es que para lograr una buena supresión de las interferencias la información ha de expandirse por todo el ancho de banda asignado. Por otro lado, se tiene como ventaja que introduce una diversidad en frecuencia.

1.5.3.2 DS-SS-SSB

En este proceso de ensanchamiento interviene una secuencia denominada código o secuencia de ensanchamiento, que es independiente de la señal de información y posee un ancho de banda mucho mayor.

La señal ensanchada por secuencia directa $s(t)$ se consigue multiplicando la señal de información $d(t)$ por una señal binaria $c(t)$ considerada aleatoria, con periodo de chip T_c mucho menor que el periodo de bit T_b de la señal original. Se denomina chip al periodo de símbolo de la señal ensanchadora. La figura siguiente muestra este proceso en la dimensión temporal y frecuencial.

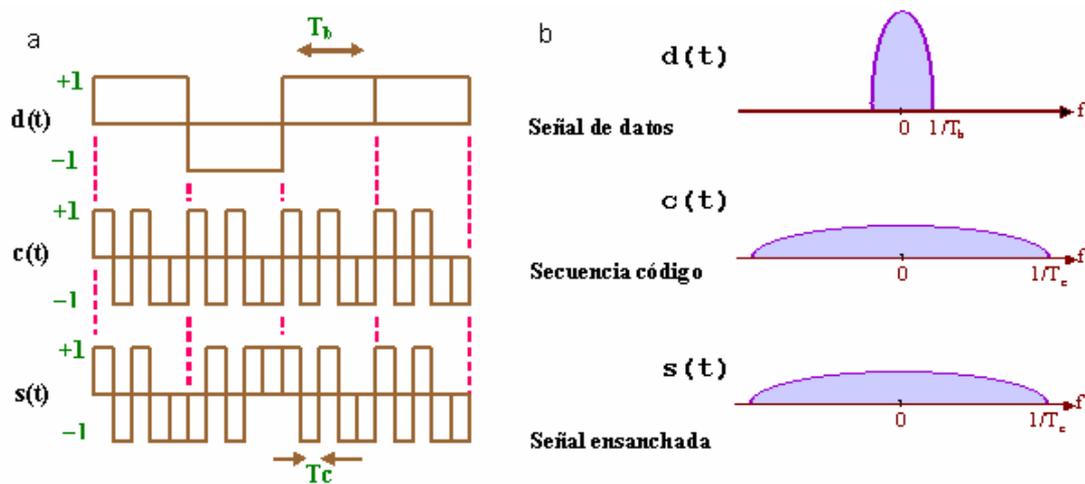


Figura 1.9: proceso de ensanchamiento; a: dimensión temporal; b: dimensión frecuencial.

La señal ensanchada por secuencia directa se consigue, como hemos dicho, multiplicando la señal de información modulada por una onda binaria en banda base, considerada aleatoria, con periodo de bit T_c , mucho menor que el período de bit T_b de la señal modulada. La señal ensanchada será pues [6]:

$$S(t) = C(t) \times A.d(t) \times \cos(\omega_b.t + \theta) \quad \{1. 1\}$$

donde:

- $d(t) = \pm 1$: señal moduladora BPSK.
- A: amplitud de la señal BPSK

- θ : fase aleatoria.
- $C(t)$: señal de pseudo-ruido (ensanchadora)

A su vez, esta secuencia código es necesaria para recuperar la señal de información, por lo que debe ser conocida por el receptor. La técnica de espectro ensanchado consiste en la transformación reversible de una señal, de forma que su energía se disperse ocupando una banda de frecuencias mucho más grande de la que ocupaba originariamente. A cambio de una mayor ocupación espectral, respecto a los sistemas convencionales, estos sistemas consiguen las siguientes ventajas:

- Acceso múltiple: Múltiples usuarios usan el canal al mismo tiempo, coexistiendo múltiples señales DS sobrepuestas en tiempo y frecuencia. En el receptor, el “desensanchado” es usado para eliminar el código ensanchador y recuperar la señal original. Esta operación concentra la potencia de la señal del usuario deseado en el ancho de banda de la información.
- Robustez: la transmisión es resistente a las interferencias multicamino, ya que las técnicas de espectro ensanchado permiten separar las réplicas recibidas de la señal, de forma que no sólo se evita que interfieran, sino que además pueden combinarse y lograr así una forma de diversidad, mejorando la calidad de recepción.
- Baja probabilidad de interceptación: Debido a que la señal DS-CDMA utiliza una señal completa todo el tiempo, tendrá una muy baja potencia transmitida por Hz. Esto la hace difícil de detectar.
- Seguridad y privacidad: Inicialmente el espectro ensanchado se diseñó para su uso en aplicaciones militares, debido principalmente a la resistencia ante interferencias (*jamming*) producidas por el enemigo para perturbar o interrumpir las comunicaciones. La supresión de la interferencia hostil se basa en el uso códigos secretos desconocidos por el enemigo, por lo que en recepción se elimina toda la señal que no concuerde con el código adecuado. Los códigos son generados mediante complejos algoritmos criptográficos que garantizan la integridad del sistema.

En el transmisor de un sistema espectro ensanchado, se modula una señal portadora con una señal en banda base, utilizando cualquier modulación convencional, usualmente suelen usarse [1] PSK, BPSK, D-BPSK, QPSK y MSK, al mismo tiempo, se genera una señal pseudoaleatoria cuyo ancho de banda es mucho mayor que el de la señal útil, ya que se utiliza para ensanchar el espectro. La señal paso banda resultante de la primera modulación, es modulada otra vez utilizando el código de ensanchado.

En recepción se utiliza el mismo código idéntico al generado en el transmisor para demodular la señal recibida. Por último, la señal paso banda se demodula con la técnica que se haya elegido en transmisión.

La señal ensanchada $S(t)$ deberá conocer la secuencia de pseudo-ruido $C(t)$ y realizar la siguiente correlación:

$$\frac{2}{T_b} \int_0^{T_b} C(t) \cdot \cos(\omega_b t + \theta) \cdot S(t) \cdot dt = A \cdot d(t) \quad \{1. 2\}$$

Hay que tener en cuenta que en recepción, si se aplica la demodulación con la señal pseudoaleatoria a una señal que no ha sido previamente ensanchada, el efecto que se produce es el ensanchamiento. Debido a esto, la técnica de espectro ensanchado es muy resistente frente a interferencias de banda estrecha. Figura 1.10 muestra un esquema simple para el transmisor y el receptor de CDMA

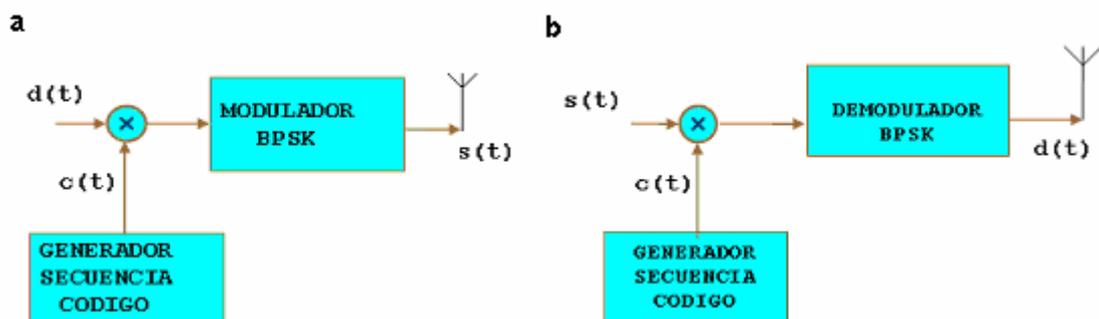


Figura 1.10: Esquema básico para (a): la transmisión; y (b): recepción en DS-SS-SSB

El aspecto temporal de esta señal ensanchada es una señal muy parecida al código pseudoaleatorio. El desensanchado se basa en multiplicar la señal ensanchada por el mismo código que se utilizó para su ensanchamiento. El efecto que se consigue

es el contrario al explicado en el párrafo anterior, consiguiendo, por tanto, recuperar la señal original.

En los sistemas de espectro ensanchado, al compartir todos los usuarios la misma banda de frecuencias, las señales ensanchadas se van superponiendo unas sobre otras en el espectro. Esto hace que, en recepción, todas las señales ensanchadas con códigos distintos al código de la señal a recibir, se comportan como interferencias para el sistema.

De esta forma, la E_b/N_0 conseguida en recepción será menor a medida que el número de usuarios conectados aumenta. Por ello se dice que estos sistemas son limitados en interferencia, ya que aunque existan recursos de potencia y códigos disponibles en las estaciones base, no se podrá permitir el acceso a más usuarios si este nuevo acceso produce una disminución en la calidad tal que la relación E_b/N_0 obtenida no supera la requerida por cada servicio.

En este tipo de sistemas se define un parámetro de gran importancia, denominado Ganancia de Proceso: $G_p = BW_C / BW_b$. Donde BW_b es el ancho de banda de la señal de información, y BW_C es el ancho de banda de la señal ensanchada.

En los sistemas UMTS, el valor de BW_b dependerá de la tasa binaria del servicio (8 ó 12.2 Kbps para voz, y 144, 384 ó 1920 Kbps para datos), mientras que BW_C está predeterminado por el ancho de banda destinado a los servicios de UMTS (3,84 Mchips/s, donde un chip es la unidad mínima de información después de ensanchar). Este parámetro determinará la protección del sistema frente a interferencias, así como el consumo de ancho de banda de la señal.

Si tomamos un ejemplo [7] con valores reales del servicio de voz en sistemas de WCDMA con tasa binaria de 12.2 kbps esto tendrá una ganancia de procesamiento igual a: $G_p = 10 \times \log_{10}(3.84 \times 10^6 / 12.2 \times 10^3) = 25 \text{ dB}$, este factor nos va a permitir que al desensanchar, el nivel de señal útil pueda estar muy por debajo del nivel de señales interferentes: $C/I = (E_b/N_0) - G_p = 5 - 25 = -20 \text{ dB}$. La E_b/N_0 utilizada es la típica para servicios de voz.

Las técnicas de espectro ensanchado utilizan modulaciones convencionales, habitualmente de fase o de frecuencia, cuyas prestaciones dependen de la relación energía por bit / densidad espectral de ruido (E_b/N_0). La relación E_b/N_0 necesaria se consigue en estos sistemas de espectro ensanchado gracias a la ganancia de procesamiento obtenida en el proceso de desensanchado en recepción.

Las secuencias de ensanchado se dividen en dos grandes grupos: ortogonales y no ortogonales, dentro de estas últimas se encuentran las de tipo pseudoaleatorio. Las pseudoaleatorias, como secuencias generables que son, carecen de un periodo infinito de repetición, de manera que se repiten al cabo de un tiempo determinado. Asimismo, aunque puedan exhibir buenas propiedades de correlación, el producto entre dos secuencias diferente no es exactamente cero.

Las propiedades de correlación están ligadas al número de chips que se multiplican. Esto plantea el problema del manejo de velocidades variables en banda base. Esta situación implica que la longitud del símbolo varía y con ello el número de chips que entran en la correlación. Para solventar este problema, se recurre a lo que se conoce como secuencias ortogonales de factor de ensanchado variable OVSF (*Orthogonal Variable Spreading Factor*). Se trata de secuencias ortogonales cuyo periodo puede variarse, de forma que éste se adapte a la duración del símbolo empleada en cada momento.

Las secuencias OVSF se obtienen según un esquema con forma de árbol. Partiendo de una secuencia de factor de ensanchado uno, es decir de la misma velocidad que la señal original, se derivan dos ramas correspondientes a una pareja de secuencias de factor de ensanchado dos. De cada una de ellas se derivan a su vez dos secuencias de factor cuatro y así sucesivamente.

Una propiedad muy importante de dichas secuencias es que considerando una secuencia concreta, todas las secuencias que de las que ella derive y las que deriven de ella no serán ortogonales entre sí. Dicho de otro modo, una vez seleccionada una secuencia, no es posible seleccionar ninguna que pertenezca a alguna rama ligada a dicha secuencia.

Por ello, los sistemas que recurren a las secuencias OVSF, como es el caso de UMTS; han de disponer de algoritmos que asignen las secuencias de la forma más eficiente posible, procurando aprovechar al máximo el árbol.

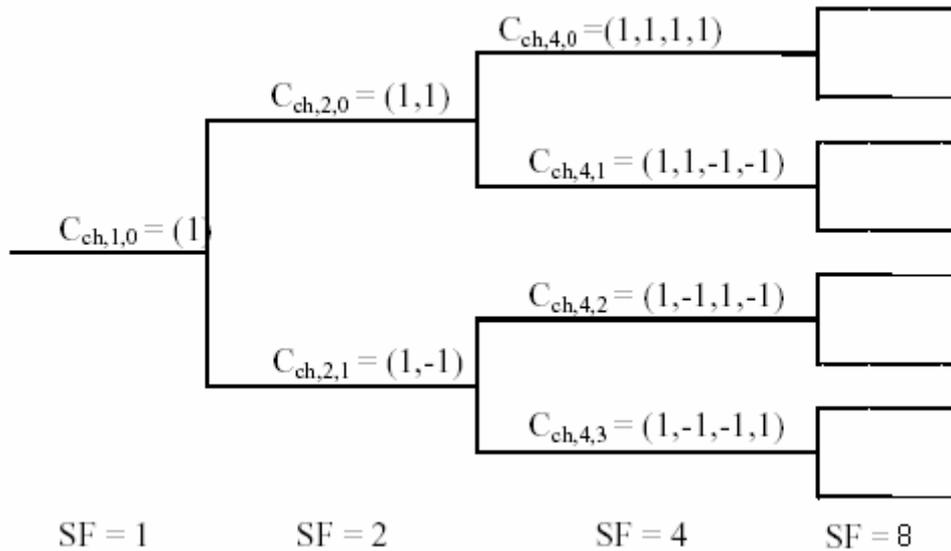


Figura 1.11: Árbol de códigos OVSF

Este árbol de códigos [8] podrá ser utilizado de forma total e independiente por cada una de las fuentes (estación base o terminal móvil), ya que cada una de ellas codificará adicionalmente con un código de *scrambling* distinto, (a continuación se comenta cómo se separan los usuarios en UMTS), permitiendo así la reutilización completa del árbol de códigos OVSF. De esta forma, no es necesario coordinar el uso de los recursos del árbol de códigos entre diferentes terminales móviles y estaciones base.

En UMTS, el ensanchado se realiza en dos fases (ver figura 1.12), a partir de dos secuencias código distintas:

- Códigos de *spreading* o canalización, que realizan un primer ensanchado sobre la señal de información. Estos códigos son ortogonales entre sí, por lo que permitirán discriminar la información contenida en una misma banda espectral a partir de esta secuencia de ensanchado.

- Códigos de *scrambling* o aleatorización, que se aplican sobre la señal ensanchada anteriormente, proceso que no supone ningún ensanchamiento sobre la señal, la cual mantiene su ancho de banda. Estos códigos no son perfectamente ortogonales entre sí, aunque su uso es especialmente interesante para poder distinguir las señales provenientes de fuentes diferentes, como se comenta a continuación.

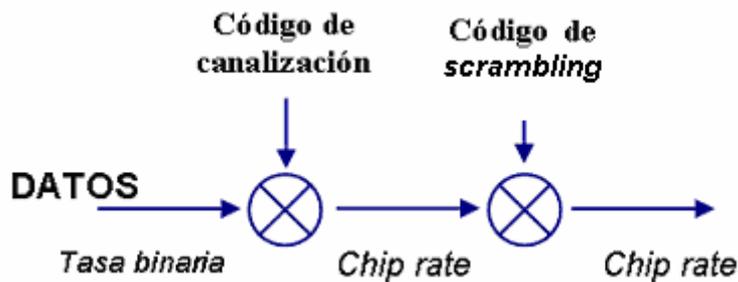


Figura 1.12: Relación entre Spreading y scrambling

Los sistemas UMTS utilizan la técnica de duplexado FDD, es decir, las comunicaciones del enlace ascendente (*uplink*) y descendente (*downlink*) se realizan en bandas de frecuencia diferentes. Asimismo, la función de las diferentes secuencias de códigos es distinta para cada uno de los enlaces como se ve en la siguiente tabla:

Tabla 1.2: Función de los códigos en cada sentido en WCDMA

Enlaces ↑ ↓	Spreading	Scrambling
Enlace ascendente	Identifica canales de un mismo usuario (datos, control,...)	Identifica usuarios
Enlace descendente	Identifica usuarios de la misma celda	Identifica celdas del sistema

Entre todas las tecnologías consideradas, el ETSI ha elegido, para la interfaz aire de UMTS, la nueva WCDMA considerando tanto la técnica de duplexado FDD como la TDD, a continuación mostramos las principales características de esta tecnología.

1.6 W-CDMA Principales características

En el sistema UMTS se emplea WCDMA, que es una tecnología de interfaz de radio de banda ancha que se van a emplear en los sistemas de tercera generación. Vamos a comentar ahora sus principales características, para profundizar después en aquellos aspectos que tienen relación con el objetivo final de esta tesis.

- WCDMA es un sistema de acceso múltiple por división de código de secuencia directa (DS-SS-SS). La señal de información es ensanchada con una secuencia pseudoaleatoria formada por bits (a los que llamaremos chips) con una tasa de 3.84 Mcps.
- El ancho de banda por portadora se aproxima a los 5 MHz.
- Las tasas binarias que soporta son muy variables. Cada usuario hace uso de una trama de 10 ms, en la que la tasa binaria permanece constante. El sistema debe de tener un sistema del control de la capacidad que está siendo utilizada, con el fin de maximizar el *throughput* de la red.
- Tiene dos modos básicos de operación: FDD y TDD.
- No necesita que sus estaciones base estén sincronizadas. El sistema IS-95 (2ª G), necesitaba de una señal GPS para sincronizar sus estaciones base lo que dificultaba el uso de micro y picoceldas.
- Emplea detección coherente tanto en el uplink como en el downlink, basada en el uso de símbolos piloto o piloto común.
- Está preparado para el uso de métodos que favorezcan la recepción como detección multiusuario o el uso de antenas adaptativas inteligentes (los receptores Rake son un ejemplo). Esto permite mejorar el funcionamiento del sistema en cuanto a capacidad y/o cobertura.
- El interfaz está preparado para funcionar en conjunción con redes GSM.

1.6.1 Efecto multicamino y el receptor RAKE

La propagación radio en sistemas móviles terrestres está caracterizada por la existencia de múltiples reflexiones, difracciones y atenuación de la energía de la señal. Todos estos efectos son causados por obstáculos naturales y edificios, produciendo la denominada propagación multicamino o multitrayecto (en el próximo capítulo hablamos en más detalle sobre estos efectos). La propagación multicamino (ver figura 1.13) produce dos efectos importantes sobre las señales:

- La señal llegará al receptor con retardos temporales distintos, dependiendo del trayecto que siga.
- Dado un cierto retardo temporal, hay varios trayectos, muy similares en distancia, que puede recorrer la señal, produciendo un cambio de fase sobre la misma. Esto se traduce en una posible suma destructiva de las componentes multicamino.

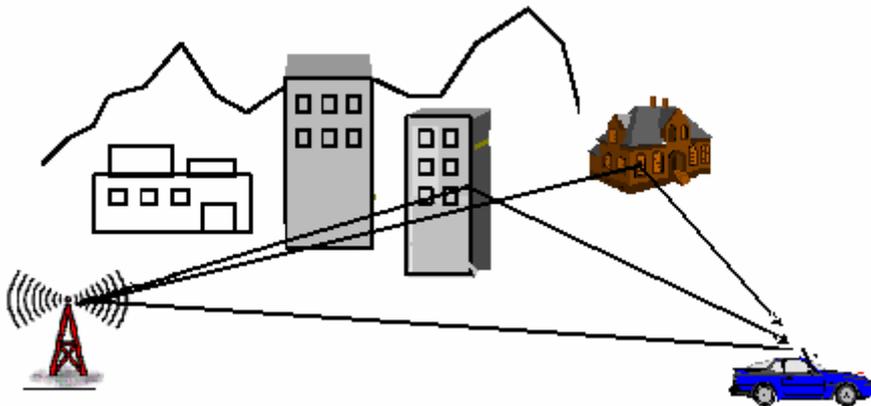


Figura 1.13: Un ejemplo del efecto multicamino

En un canal multicamino, como lo es el canal móvil, la señal transmitida incide en numerosos obstáculos, los cuales producen alteraciones a la señal original, de modo que el receptor recibe varias copias de la señal original con distintos retardos y niveles medios de potencia. Si estas señales llegan separadas al menos la duración de un chip del código el receptor puede distinguirlos. En este momento, desde el punto de vista multicamino, estas señales retardadas pueden ser consideradas como interferencia y por tanto suprimidas en el proceso de 'desensanchado', como ya se vio anteriormente. Sin embargo se puede conseguir un beneficio aún mayor si en vez de

descartar estas copias se las combina utilizando el receptor RAKE, ya que la forma de onda de W-CDMA facilita la utilización de la diversidad multicamino.

El receptor RAKE consiste en un banco de correladores, cada uno de los cuales recibe una señal multicamino. Después de ‘desensanchar’ la señal con los correladores, ésta es combinada usando, por ejemplo, un combinador de máximo ratio. La mejora se obtiene debido a que el “*fading*” o desvanecimiento sufrido por cada una de las señales multicamino es independiente del resto, ya que han seguido distinto camino desde el transmisor y el receptor. La siguiente figura ilustra el principio del receptor RAKE [9]:

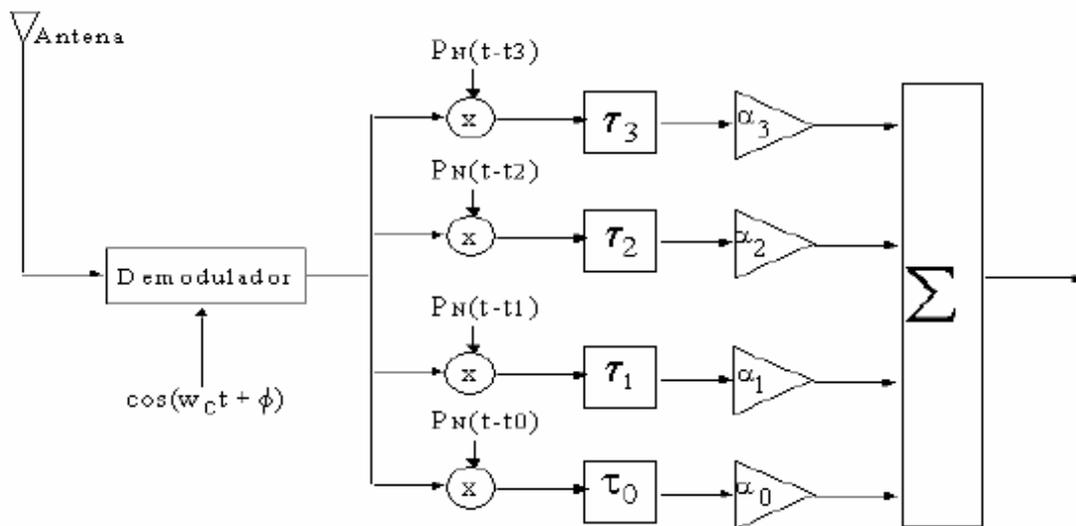


Figura 1.14: Esquema del receptor RAKE de 4 ramas

Después de ensancharse y modularse la señal transmitida pasa a través de un canal multicamino, el cual se puede modelar como una etapa de retardo y un atenuador, independientes para cada uno de los caminos que siga la señal. El receptor RAKE tiene una rama, también llamada “*finger*” para cada uno de esos caminos. En cada rama, la señal recibida es correlada por un código ensanchador, el cual está alineado en el tiempo con el retardo de la señal multicamino. Después de desensanchar las señales, éstas son amplificadas y combinadas. En la figura se utiliza la combinación de máximo ratio.

Debido al movimiento del móvil, el “*scattering*” del entorno varía y con él los retardos y atenuaciones del canal. Por ello es necesario medir los parámetros del

canal y modificar las ramas del receptor RAKE si los cambios son significativos. Cambios de pequeña escala (menores que un chip de duración) son tomados en cuenta por un bucle de seguimiento de código, el cual sigue el retardo de cada una de las señales multicamino.

1.6.2 Control de potencia

Para evitar que ningún terminal móvil, pueda dejar fuera de servicio a una celda debido a su proximidad a la estación base, se utiliza lo que conocemos por control de potencia. La misión principal de este proceso es conseguir que las señales recibidas en la estación base, procedentes de cada móvil, tengan aproximadamente el mismo nivel (ver figura siguiente)

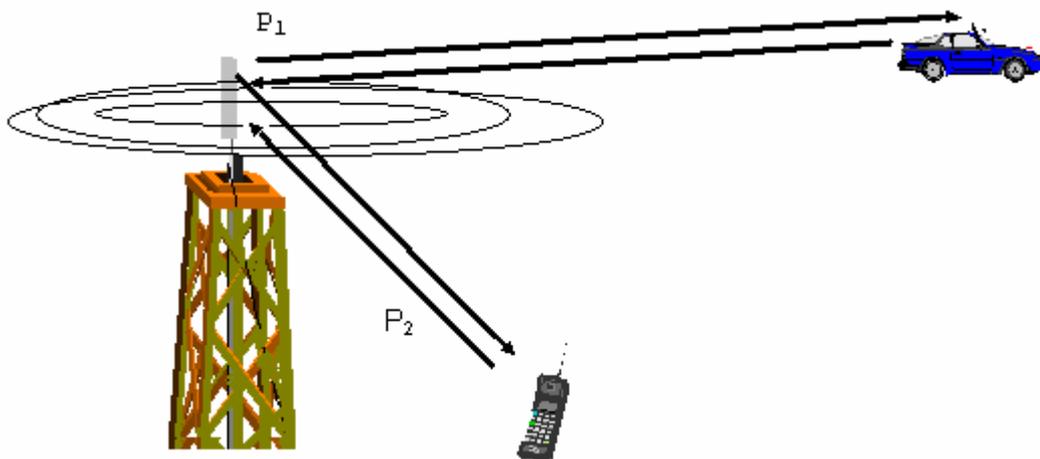


Figura 1.15: Esquema del control de potencia; P_1 y P_2 tienen aproximadamente el mismo nivel.

Frente al control de potencia en lazo abierto utilizado por sistemas como el IS-95, WCDMA utiliza un control de potencia en lazo cerrado de alta velocidad. El método utilizado consiste en:

- Para cada móvil, la estación base obtiene la S/I en recepción.
- Compara este valor con una S/I modelo, que llamaremos S/I_{target}
- Si el valor recibido es menor que el esperado, le indica al terminal móvil que tiene que aumentar su potencia. En caso contrario, le indica al móvil que reduzca su potencia de transmisión

Este proceso se ejecuta con una frecuencia de 1.5 KHz. El funcionamiento del control de potencia en lazo abierto consiste en la estimación de las pérdidas de propagación en el canal, por parte del terminal móvil. En función de esta estimación el terminal emite con mayor o menor potencia. El principal problema de este método es que al estar tan separados en la frecuencia el UL y el DL, la correlación es casi nula. Este hecho nos impide suponer que las pérdidas en el downlink (que son las que mide el móvil), serán las mismas que las del uplink (que son las que se deben corregir con el control de potencia).

Aun así, el control de potencia en lazo abierto se utiliza en WCDMA en el inicio de las conexiones, para obtener una estimación inicial, pasando en ese momento a utilizar el control de potencia en lazo cerrado. Existe otro control de potencia en WCDMA, que es el llamado control de potencia en lazo externo. Este control se realiza entre la RNC y la estación base. Su misión es la de obtener la S/I_{target} , en función de parámetros de calidad que suelen ser FER (*Frame Error Rate*) o BER (*Bit Error Rate*).

1.6.3 Mecanismos de *Handover*

UMTS - UTRA está destinado a usuarios móviles, que pueden desplazarse mientras están transmitiendo y recibiendo información. Dado que es un sistema celular, en multitud de ocasiones el abonado que está haciendo uso de la red cambiará de localización y por tanto, de célula. Estos cambios de célula se denominan traspaso o *Handover*.

Durante un *handover*, los enlaces radio y las conexiones han de ser cambiados desde la célula o sector actual hasta la célula o sector destino. Se han de liberar todos los recursos empleados en la célula antigua y han de reservarse los mismos en la célula destino, de forma que no se interrumpan las posibles comunicaciones activas por parte del abonado.

La utilización de técnicas de espectro ensanchado tiene dos peculiaridades. En primer lugar, hace que todas las células empleen todas las frecuencias disponibles, por lo que un usuario puede estar monitorizando una célula adyacente mientras se comunica a través de otra célula. En segundo lugar, el área de cobertura de las células es variable y está delimitada por la interferencia y por el número de usuarios. Este

efecto, el *cell-Breathing* o respiración celular, puede provocar el cambio de célula incluso si el usuario no se desplaza.

Este caso se da cuando un usuario que se encuentra cerca del límite de cobertura de la célula accede a la Red en situaciones de baja carga de tráfico. Si el número de usuarios de la célula aumenta o se incrementan los requerimientos de tráfico de los abonados, la célula disminuirá su tamaño. El efecto es el mismo que si el abonado se fuese alejando de la estación base, llegando a ser necesario un *handover* o cambio de célula.

UMTS permite realizar cambios entre células que empleen el mismo método de acceso, entre células que usen UTRA-TDD y UTRA-FDD e incluso entre células GSM y células UMTS. En este último caso, si el destino es una célula GSM, no es posible mantener la totalidad de los servicios, siendo conservados los que pueda satisfacer la red GSM.

Existen tres tipos distintos de *Handover* en UTRA son:

- *Soft Handover*
- *Softer Handover.*
- *Hard Handover.*

1.6.3.1 Soft Handover

En el Soft Handover, el terminal móvil está en el área de cobertura de dos o más estaciones base. Como todas emplean la misma portadora, el terminal puede monitorizar sus códigos. Cuando ha de producirse el cambio de célula, permanece durante un tiempo conectado a las dos o más estaciones base a la vez.

El principal propósito del soft handover es hacer uso de la macrodiversidad, que evita situaciones como los desvanecimientos de la señal. Al estar conectado a más de una estación base, el terminal se asegura caminos alternativos para las comunicaciones.

1.6.3.2 Softer Handover

Como caso particular del Soft Handover, El Softer Handover se da cuando el cambio se produce entre dos sectores de la misma estación base.

1.6.3.3 Hard Handover

Si que el terminal realiza un handover que implique un cambio en la frecuencia empleada o una adquisición de códigos se denomina Hard Handover. Este tipo de handover se da principalmente cuando en la célula destino no emplea la misma técnica de acceso que la célula origen o pertenece a otra red distinta.

1.7 Estado del arte en planificación de sistemas de 3G

Actualmente se encuentra en fase de despliegue el nuevo estándar para la interfaz radio de los sistemas móviles de tercera generación, denominados UMTS. Esta interfaz utiliza técnicas de acceso múltiple distintas a las de los sistemas de segunda generación como GSM, por lo que la metodología de planificación de la red radio utilizada hasta ahora no es válida.

Dentro de los estándares de acceso radio IMT2000, el primero que se va a implementar es el denomina UTRA-FDD y es, en esencia, un sistema CDMA de banda ancha, con la complicación adicional de soportar distintos tipos de servicios que tienen diferente tasa binaria (de 8 kbit/s a 2 Mbits/s) y modo de transferencia (circuito y paquete). Asimismo existe otra versión con multiplexación de los enlaces ascendentes y descendentes en el tiempo; UTRA-TDD, y aun está en desarrollo.

La planificación radio en UMTS tiene por finalidad realizar los cálculos de cobertura y capacidad, con objeto de optimizar el despliegue de las estaciones bases y así cumplir los objetivos de calidad de servicio establecidos por el operador. El proceso de planificación es diferente según la modalidad de explotación: en FDD o en TDD.

La explotación del modo TDD parece que, inicialmente, estará limitada a escenarios de interiores y zonas restringidas, por lo que la planificación será un proceso "a la medida", que dependerá estrechamente de las zonas elegidas (topografía, características de propagación, distribución de tráfico, etc.).

Como no parece inminente la utilización de TDD en la primera fase de operación del UMTS, en lo que sigue, se presentará únicamente la metodología de planificación para el modo FDD.

Conviene advertir que siendo WCDMA una tecnología nueva y compleja; la metodología de planificación no está cerrada. En muchos casos, la complejidad del análisis teórico de los modelos del sistema radio es tal, que no existen soluciones en forma de funciones matemáticas, por lo que normalmente se recurre a la realización de simulaciones por ordenador o se efectúan simplificaciones para obtener las estimaciones de capacidad.

Por otro lado, la estrategia de despliegue en un sistema WCDMA es bastante compleja y presenta aún importantes incertidumbres.

En un sistema TDMA, como el GSM, el primer paso en la planificación puede ser garantizar unos determinados objetivos de cobertura. A medida que aumenta la demanda de tráfico, se puede aumentar la capacidad del sistema añadiendo más portadoras a los emplazamientos instalados, con el límite que impone el plan de frecuencias (es decir, la reutilización permite garantizar una determinada calidad de servicio, así como el número de portadoras disponibles). Eventualmente, la capacidad puede incrementarse con estructuras más densas.

En un sistema CDMA la situación es más compleja, ya que tanto la cobertura como el tráfico cursado (no solo la cantidad, sino también el tipo de tráfico: de voz de datos; así como la distribución geográfica de los usuarios) están ligados. A medida que el tráfico por estación crece, los radios de cobertura efectivos de las estaciones empiezan a disminuir. Esto quiere decir que un determinado despliegue, para garantizar unos objetivos de cobertura, solo será efectivo si el tráfico cursado se ajusta a los parámetros de diseño.

Cuando la demanda de tráfico supera el nivel planificado, no es posible garantizar la cobertura. Esta situación puede resolverse de dos formas [10]:

- Añadiendo una portadora más (con lo que el tráfico por portadora disminuye y se incrementa la cobertura).
- Densificando la estructura celular.

Ambas soluciones tienen sus ventajas e inconvenientes.

Respecto de la primera, hay que tener en cuenta que el número de portadoras disponibles para cada operador es escaso (tres como máximo). Instalar una segunda portadora en un emplazamiento supone, para los mismos objetivos de cobertura y grado de servicio, incrementar la capacidad del mismo en algo más de 100 por ciento. Pero el principal problema radica en las dificultades que entraña para un sistema CDMA el traspaso entre las distintas frecuencias, que exige trabajar en modo comprimido, por lo que conviene limitar en la medida de lo posible las zonas en las que debe producirse. Por tanto, no es una buena solución para proporcionar capacidad, cuando el crecimiento de la demanda se produce en zonas puntuales (*hotspots*), pero puede serlo si el tráfico crece de forma más o menos uniforme en una zona más extensa.

El principal inconveniente de la segunda opción es su mayor coste económico. Por otro lado, el proceso de densificación debe realizarse procurando situar los nuevos emplazamientos allí donde se genera la demanda, si se quiere optimizar la eficiencia espectral.

Una estructura jerárquica (macrocelular/microcelular) con distintas frecuencias plantea los mismos problemas que se comentan más arriba, además de otros adicionales, como es la posibilidad de que se produzcan interferencias de canal adyacente (si las frecuencias de cada capa lo son), cuando, por ejemplo, un móvil conectado a una macrocélula se encuentra muy próximo a una microcélula. En cualquier caso, parece conveniente que en una capa microcelular, superpuesta con otra macrocelular, se cursen servicios de alta tasa binaria, en los que la probabilidad de salir de la zona de cobertura sea reducida.

Por todas estas razones, resulta básico poder disponer de herramientas de planificación que permitan al operador de red realizar un diseño óptimo de ésta, optimizando también la eficiencia espectral y la calidad de servicio ofrecida.

Tradicionalmente, la planificación de sistemas de radio comunicaciones (entre los que se encuentran los sistemas celulares) se ha hecho utilizando cartografía impresa. Esto supone un trabajo costoso y con unos resultados de baja precisión. Las

redes celulares son, además, sistemas limitados por interferencias, lo que, unido a la creciente demanda, obliga al uso de métodos más eficientes [11].

En la actualidad existen multitud de herramientas informáticas de planificación celular que superan la falta de eficiencia de los métodos manuales. Algunas herramientas como por ejemplo [12], [13] están basadas en la predicción de la propagación para luego determinar estructuras celulares, cálculo de interferencia, etc.

En los sistemas de segunda generación la planificación se solía hacer en dos fases: cobertura y plan de frecuencia. Sin embargo, de cara a la tercera generación, los requisitos de capacidad deben ser considerados desde el principio.

Teniendo todo esto en cuenta, resultan especialmente atractivas aquellas herramientas que están basadas en GIS, ya que consiguen con facilidad manejar grandes volúmenes de datos, gestionar librerías de mapas y enlazar con bases de datos externas [14]. De esta manera mostramos, en el capítulo 4, nuestro modelo de planificación de sistemas de tercera generación que se basa en Sistemas de Información Geográfica.

Muchos artículos publicados tratan el tema de capacidad en sistemas CDMA en distintas maneras como por ejemplo la estructura celular utilizada, el escenario, parámetros de *handover*, ortogonalidad de los códigos, calidad requerida en términos de (E_b/N_0) , control de potencia, etc. Se presenta a continuación un resumen de algunos estudios publicados en la literatura técnica relacionada con la capacidad de sistemas CDMA.

El análisis clásico de capacidad en [15] enfocado a IS-95 suponiendo una distribución de usuarios determinista y uniforme, y modela como fenómenos aleatorios el *shadowing* y la actividad vocal.

En [16] se modelan el desvanecimiento multitrayecto con distribución Rayleigh y la diversidad de antena y en [17] considera los efectos de desvanecimiento lento y multitrayecto del canal, modelando los procesos de codificación, modelación, y control de potencia de IS-95 mediante simulaciones.

En [18] se expone la mejora en capacidad en sistemas CDMA desde el punto de detección multiusuario.

En [19] se analiza el comportamiento de algoritmos de control de potencia en un canal variante multitrayecto sobre la relación (E_b/N_0) requerida y su efecto sobre la capacidad.

En [20] se analiza los efectos de la utilización de antenas inteligentes sobre la capacidad de sistemas CDMA.

En [21] se analiza el efecto de *soft* y *softer handoffs* sobre la capacidad de sistemas CDMA considerando la sectorización de celdas hexagonales para ciertos valores de (E_b/N_0) y en [22] se muestra la optimización de la eficiencia del enlace descendente en sistemas CDMA mediante la utilización de técnicas de diversidad de selección de la estación base denominadas SSDT.

En [23] se muestra el efecto de la correlación entre trayectos de las señales recibidas desde dos estaciones base teniendo en cuenta la diferencia de ángulos de llegada y la distancia entre el terminal móvil y las estaciones conectados a esta móvil de forma analítica. El estudio de [24] utiliza las mismas ecuaciones de [23] para modelar el efecto de *cross-correlated shadowing* matimaticamente llegando a las mismas conclusiones que hemos obtenido (ver capítulo 6) con pocas variaciones respecto a los resultados de esta tesis.

Las consideraciones anteriores muestran la necesidad de un estudio que tenga en cuenta el efecto de la correlación entre trayectos de las señales recibidas desde varias estaciones en un mismo terminal sobre la capacidad del sistema, además de la ya mencionada conveniencia de utilizar herramientas basadas en GIS.

2

Características del canal móvil

2.1 Introducción

Resulta imprescindible para una herramienta de planificación de sistemas de telefonía móvil celular poseer algoritmos de propagación puesto que éstos constituyen el armazón de tales herramientas, ya que el cálculo básico consiste en la estimación de las pérdidas de propagación dentro de un entorno de análisis a partir de algunos parámetros tales como altura de la antena transmisora, información del terreno y/o edificios, etc. A partir de esta predicción se puede realizar una aproximación de la cobertura ofrecida por una determinada estación base dentro de la zona bajo estudio. Esto supone un aspecto muy significativo en la labor de la planificación que veremos en el capítulo 4 de esta tesis.

En este capítulo se pretende dar una visión global sobre el canal radio móvil. En primer lugar se definen los problemas que sufre el canal móvil en un entorno real y se presentan los parámetros que afectan al canal móvil. En segundo lugar se describe los modelos de propagación que fueron utilizados en esta tesis.

2.2 Modelado del canal móvil

La calidad de la comunicación de un sistema móvil celular depende del entorno próximo a las estaciones base y a los usuarios del sistema. Los entornos urbanos, suburbanos, y rurales presentan elevada complejidad desde el punto de vista geométrico debido al diverso número de accidentes geográficos y obstáculos que están implicados: montañas, mar, colinas, edificios, árboles, mobiliario, etc. Por otra

parte, algunos de ellos son objetos móviles tales como automóviles y personas, que están implicados en el fenómeno de la propagación, aunque cada uno tiene una influencia distinta. Debido a ésta, sin ciertas simplificaciones, la propagación radio en tales entornos es muy difícil de simular.

La propagación de radio es una de las áreas científicas más importantes del sector de la telecomunicación que determina en muchos casos la calidad del servicio predefinido correspondiente a la comunicación.

En los sistemas de comunicaciones móviles, el canal radio introduce limitaciones muy importantes, debido al desplazamiento del receptor móvil. Por este motivo, el enlace entre transmisor y receptor puede pasar de ser un enlace con visión directa a estar obstruido por los obstáculos del entorno. Además, pueden llegar al receptor múltiples contribuciones por caminos diferentes, debido a uno o varios de los mecanismos de propagación. Este comportamiento aleatorio del canal radio incrementa la complejidad de su análisis.

Los mecanismos básicos de propagación en comunicaciones móviles son: la recepción de la señal de forma directa, y los fenómenos de reflexión, difracción y dispersión o *scattering*.

La reflexión se produce cuando una onda electromagnética incide sobre un objeto cuyas dimensiones son grandes en comparación con la longitud de onda asociada a la señal. Este fenómeno tiene lugar, por ejemplo, en la superficie de la Tierra y en las paredes de los edificios.

La difracción tiene lugar cuando el enlace entre el transmisor y el receptor se encuentra obstruido por irregularidades agudas (como por ejemplo, montañas, aristas de los edificios o colinas), provocando la existencia de señal detrás del obstáculo, aunque no se tenga línea de visión directa en el enlace.

Finalmente, la dispersión o *scattering* se produce cuando el medio por el que viaja la señal tiene, por unidad de volumen, un gran número de objetos de dimensiones pequeñas con respecto a la longitud de onda de la señal. Las ondas dispersadas pueden ser originadas por superficies rugosas, así como por irregularidades presentes en el canal, tales como árboles o farolas, por ejemplo.

Estos mecanismos, son independientes entre sí. Debido a esto, al receptor móvil le llegan contribuciones de señal que han recorrido caminos diferentes (distancias distintas), en instantes de tiempo distintos (diferencias de fase) y con atenuaciones diferentes (diferencias de amplitud), pudiendo alterarse incluso la polarización de la onda recibida.

Como consecuencia de esta propagación multicamino, se tienen en el receptor contribuciones de muy diversa índole (amplitud, fase y polarización) que según la posición del móvil pueden sumarse en fase o en contrafase, originando, en este último caso desvanecimientos a corto plazo (*short-term fading*) que pueden alcanzar los 30 ó 40 dB. Este comportamiento suele modelarse estadísticamente.

En la figura 2.1 vemos dónde se pueden apreciar estos desvanecimientos en las variaciones rápidas del nivel de potencia a medida que el móvil se desplaza. En la figura se aprecia además un segundo aspecto, una media local en torno a la cual se producen las variaciones rápidas, y que varía más lentamente en función de la distancia recorrida (la media local está representada por una línea de trazo grueso). Esta variación más lenta o desvanecimiento a largo plazo (*long-term fading*), es debida al cambio del entorno en el que se produce la propagación al desplazarse el receptor móvil.

Los modelos de propagación que veremos más adelante, intentarán predecir el valor medio de la potencia de señal recibida, ignorando la variación rápida de la señal, algo inherente a la señal recibida en los sistemas de comunicaciones móviles. Este tipo de modelos se suelen denominar como modelos a gran escala.

A continuación, veremos de manera un poco más detallada cada uno de los mecanismos básicos de propagación.

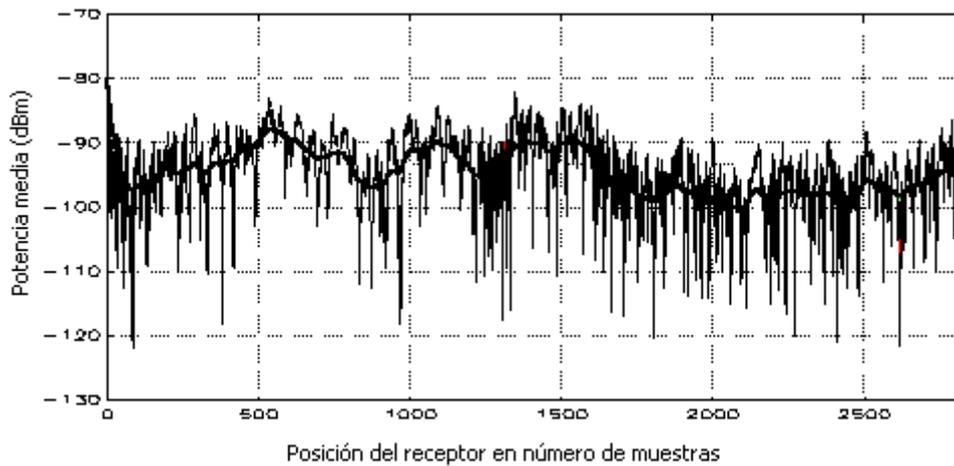


Figura 2.1: Desvanecimientos a corto y largo plazo.

2.2.1 Propagación en espacio libre

Este mecanismo viene determinado por la atenuación que sufre la señal radio, por el hecho de propagarse, aunque no existan obstáculos en su camino. Esta atenuación se incrementa al aumentar la distancia recorrida.

En condiciones de espacio libre, esto es, sin elementos del entorno que incidan en la propagación, éste será el único término de pérdidas a tener en cuenta, y la potencia recibida en un punto podrá expresarse por medio de la ecuación de Friis, que vemos en la expresión {2.1}. Esta ecuación predice que el nivel de potencia recibida (P_r) decae con el cuadrado de la distancia entre transmisor y receptor (d), y que es directamente proporcional a las ganancias de las antenas transmisora (G_t) y receptora (G_r), a la potencia transmitida (P_t), y al cuadrado de la longitud de onda de la señal (λ).

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \quad \{2.1\}$$

Las pérdidas de propagación en condiciones de espacio libre (L_0), representan la atenuación de la señal, y se definen como la diferencia, en unidades logarítmicas, entre la potencia transmitida y la potencia recibida. Este parámetro, por lo general, no suele incluir las ganancias de las antenas. Las pérdidas aumentarán (las definimos como una cantidad positiva en dB), de acuerdo con la ecuación de Friis, con el

cuadrado de la distancia. La siguiente expresión describe estas pérdidas de propagación en espacio libre:

$$L_0(dB) = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = -10 \log \left[\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right] \quad \{2.2\}$$

Esta ecuación {2.2} se puede expresar en función de la frecuencia y poner los valores de los términos en unidades prácticas, obteniendo la expresión que emplearemos en los modelos de propagación que veremos posteriormente, y que es la siguiente:

$$L_0(dB) = 32.54 + 20 \log f(\text{MHz}) + 20 \log d(\text{Km}) \quad \{2.3\}$$

2.2.2 Reflexión

Cuando una onda de radio propagándose por un medio incide sobre otro medio con propiedades eléctricas distintas, parte de la onda incidente se refleja y parte se transmite en el segundo medio. Si la onda incide sobre un dieléctrico perfecto (sin pérdidas), no se producen pérdidas por absorción en el dieléctrico; mientras que si el segundo medio es un conductor perfecto, toda la energía se refleja al segundo medio (sin pérdidas de energía). El ángulo que forma la onda reflejada con la superficie, se puede demostrar que es el mismo que forma la onda incidente.

Un modelo sencillo que describe la reflexión es el modelo de dos rayos, que asume tierra plana (distancia entre transmisor y receptor menor de 30 Km), y que puede aplicarse para predecir el nivel de señal recibido en entornos abiertos o rurales, entornos urbanos e incluso sistemas microcelulares. El modelo considera dos contribuciones, el rayo directo entre transmisor y receptor, y el reflejado (en el suelo o en un obstáculo). Esta situación se puede observar en la figura 2.2, donde hemos supuesto que la reflexión se produce en el suelo.

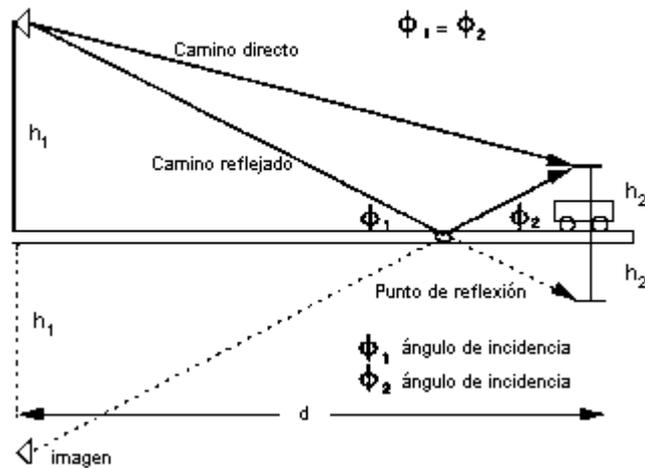


Figura 2.2: Modelo de dos rayos

Los dos rayos recorren caminos de longitud diferente, lo que supone una diferencia en la amplitud de los rayos, que se puede despreciar en este modelo, y también una diferencia de fase, que sí será crítica para el nivel de campo total en el punto receptor. Además, la reflexión vendrá caracterizada por el llamado coeficiente de reflexión de Fresnel, que en este caso se aproximará a un valor de -1 asumiendo como hipótesis una incidencia rasante (la altura de las antenas transmisora y receptora es mucho menor que la distancia recorrida por los rayos). Tras un proceso que podemos ver en [25], el resultado es la siguiente expresión para el campo total recibido:

$$E_T = 2|E_{directo}| \left| \text{sen} \left(2\pi \frac{h_1 h_2}{\lambda d} \right) \right| \quad \{2.4\}$$

El módulo del campo eléctrico total tendrá el siguiente comportamiento: para distancias pequeñas presentará oscilaciones sinusoidales acordes con la expresión obtenida. A medida que aumenta la distancia, dichas oscilaciones van haciéndose más lentas, hasta que se alcanza un valor máximo de distancia (aquella distancia que hace que el argumento del seno sea igual a $\pi/2$), a partir del cual desaparecen las oscilaciones y el campo recibido decae con la distancia al cuadrado. Conviene destacar este hecho frente al caso anterior de propagación en espacio libre, en que el campo disminuye proporcionalmente con la distancia.

Hasta ahora hemos considerado que la Tierra era plana. Cuando esto no ocurre se originan a varias ondas reflejadas, como se aprecia en la figura 2.3.

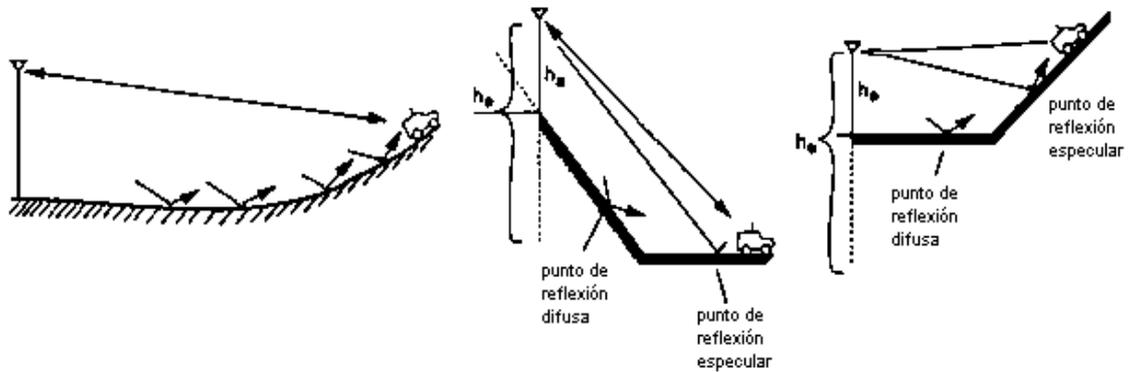


Figura 2.3: Reflexión en tierra no plana

La reflexión que se produce más cerca del móvil se denomina especular, y es la que aporta mayor energía. La reflexión que tiene lugar en la zona más alejada del móvil, se denomina difusa, y en ciertos casos puede despreciarse. El cálculo del punto en el que se produce la reflexión especular se puede realizar con el modelo a dos rayos, comentado anteriormente para tierra plana, pero considerando alturas efectivas en lugar de las alturas reales, tal y como podemos observar en la figura 2.3.

Hasta este momento no hemos tenido en cuenta el efecto de la curvatura de la Tierra, ya que hemos considerado que la distancia entre transmisor y receptor era menor de 30 Km. Sin embargo, a medida que la distancia aumenta, este efecto debe tenerse en cuenta.

Además, debido a la refracción atmosférica (el índice de refracción cambia en función de la altura en la troposfera), el rayo experimenta una curvatura. Para poder considerar el rayo como plano, debe emplearse un radio efectivo de la Tierra de valor KR_T (donde R_T representa el radio real de la Tierra, aproximadamente igual a 6370 Km., y K es un parámetro que tiene en cuenta la refracción y que normalmente tiene un valor igual a $4/3$). Se tiene una situación como la mostrada en la figura 2.4.

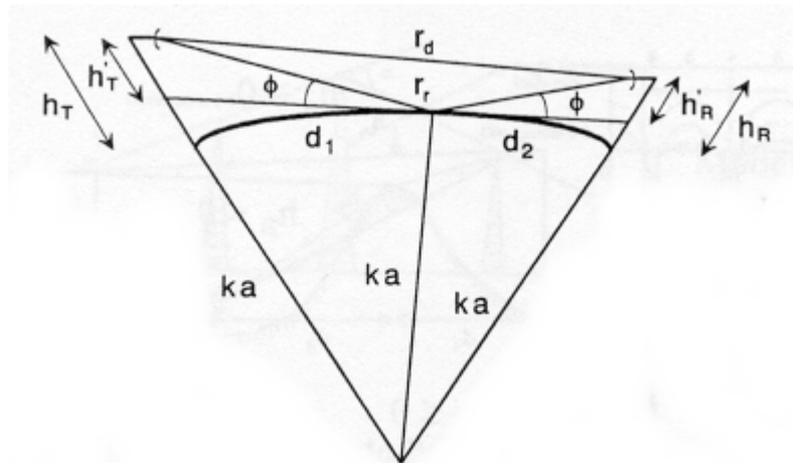


Figura 2.4: Efecto de la curvatura de la Tierra

Asumiendo que las alturas de la antena transmisora y receptora son mucho menores que la distancia del enlace, se puede resolver el problema de la reflexión con el modelo de dos rayos, pero considerando las alturas efectivas de las antenas:

$$h'_T \approx h_T - \frac{d_1^2}{2KR_T} \quad h'_R \approx h_R - \frac{d_2^2}{2KR_T} \quad \{2.5\}$$

Donde para obtener las alturas efectivas se ha hecho la aproximación de que las distancias d_1 y d_2 son mucho más pequeñas que el radio efectivo de la Tierra KR_T .

2.2.3 Difracción.

El mecanismo de la difracción posibilita que las señales de radio se propaguen más allá de los obstáculos físicos (colinas, montañas o edificios), así como del horizonte, superando la curvatura de la Tierra.

El fenómeno de la difracción se puede explicar mediante el principio de *Huygens*, según el cual cada elemento de un frente de ondas se comporta como una fuente puntual que genera ondas secundarias, cuya combinación genera un nuevo frente de ondas en la dirección de propagación. La difracción está constituida por esta propagación de ondas secundarias en la zona obstruida, y en el nivel de señal difractada en dicha zona se obtendrá sumando las componentes de campo eléctrico asociadas a las ondas secundarias que no son obstruidas por el obstáculo.

Las pérdidas por difracción se pueden determinar con ayuda de las zonas de Fresnel. Son zonas del espacio comprendidas entre elipsoides, cuyos focos son el transmisor y el receptor y definidos como el lugar geométrico de los puntos en los que la diferencia de fases entre la señal directa y la difractada es un múltiplo entero de $\lambda/2$ ($n\lambda/2$, con $n = 1, 2, 3, \dots$, para la 1ª, 2ª, 3ª... zona de Fresnel).

La zona de mayor interés es la primera zona de Fresnel (diferencia de fase de $\lambda/2$), pues la mayor parte de la energía se propaga por ella. Por ello, si no existe ningún obstáculo dentro del primer elipsoide, se considera que la propagación se efectúa en condiciones de visibilidad directa. En la figura 2.5 se aprecia la primera zona de Fresnel. El radio de los elipsoides se obtiene de la siguiente expresión:

$$R_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad \{2.6\}$$

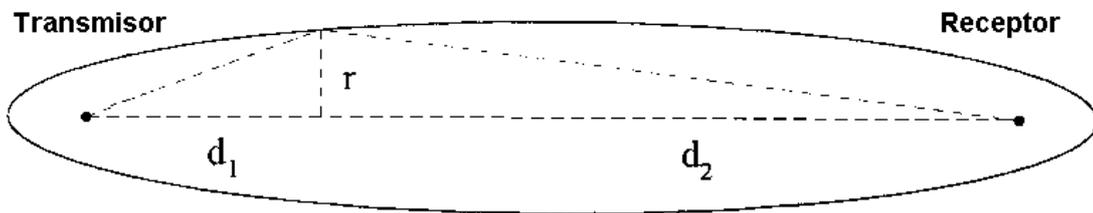


Figura 2.5: Primera zona de Fresnel

Para un obstáculo, se estiman las pérdidas por difracción en función del parámetro h / R_1 [25], tal y como aparece en la figura 2.6. El término R_1 es el radio de la primera zona de Fresnel, definido por la particularización de la ecuación {2.6} para el caso de $n = 1$. El parámetro h es el despejamiento y se define como la distancia entre el rayo y el obstáculo. El ITU considera, por convenio, que el despejamiento es positivo cuando hay obstrucción del rayo por parte del obstáculo y que es negativo cuando el rayo pasa por encima del obstáculo.

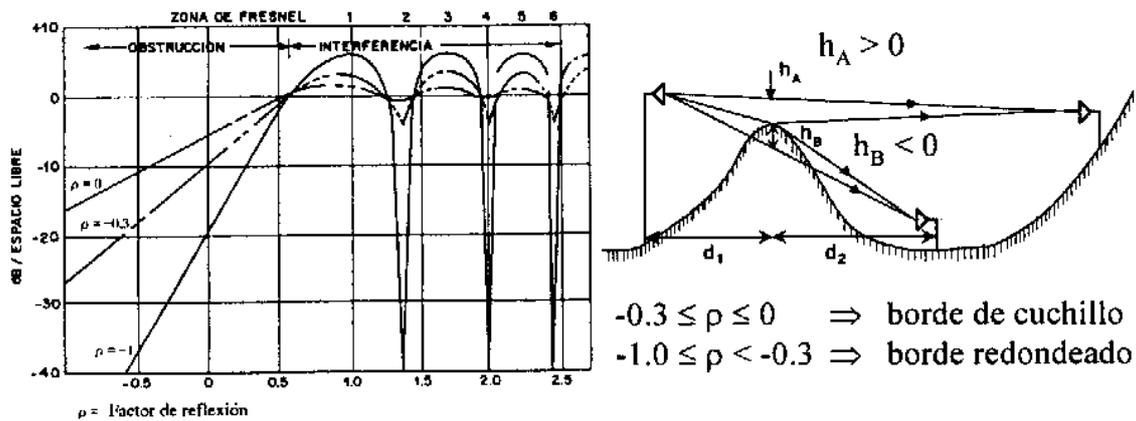


Figura 2.6: Pérdidas por difracción con respecto a pérdidas en espacio libre en función de h/R_1

En numerosas situaciones prácticas, el enlace entre el transmisor y el receptor se encontrará obstruido por más de un obstáculo. En este caso deben calcularse las pérdidas por difracción causadas por todos los obstáculos en conjunto. La estimación de las pérdidas de propagación puede realizarse de forma aproximada considerando un obstáculo equivalente a todos los presentes y calcular las pérdidas que provoca este único obstáculo a partir de la teoría desarrollada al efecto.

Esta solución simplifica notablemente los cálculos y ofrece resultados bastante aproximados al real. Otra aproximación, que proporciona resultados muy próximos al real, consiste en calcular por separado las pérdidas que provoca cada obstáculo, y tras ello, sumarlas para obtener las pérdidas totales por difracción. Se han estudiado otras soluciones con mayor rigor técnico que estas dos y mejores resultados, algunas de las cuales se pueden encontrar en [26] y [27].

Una de las características de los entornos urbanos, es que generalmente no existe visión directa en el enlace entre transmisor y receptor, el cual se encuentra normalmente obstruido por edificios u otros obstáculos. El receptor móvil se encuentra a una altura mucho menor que los edificios que lo rodean, y le llegan una serie de contribuciones a través de caminos diversos. Uno de estos rayos que le llegan es aquel que se propaga por encima de los edificios y se difracta en la arista del último edificio, como vemos en el rayo (1) de la figura 2.7. Este rayo, que por lo general es el que menores pérdidas tiene de todos los que le llegan al receptor, estará compuesto por tres contribuciones: la propagación por espacio libre (comentada anteriormente), la propagación sobre edificios que obstruyen el camino directo (calculada por los

métodos de obtención de pérdidas por difracción que acabamos de comentar) y la difracción final en la arista del último edificio. El cálculo [25] de esta difracción en la arista se realiza por técnicas de alta frecuencia como la Teoría Uniforme de la Difracción (UTD) o la Teoría Geométrica de la Difracción (GTD).

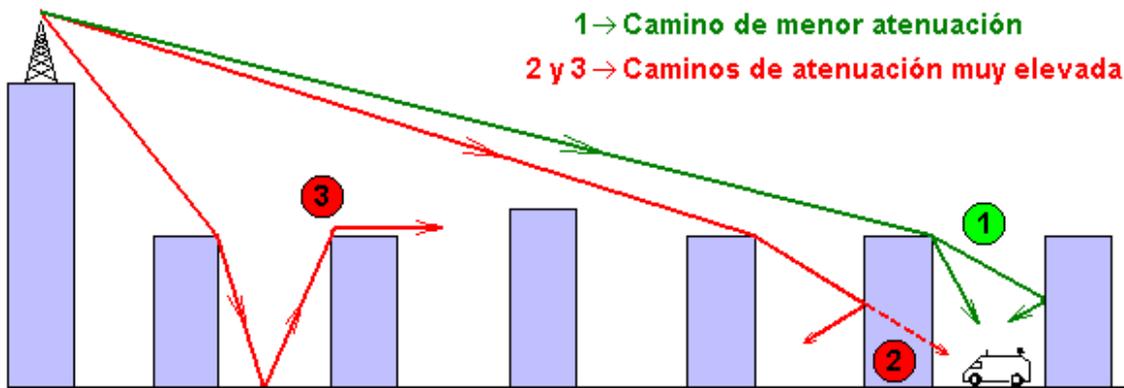


Figura 2.7: Propagación en entornos urbanos

2.2.4 Dispersión

Las pérdidas por propagación en los sistemas de comunicaciones móviles suelen presentar valores mayores que los deducidos por los mecanismos de reflexión y difracción. Esto se debe a que cuando una onda incide sobre una superficie rugosa, la energía reflejada es dispersada en todas las direcciones, aunque la mayor parte de la misma se concentra en la dirección de la onda reflejada especularmente. Otros objetos, tales como árboles y farolas, también producen dispersión o *scattering*.

Para modelar el fenómeno de la dispersión de una onda sobre una superficie rugosa se emplea el criterio de Rayleigh [28], que se basa en el desfase existente entre dos rayos reflejados en la superficie rugosa. Este criterio distingue entre una reflexión lisa (especular) o una reflexión rugosa (reflexión especular y dispersión), a partir de la comparación entre la diferencia de alturas entre la máxima protuberancia de la superficie y su altura media, con un valor umbral, mostrado en la ecuación:

$$h_{\max} = \frac{\lambda}{8 \sin \varphi} \quad \{2.7\}$$

donde φ es el ángulo de incidencia de la onda con la superficie y λ es la longitud de onda de trabajo.

Si la diferencia de alturas es menor que el umbral se considera una reflexión sobre una superficie lisa. Si, por el contrario, la diferencia de alturas es mayor que el umbral, la reflexión se produce sobre una superficie rugosa. Conforme aumenta la frecuencia, las rugosidades de cualquier material pueden llegar a ser comparables al valor umbral, apareciendo una mayor dispersión de la energía reflejada.

Para tener en cuenta el efecto de la superficie rugosa sobre la reflexión se añade al coeficiente de reflexión propio de la superficie (considerada lisa), un factor de pérdidas debidas a la dispersión (ρ_s) provocada por la rugosidad de la superficie, que se puede expresar, en una primera aproximación de la siguiente manera:

$$\rho_s = \exp \left[-8\pi^2 \left(\frac{\sigma_h \sin \varphi}{\lambda} \right)^2 \right] \quad \{2.8\}$$

donde σ_h es la desviación estándar de la altura de la superficie respecto de la altura media. Así pues, el coeficiente de reflexión resultante en el caso de tener en cuenta la dispersión será el coeficiente de reflexión para superficie lisa multiplicado por el factor de pérdidas por dispersión que acabamos de comentar.

2.3 Modelos de propagación

Los modelos de propagación son algoritmos que describen de algún modo la propagación de la señal radio a través de un entorno en general complejo. En el ámbito de las comunicaciones móviles, serán las herramientas utilizadas para predecir el valor de una serie de parámetros relacionados con la propagación de gran interés para los sistemas de telefonía móvil celular. Serán parámetros de importancia el retardo entre ecos, características doppler, *delay spread*, estadísticas de la señal recibida, tasa de error de bit o el ancho de banda de coherencia, entre otros.

El parámetro principal cuyos valores todos los modelos tratarán de predecir será el de las pérdidas de propagación entre el transmisor y el receptor, y por ende, el de potencia de señal recibida en el receptor, que se obtiene directamente a partir de aquél. La predicción de este parámetro para cada punto receptor nos permitirá realizar un esbozo de la cobertura que ofrece cada estación base a su entorno, así como de la cobertura conjunta dada por el sistema. El resultado será un perfilado para toda la zona bajo estudio de la forma real de las zonas de cobertura de cada una de las

celdas. Este será el punto de partida para una planificación rigurosa y acorde con la realidad.

Por todo ello, una de las tareas clave en la planificación de un sistema celular es la realización de predicciones de la cobertura radioeléctrica que proporciona cada una de las estaciones base transmisoras del sistema sobre su entorno. Esta predicción resulta necesaria dentro del proceso de planificación, puesto que sólo tras unas buenas predicciones de las diferentes coberturas que ofrecen cada una de las estaciones del sistema, se estará en disposición de calibrar la conveniencia de la estructura celular adoptada y de sus diferentes disposiciones sobre la zona a cubrir, del mismo modo que proporcionará un elemento de comparación entre diferentes estructuras celulares.

Por contra, asumir para la planificación de sistemas celulares coberturas ideales circulares y zonas ideales de best-server hexagonales, y tomar por ello patrones homogéneos y regulares para cubrir la zona bajo estudio, adolecerá de ser un planteamiento muy poco realista. El resultado de la planificación bajo estas hipótesis será con toda seguridad no óptimo, y con mucha probabilidad problemático en el sentido de no cumplir con algunas de las restricciones impuestas para la calidad y operatividad del servicio, ya sea por interferencias imprevistas, por falta de cobertura, por falta de capacidad, por dimensionamiento no acorde con las necesidades de tráfico reales, etc.

La predicción de la cobertura radioeléctrica es, además, un paso intermedio hacia los objetivos finales de la planificación, que serán los de establecer no sólo una estructura para la red sino también, en aquellos sistemas que utilicen TDMA, un plan de frecuencias óptimo para la misma, y en cualquier caso proporcionar el mayor aprovechamiento posible de los recursos disponibles junto con una calidad de servicio y unas características para el mismo dadas.

Las predicciones se han hecho tradicionalmente de dos modos diferentes: de forma empírica y de forma teórica.

La predicción empírica se apoya en modelos de predicción desarrollados a partir de campañas de medidas. Tras ellas, y a través de correlaciones de las medidas con las características descriptivas del entorno donde tenía lugar la propagación, se

estiman expresiones matemáticas para las pérdidas de propagación y para la intensidad de campo recibida.

Mientras que los primeros modelos empíricos presentaban sus resultados en formas de curvas normalizadas y ábacos para un uso manual [29], con los años se fueron desarrollando versiones de los mismos para su cálculo con el ordenador a través de programas informáticos.

Los modelos empíricos tienen como ventaja principal la estimación rápida y sencilla que realizan de la cobertura radioeléctrica, mientras que su principal inconveniente reside en la limitación de su validez a la zona donde se realizaron las medidas y la dificultad de extrapolar los resultados para otras zonas, lo cual provoca en las mismas errores en la predicción que pueden llegar a ser de 10 a 14 dB para el valor cuadrático medio del error [30]

La predicción teórica se apoya en modelos que tratan de predecir las pérdidas de propagación a partir del estudio teórico de la propagación del campo electromagnético a través de la zona bajo estudio. Su principal ventaja radica en unos resultados en general mejores que los empíricos y en que no requieren para su aplicación la realización de campañas de medidas. Su mayor limitación se encuentra en las aproximaciones matemáticas que realizan y que repercuten en la precisión de los cálculos.

Un tipo de predicción intermedia entre la empírica y la teórica resulta de partir de un modelo teórico y ajustar sus parámetros usando los resultados de una campaña de medidas. En un principio, esto debería proporcionar unos resultados más exactos para las zonas en las que se realizaron las campañas de medidas así como para entornos similares a aquellas.

Realizando una división más fina de los diferentes modelos de propagación podríamos establecer la siguiente clasificación:

- Empíricos: Basados en campañas de medidas.
- Semi-empíricos: Modelos empíricos a los que se han añadido soluciones exactas a algunos mecanismos de propagación.

- Deterministas: Modelos basados en el cálculo exacto de las ecuaciones que determinan las pérdidas debidas a propagación, difracción, reflexión, dispersión, etc.
- Semi-deterministas: Modelos que no llegan a ser deterministas en tanto que se han requerido técnicas estadísticas para modelar algunos elementos físicos del entorno en el que tiene lugar la propagación.

A medida que se ha ido complicando la planificación celular debido al aumento progresivo en la complejidad de los sistemas y de los entornos de operación, se han ido requiriendo modelos de predicción más sofisticados, y a la par con ellos, una información acerca del entorno más detallada y completa. Por ello se ha ido evolucionando desde las predicciones empíricas hacia las predicciones teóricas, y dentro de éstas se han ido considerando un mayor número de parámetros para modelar convenientemente el entorno en el que se produce la propagación.

En la planificación de sistemas se tiende al uso de células cada vez más pequeñas, tales como las llamadas microcélulas, y ello obliga a una mayor resolución en los cálculos de predicción. Una forma de aumentar la resolución ha sido proporcionar para los entornos bajo estudio un modelo digital de la estructura urbana cada vez más completo. En la medida en que aumente la complejidad del modelo de canal móvil frente al que nos encontramos deberá aumentar también la calidad y detalle de nuestros modelos digitales del terreno como se ve en la siguiente gráfica.

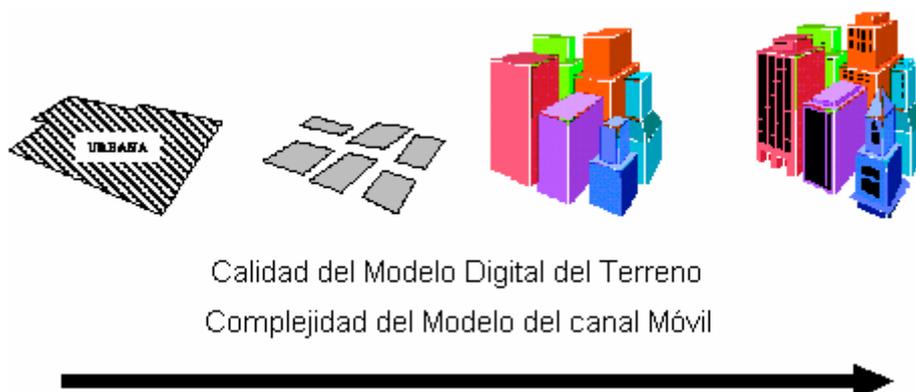


Figura 2.8: Relación entre el Modelo Digital del Terreno y el canal Móvil

Con la aparición de los sistemas digitales se dio otro paso en la necesidad de conocer con mayor detalle el entorno de propagación. Esto es así debido a que se

precisan ahora conocer otros parámetros críticos para el sistema además de la cobertura de potencia radioeléctrica. Uno de ellos es el perfil de retardo, caracterizado a través del “*delay spread*”, y que en un entorno de propagación complejo aparece debido al efecto multicamino en la propagación de la señal.

Otros parámetros del sistema son el ancho de banda de coherencia, la estadística de la señal recibida, características doppler o la tasa de error de bit. Para el estudio de estos nuevos parámetros se hacen necesarios modelos que no consideren sólo la contribución principal de la señal, sino el mayor número de contribuciones posibles, y que con técnicas de trazados de rayos se identifiquen los niveles de señal de cada contribución por separado. De esta forma, se estudiarán también procesos de reflexión y *scattering*, además del nivel medio de señal recibido por el camino directo.

Atendiendo al número de contribuciones de la señal que se tienen en cuenta, se puede establecer una nueva clasificación de los modelos:

- Bidimensionales: Sólo se considera la contribución principal que llega al receptor. Por ello, sólo son capaces de predecir la cobertura radioeléctrica.
- Tridimensionales: Consideran el mayor número posible de contribuciones que llegan al receptor debido al multicamino: señal directa, difracciones en aristas, reflexiones, etc. Gracias a esto pueden obtener otros parámetros del canal móvil de interés para la planificación.

Finalmente, se podría establecer una tercera clasificación de los modelos atendiendo a su ámbito de aplicación, distinguiendo bajo este criterio tres tipos principales de modelos:

- De entorno abierto: Son modelos de aplicación en ámbitos rurales, de baja o nula densidad de urbanización, ya que únicamente tienen en cuenta el perfil del terreno como parámetro del entorno determinante para la estimación de las pérdidas de propagación. Obviarán la presencia de edificios y otros obstáculos que pudieran estar presentes en el escenario en que tiene lugar la propagación.
- De entorno urbano: Tratarán de modelar de alguna forma el efecto que la presencia de edificios tiene sobre la función de pérdidas de propagación y sobre el nivel de potencia de señal recibida. Prescindirán por contra de la influencia que el

desnivel del terreno pudiera tener sobre los resultados. Por ello, su ámbito de uso será el de escenarios de media o alta densidad de urbanización, con mucha presencia de edificios de tamaño considerable, y con un desnivel del terreno en la zona bajo estudio pequeño que no tenga efecto en los resultados.

- **Mixtos:** Bajo esta acepción, se engloba a aquellos modelos que consideren tanto el desnivel del terreno como la presencia de edificios en el entorno de propagación. Serán, por tanto, adecuados para ciudades en las que el fuerte desnivel de terreno existente desaconseje el uso de modelos de entorno urbano. Su uso se reservará para todas aquellas situaciones en las que los dos grupos anteriores de modelos no puedan aplicarse por no cumplir la zona de análisis con alguno de los requisitos que sobre ella establecen.

2.3.1 Modelo de Okumura-Hata

El modelo de Okumura-Hata es el modelo más clásico utilizado en planificación y un claro exponente de los modelos que hemos denominado empíricos. Se desarrolló a partir de una extensa campaña de medidas llevada a cabo en Japón a diversas frecuencias representativas de los servicios de comunicaciones móviles (hasta 2000 MHz). Con estas medidas se obtuvieron unas curvas de propagación, llegándose así a un modelo que no tiene en cuenta el entorno real del receptor ni el grado de urbanización.

Okumura proporciona una colección de curvas para frecuencias típicas de comunicaciones móviles que dan el valor mediano del campo para diferentes alturas efectivas de la estación base ($h_{te} = 30, 50, 70, 100, 150, 200, 300, 450, 600, 800$ y 1000 m), una altura efectiva del móvil de 1.5 m y una ERP = 1 Kw. Estas curvas corresponden a un entorno urbano. Para su utilización en otros entornos se utilizan los factores de corrección diseñados al efecto. Se adjunta una de las gráficas de Okumura, la correspondiente a la frecuencia de trabajo de 150 MHz.

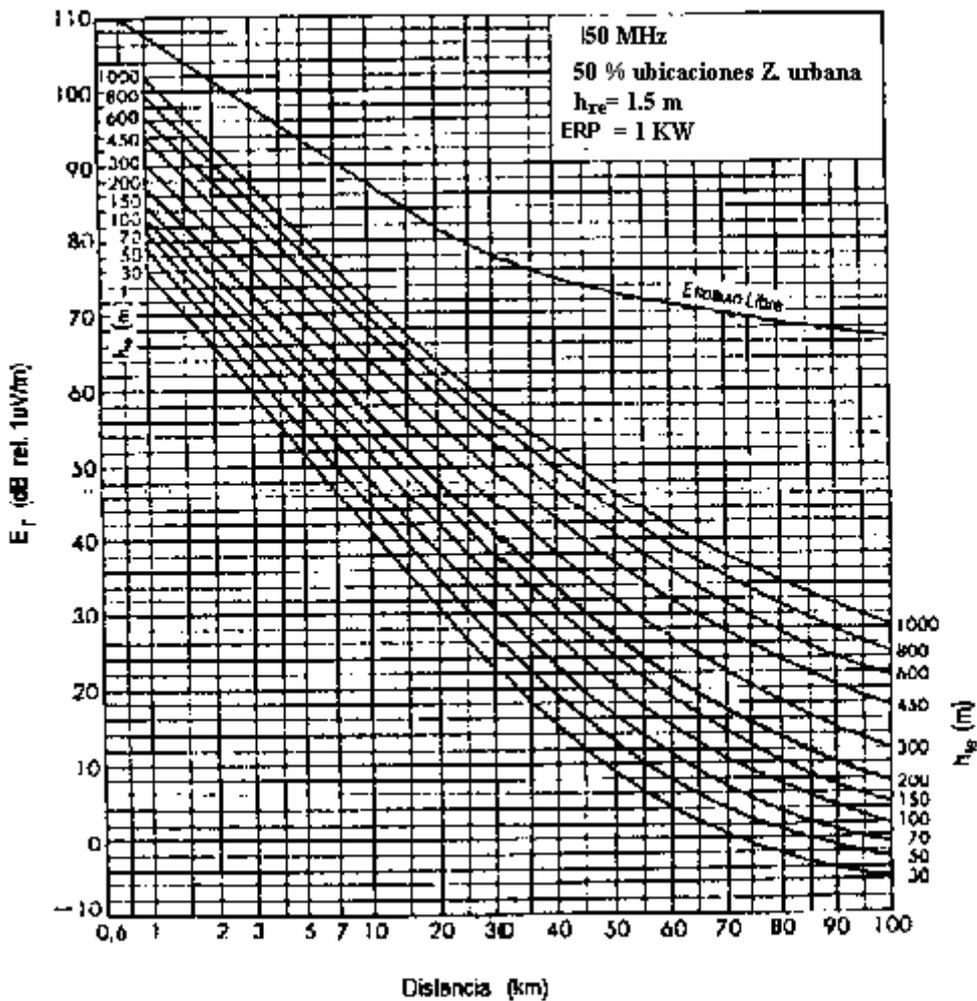


Figura 2.9: Curvas de Okumura para la frecuencia de 150 MHz

Posteriormente, Hata realizó una versión de este modelo utilizable en un ordenador. Para ello, obtuvo expresiones matemáticas que se ajustan a las diferentes curvas proporcionadas en el modelo de Okumura. Además, dispone de expresiones para los factores de corrección más comúnmente utilizados. Hata obtuvo, mediante análisis por regresión múltiple, una serie de expresiones para el cálculo de las pérdidas básicas de propagación para entorno urbanos, suburbanos y rurales.

Las pérdidas básicas de propagación quedan descritas por la siguiente expresión:

$$L_b(dB) = 69.55 + 26.16 \log(f) - 13.82 \log(h_t) - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log(h_t)) \log(d) \quad \{2.9\}$$

con un valor para $a(h_m)$ dado por:

$$a(h_m) = (1.1 \log(f) - 0.7)h_m - (1.56 \log(f) - 0.8) \quad \{2.10\}$$

Esta expresión de pérdidas básicas de propagación es directamente aplicable a entornos urbanos típicos de *ciudades medias o pequeñas*. Si se desea aplicar el modelo a otros entornos, hay que introducir las siguientes correcciones:

Ciudad grande:

$$a(h_m) = 8.29(\log(1.54h_m))^2 - 1.1 \quad f \leq 200 \text{ MHz} \quad \{2.11\}$$

$$a(h_m) = 3.2(\log(11.75h_m))^2 - 4.97 \quad f \geq 400 \text{ MHz}$$

Zona suburbana:

$$L_{bs} = L_b - 2 \left(\log \left(\frac{f}{28} \right) \right)^2 - 5.4 \quad \{2.12\}$$

Zona rural:

$$L_{br} = L_b - 4.78(\log(f))^2 + 18.33 \log(f) - 40.94 \quad \{2.13\}$$

Las mayores ventajas de este modelo son la facilidad de programarlo por un lado y el bajo tiempo computacional para los cálculos de predicción por otro.

Las desventajas más notables se derivan de su carácter totalmente empírico: no se consideran ni la ondulación del terreno ni el grado de urbanización, y por tanto las predicciones serán siempre circulares, pues para unas condiciones de aplicación del modelo dadas, el único parámetro que influye en la variación de los valores de potencia recibida de un punto receptor a otro es la distancia. Esta es la razón de que los lugares geométricos de igual potencia recibida sean circunferencias concéntricas con la estación base.

De todo esto, es fácil deducir que los errores cometidos con el modelo serán mayores que con otros, presentando el error una desviación típica del orden de 10 a 14 dB, con una tendencia que podríamos calificar de “optimista”, al predecir a la alta los valores de señal recibida.

Las publicaciones relativas a los estudios de Okumura y de Hata se apuntan en [31] y [32] respectivamente, mientras que la relación de fórmulas de Hata aquí descrita se ha extraído de [32].

2.3.2 Modelo de Walfisch-Bertoni

El modelo de Walfisch-Bertoni pertenece a la categoría de modelos teóricos, pues trata de predecir la cobertura radioeléctrica a través de un estudio teórico de la propagación sin contar con campañas de medidas.

Parte de un modelado del entorno de propagación aproximativo que idealiza ciertos elementos físicos para llegar a un planteamiento matemático sencillo. Tendrá en cuenta la presencia de edificios en el trayecto que une transmisor y receptor, pero simplificará este entorno a partir de una serie de premisas. Estas suposiciones o aproximaciones que realiza el modelo son las siguientes:

- Entorno urbano caracterizado por la presencia de edificios de altura uniforme.
- Antena emisora situada por encima de la altura media de los edificios.
- Edificios dispuestos en filas casi paralelas, de forma que las calles constituyen una retícula aproximadamente rectangular.
- Separación entre cada fila de edificios menor que la anchura de los propios edificios.

Debido a este modelado, el modelo funcionará bien en zonas urbanas no demasiado densas con típica estructura de “ensanche”, en las que las calles forman una rejilla más o menos uniforme de filas casi paralelas. Además, se considera una altura uniforme de los edificios en la zona de propagación, situándose el transmisor a una altura por encima de la de éstos.

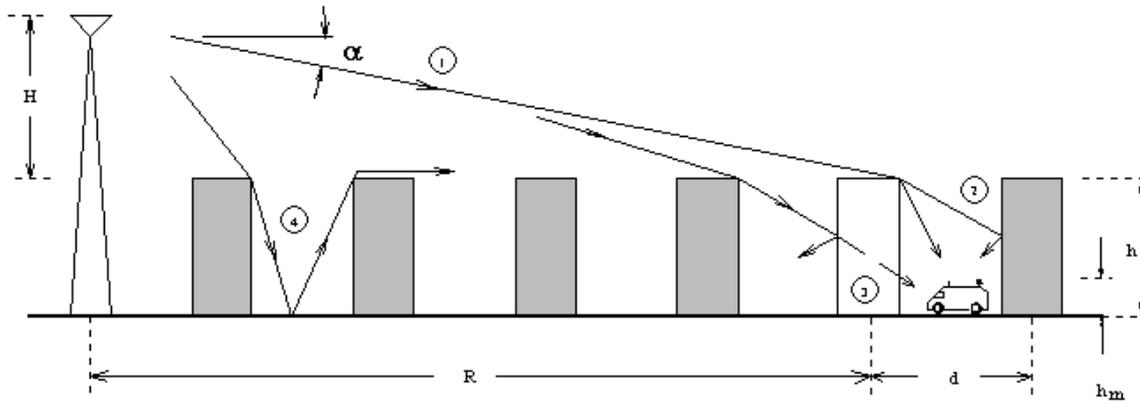


Figura 2.10: Esquema del modelado del perfil para Walfisch-Bertoni.

Bajo estas hipótesis, las pérdidas de propagación se podrán expresar como la suma de los siguientes términos:

- Pérdidas de propagación en espacio libre.

$$L_o = 32.4 + 20 \log(f) + 20 \log(R) \quad \{2.14\}$$

R (Km) es la distancia entre transmisor y receptor y f (MHz) es la frecuencia de trabajo.

- Pérdidas debidas a la obstrucción de los tejados de los edificios interpuestos en el perfil entre transmisor y receptor, llamadas pérdidas por propagación sobre edificios.

$$Q(\alpha) = 0.1 \left(\frac{\alpha \sqrt{\frac{d}{\lambda}}}{0.03} \right)^{0.9} \quad \{2.15\}$$

$$L_Q = 20 \cdot \log Q(\alpha) = 18 \cdot \log \left(\frac{0.1 \cdot \alpha}{0.03} \right) + 9 \cdot \log \left(\frac{d}{\lambda} \right) \quad \{2.16\}$$

d es la distancia media entre edificios (en metros), λ es la longitud de onda (en metros) y α es el ángulo de incidencia del haz sobre la última arista (en radianes).

- Pérdidas debidas a la difracción en la terraza del último edificio antes de llegar al móvil, o pérdidas por difracción en la última arista. Estas pérdidas dependen de la

forma y construcción de los edificios en el entorno del móvil, y el modelo realiza una simplificación de este entorno consistente en asumir que una fila de edificios actúa como un semiplano absorbente situado en el centro de la fila

$$L_D = -20 \cdot \log\left(\frac{\sqrt{\lambda}}{2\pi}\right) + 10 \cdot \log r - 20 \cdot \log\left(\frac{1}{\beta + 2\pi} - \frac{1}{\beta}\right) \quad \{2.17\}$$

r es la distancia desde la última arista hasta el móvil, mientras que β es el ángulo de la última difracción.

- Pérdidas por reflexiones: El modelo de Walfisch-Bertoni es bidimensional, ya que estudia el perfil entre transmisor y receptor sin realizar un seguimiento de otras contribuciones de la señal. Sin embargo, sí trata de cuantificar el efecto multicamino de forma simple, considerando que el valor cuadrático medio del campo total es mayor que el producido por la contribución principal en un factor raíz de dos. Considera así que las reflexiones contribuyen de forma constructiva al nivel de señal, cifrándose esta contribución en 3 dB.

La expresión final para las pérdidas de propagación resultará de sumar todas estas contribuciones, por lo que finalmente tendremos:

$$\begin{aligned} L &= L_0 + L_Q + L_D - 3 \\ &= 20.59 + 20 \cdot \log Q(\alpha) + 10 \cdot \log r - 20 \cdot \log\left(\frac{1}{2\pi + \beta} - \frac{1}{\beta}\right) + 30 \log(f) + 20 \log(R) \end{aligned} \quad \{2.18\}$$

Las condiciones de validez del modelo serán las siguientes:

- Frecuencias comprendidas entre 300 MHz y 3 GHz.
- Edificios organizados en filas paralelas y con alturas uniformes.
- Altura de la antena transmisora por encima de los edificios.
- Distancias entre transmisor y receptor entre 200 m y 5 Km.

Este modelo es aplicable por tanto a entornos en los que no existe visibilidad directa entre transmisor y receptor, y se comportará tanto mejor cuanto más se parezca el entorno bajo análisis al modelado teórico impuesto sobre el mismo. Aunque

tiene en cuenta el efecto multicamino con la contribución constructiva de 3 dB, es evidentemente un modelo bidimensional, por lo que realizará únicamente una estimación de las pérdidas de propagación, sin sentar las bases para el estudio de otros parámetros.

El modelo de Walfisch-Bertoni mantendrá unos costes computacionales relativamente bajos, aunque sensiblemente mayores que los de Okumura-Hata, y ganará en exactitud en relación a aquél, si bien estará sujeto para su validez y buen comportamiento a las restricciones relatadas. En [34] se encuentra el desarrollo de este modelo publicado por los propios autores.

2.3.3 Modelo Uni-Valencia

Éste es un modelo que ha sido desarrollado en la propia Universidad Politécnica de Valencia, en el seno del Grupo de Comunicaciones Móviles de la Escuela técnica superior de Telecomunicación.

Este trabajo constituye uno de los muchos que dentro del grupo de trabajo europeo COST-231 se han ido desarrollando en el campo de la predicción de pérdidas de propagación en los últimos años, y que han dado lugar a diversos modelos de predicción para zonas urbanas.

El modelo de Valencia está basado en el de Walfisch-Bertoni, sobre el cual se realizan ciertas modificaciones con el fin de mejorar las predicciones realizadas. Este modelo es aplicable a sistemas de comunicaciones móviles en entornos urbanos para frecuencias entre 450 MHz y 1800 MHz y lo podríamos dividir en dos submodelos, estos son, la mejora sobre Walfisch-Bertoni por un lado, y la aportación tridimensional por otro:

- Modelo de propagación sobre edificios, similar al de Walfisch-Bertoni, y por tanto bidimensional y aplicable en condiciones similares a las de aquél. Con este modelo se obtiene una buena estimación del valor medio de la potencia recibida, añadiéndose en relación a Walfisch-Bertoni las siguientes mejoras:
 - En cuanto a las pérdidas por difracción sobre edificios, se sugiere la siguiente mejora para $Q(\alpha)$:

$$Q(\alpha) = \begin{cases} 2.34 \cdot v^{0.9}, & v < 0.38 \\ 1.4 \cdot v^{0.37}, & 0.38 < v < 0.7 \\ v^{-0.57}, & 0.7 < v < 1 \\ 1, & 1 < v \end{cases} \quad \{2.19\}$$

donde $v = \alpha \cdot \sqrt{d/\lambda}$. La expresión de $Q(\alpha)$ dada por el modelo de Walfisch-Bertoni es válida para puntos en los que v sea menor que 0.4. Sin embargo, para medidas realizadas en la ciudad de Valencia se comprobó que más del 60 por cien de los puntos superaban dicho valor, por lo cual se corrigió Q como una función con cuatro tramos en la forma aquí expuesta, y que contempla valores mayores que 0.4 para el término mencionado.

- Para las pérdidas por difracción final, se propone la siguiente expresión alternativa:

$$L_D = \begin{cases} 0 & \text{si } \beta < -0.265 \\ -17 + 10 \cdot \log f + 10 \cdot \log r - 9 \cdot e^{-4.7\beta} & \text{si } \beta > -0.265 \end{cases} \quad \{2.20\}$$

Con estas modificaciones, la expresión final para las pérdidas de propagación queda de la forma en la que $Q(\alpha)$ es ahora la expresión dada para este modelo.:

$$L = 12.4 + 20 \cdot \log Q(\alpha) + 10 \cdot \log r - 9 \cdot e^{-4.7\beta} + 30 \log(f) + 20 \log(R) \quad \{2.21\}$$

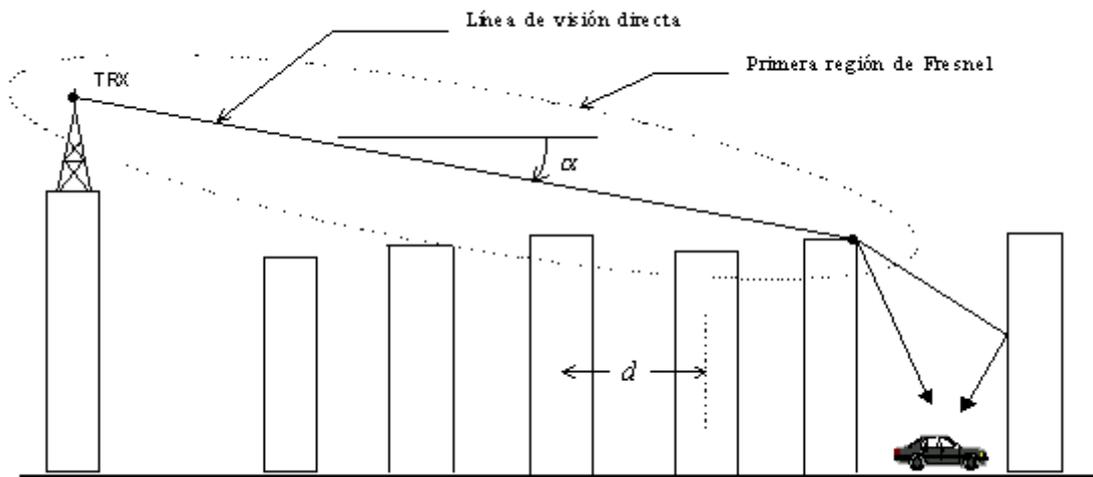


Figura 2.11: Modelo de propagación sobre edificios

- Modelo de propagación horizontal, que agrupa los mecanismos de reflexión y difracción que ocurren en el entorno próximo al móvil. Este submodelo nos permite obtener resultados de la estadística a corto plazo de la señal recibida, entre otros. Se utilizan técnicas estadísticas para la descripción de fachadas de los edificios sobre las que se producen fenómenos de reflexión y scattering, como superficies rugosas aleatorias modeladas a través de una distribución estadística Normal. El método identifica, a través de un algoritmo de trazado de rayos, las contribuciones que llegan al receptor. La caracterización por separado de cada contribución permite hacer una suma coherente de las mismas. [35], [36] y [37] son publicaciones de estas mejoras de Walfisch-Bertoni cristalizadas en este modelo.

3

Sistema de Información Geográfica

3.1 Introducción

Un Sistema de Información Geográfica (GIS) es aquel conjunto de programas y aplicaciones software que permiten la gestión de información organizada en bases de datos, referenciadas espacialmente y que puede ser visualizada mediante mapas.

Un GIS en sentido completo gestiona una base de datos espacial. Permite la creación y estructuración de los datos partiendo de fuentes de información como los mapas, la teledetección, bases de datos existentes, etc. Además de posibilitar el análisis, visualización y edición en mapas de la base de datos, un GIS cuenta con herramientas que permiten crear nuevos datos derivados de los existentes.

Hoy en día y desde diversas organizaciones se invierten grandes sumas en el desarrollo de bases de datos georeferenciadas y en Sistemas de Información Geográfica. Es previsible además que durante los próximos años se inviertan miles de millones más. Todo ello está sucediendo en un corto período de tiempo, ya que hace pocos años el GIS era una herramienta muy especializada sólo al alcance de pocas organizaciones y una curiosidad para el público en general. Se pueden dar dos explicaciones a estos fenómenos:

- La primera reside en el abaratamiento de los costes de los equipos informáticos, que cada día los hace más asequible para un mayor número de usuarios.

- La segunda y de mayor importancia es que la Geografía (y los datos que sirven para cuantificarla) forma ya parte de nuestro mundo cotidiano; la mayoría de las decisiones que tomamos diariamente están en relación con o influenciadas por un hecho geográfico. Los camiones de bomberos, por ejemplo, se envían a su destino a través de la ruta más corta posible, las aportaciones económicas de los gobiernos a los entes locales se basan frecuentemente en la distribución geográfica de la población, o las enfermedades se estudian gracias a la identificación de las áreas en donde se producen y de la velocidad a la que se expanden.

3.1.1 Ventajas y desventajas de un GIS

Los GIS permiten las siguientes funciones:

- Realizar un gran número de manipulaciones, sobresaliendo las superposiciones de mapas, transformaciones de escala, la representación gráfica y la gestión de bases de datos.
- Consultar rápidamente las bases de datos, tanto espacial como alfanumérica, almacenadas en el sistema.
- Realizar pruebas analíticas rápidas y repetir modelos conceptuales en despliegue espacial.
- Comparar eficazmente los datos espaciales a través del tiempo (análisis temporal)
- Efectuar algunos análisis, de forma rápida que hechos manualmente resultarían largos y molestos.
- Integrar en el futuro, otro tipo de información complementaria que se considere relevante y que este relacionada con la base de datos nativa u original.

Un factor limitativo del uso de GIS ha sido la poca disponibilidad de datos de alta calidad, tanto georreferenciados como estadísticos, fácilmente accesibles y a un precio adecuado. Hay que tener en cuenta que de la calidad de los datos dependerá la calidad de la decisión a tomar. Pero esta situación esta cambiando y la disponibilidad

de datos está aumentando rápidamente. Las empresas de datos han crecido simultáneamente a las ventas de software GIS y cada vez existen más iniciativas públicas y privadas para proporcionar datos digitalizados. Por otro lado, la información de distintos proveedores de datos se debe poder integrar con facilidad por lo que es necesario conocer los problemas que puedan surgir al usar datos con distintas estructuras y cómo poder solucionarlos.

La pregunta a realizarse en este momento es la necesidad de utilizar un SIG en una tesis de planificación y análisis de redes de telefonía móvil.

La respuesta con más peso a esta pregunta es que en los últimos años se han desarrollado algoritmos de cálculo de propagación radioeléctrica que tienen en cuenta las características geográficas del terreno en el resultado final de cobertura y que también influyen sobre otros aspectos del despliegue de redes celulares. Por ello la necesidad de tener una plataforma con la que se pueda interactuar de un modo seguro y fácil con los datos geográficos.

El modelo de planificación de sistemas celulares de tercera generación desarrollado en esta tesis se ha construido sobre el Sistema de Información Geográfica de la empresa ESRI (*Environmental Systems Research Institute*), concretamente sobre la aplicación Arc/Info. El hecho de apoyarse en un sistema ya desarrollado y sofisticado como el GIS apuntado no sólo conlleva las lógicas ventajas de heredar una arquitectura, una funcionalidad y unos elementos ya diseñados y de una calidad contrastada, sino que además proporciona a los resultados generados sobre esta plataforma compatibilidad para ser tratados por otras herramientas que entiendan el mismo GIS, y del mismo modo se pueden tomar resultados realizados con aquellas e importarlos al entorno propio.

En este capítulo se realiza una descripción de los fundamentos de este Sistema de Información Geográfica y de las posibilidades que ofrece Arc/Info en el manejo y análisis de información georreferenciada. Constituye una buena introducción al GIS de Arc/Info.

3.2 Introducción a Arc/Info

Arc/Info es un producto de ESRI que, a través de un completo paquete de herramientas software, desarrolla un Sistema de Información Geográfica potente.

Un Sistema de Información Geográfica (GIS) viene a proporcionar un entorno en el que asentar una base de datos geográfica, y capaz de realizar toda una gama de tareas sobre esta información [38]. Fundamentalmente manejará dos tipos de información que se encontrarán relacionadas: información espacial e información descriptiva. Un GIS tendrá la capacidad de manejar simultáneamente un conjunto de mapas para cada zona geográfica de estudio. Cada lugar geográfico concreto dentro de una de estas zonas geográficas, definido por unas coordenadas, tendrá la misma localización en todos los mapas, y cada mapa mostrará una característica o atributo diferente de dicho lugar.

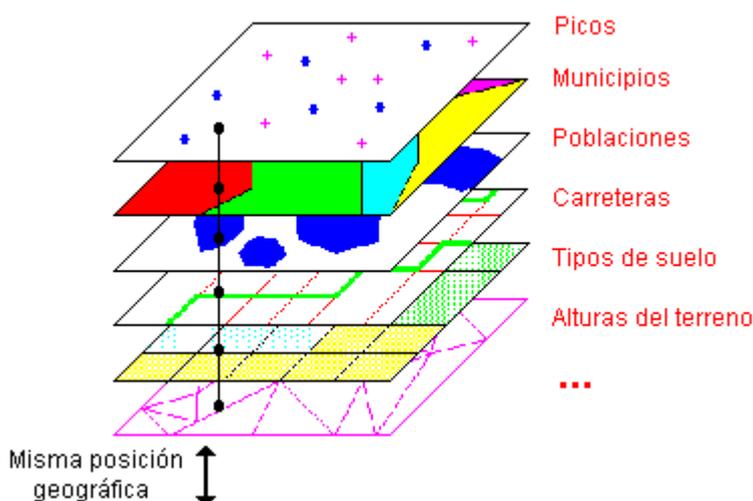


Figura 3.1: Conjunto de mapas manejados por un GIS

Una aplicación que maneje un GIS dispondrá de herramientas para el análisis, edición, visualización y, en general, para el manejo de la información geográfica con un amplio espectro de posibilidades. Arc/Info, como tal aplicación, dispondrá de esta serie de facilidades, apoyándose para ello en cada uno de los módulos que contiene. Cada módulo estará especializado en un tipo de información y en una serie de tareas específicas.

El hecho de que Arc/Info desarrolle el modelo GIS de ESRI, lo habilita para estar en comunicación e intercambiar información con otras herramientas de ESRI que se basan en GIS, como Arc/View, y de esta forma utilizarse ya no sólo como una herramienta autónoma de grandes prestaciones, sino como un servidor de procesos y de datos GIS del que se nutran remotamente otras aplicaciones, lo cual abre las puertas a una perspectiva de trabajo muy interesante.

3.3 Arquitectura del software de ARC/INFO

El software de Arc/Info tiene una arquitectura de capas, que permite el manejo de la información y el desarrollo de aplicaciones de forma clara y ordenada. En la figura 3.2 se incluye un esquema de la misma, y posteriormente se realiza una descripción de cada una de estas capas.

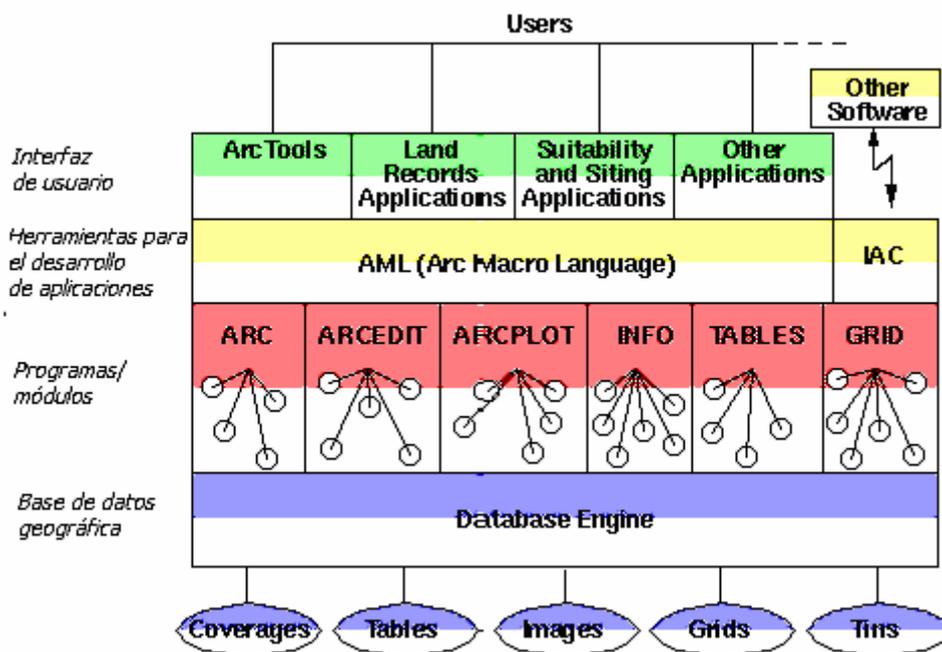


Figura 3.2: Arquitectura del software de Arc/Info

3.3.1 Capa 1: la base de datos geográfica

En el primer estrato de la jerarquía, encontramos la base de datos geográfica, organizada en estructuras de información definidas, cada una de ellas con sus

cualidades y formatos específicos. Básicamente, se dispone de coberturas vectoriales, *grids*, tablas, TIN e imágenes, elementos que serán descritos más adelante.

En este nivel se sitúa toda la materia prima de carácter geográfico de la cual harán uso los niveles superiores. Concretamente, será el siguiente nivel, el lenguaje de comandos, el que acceda directamente a ella, debiendo los niveles superiores pasar por el lenguaje de comandos en último término siempre que quieran llegar a la información geográfica.

3.3.2 Capa 2: el lenguaje de comandos

Sobre esta capa, encontramos un potente y flexible lenguaje de comandos que da acceso a sofisticadas herramientas de geoprocso con las cuales trabajar sobre las diferentes fuentes de datos soportadas por Arc/Info que residen en el primer nivel.

Este lenguaje de comandos está organizado funcionalmente dentro de una serie de módulos independientes, cada uno de ellos especializado en una clase de tareas específica. De esta forma, encontramos un módulo desarrollado especialmente para la edición de información vectorial (Arcedit), otro específico para el manejo de bases de datos compuestas por la información de atributos (Info), otro para el manejo de *grids*, etc. Estos módulos se describirán someramente en apartados posteriores.

Cada módulo se arranca independientemente de los otros, una vez que ha sido arrancado el módulo principal, que es el Arc. De hecho, cada uno de ellos tiene su propia línea de comandos y sus ventanas gráficas. No obstante, sobre una misma ventana gráfica se podrán volcar resultados provenientes de distintos módulos gracias a la posibilidad que existe de invocar comandos de un módulo desde otro módulo. Esta flexibilidad no es total, y habrá módulos que no podrán volcar sus resultados en ventanas gráficas de otros, sino sólo en la propia, como es el caso de Arcedit.

En la versión de Arc/Info 7.0.3 sobre Unix, que ha sido la utilizada en el desarrollo de esta tesis, esta capa no está encapsulada para el usuario en un interfaz gráfico de manejo del lenguaje que hay por debajo, sino que directamente el usuario accede a la línea de comandos y trabaja sobre ella. Por ello, para la realización de la aplicación de planificación que ha constituido la tesis, ha sido necesaria la elaboración de todo un interfaz gráfico de menús y ventanas gráficas desde el cual el usuario

maneje los elementos y posibilidades puestos a su disposición, siendo para éste transparentes todas las peculiaridades internas que aquí exponemos. Para que esto haya sido posible, debía existir algún tipo de facilidad para automatizar tareas, facilidad que se encuentra plasmada en el siguiente nivel: el lenguaje de macros.

3.3.3 Capa 3: el lenguaje de macros AML y el interfaz de comunicaciones IAC

Escalando un nivel más en la jerarquía, encontramos el AML (*Arc Macro Lenguaje*), un lenguaje de macros que permite automatizar tareas y, a partir de él, construir interfaces de usuario y aplicaciones de alto nivel, las cuales podrán hacer uso de otro software cuando esto sea conveniente, como es el caso de la algorítmica en las herramientas de planificación que desarrollamos.

Además, en este nivel de la arquitectura encontramos la posibilidad de comunicación con otro software a través del IAC (*Inter-application communications*). Las herramientas del IAC permiten a otro software ejecutar operaciones en Arc/Info. Además, el Arc/Info podría ser utilizado como un servidor de procesos y datos.

3.3.4 Capa 4: aplicaciones de alto nivel. Interfaz con el usuario

Como acabamos de apuntar, el AML abre las puertas a la automatización de tareas y con ello, al desarrollo de aplicaciones de alto nivel. Ofrece también la posibilidad de realizar menús para el desarrollo de interfaces de usuario.

Por tanto, a este nivel se encontrarán todo tipo de aplicaciones que, haciendo uso de todas las capas anteriores, han desarrollado un interfaz propio y una funcionalidad dada.

En esta línea, Arc/Info viene provisto de algunas herramientas de edición y visualización en este nivel de la jerarquía, las *Arc Tools*, que evitan al usuario el tener que trabajar desde la línea de comandos.

Evidentemente, nuestra aplicación de planificación se encuentra insertada en esta capa o nivel, haciendo transparente al usuario la complejidad en el manejo de las estructuras de información y de las funciones de proceso de las mismas.

3.4 Tipos de estructuras de información geográfica

La información manejada por los GIS se puede agrupar en dos tipos fundamentales: información espacial e información descriptiva. La primera de ellas hace referencia a la localización y forma de los elementos geográficos considerados, mientras que la información descriptiva añade atributos o propiedades a los elementos geográficos delimitados por la información espacial.

Básicamente, Arc/Info maneja dos tipos diferentes de estructuras de información geográfica espacial: información vectorial e información matricial o *raster*. Dentro de esta división fundamental, se pueden distinguir variantes a cada uno de estos dos tipos, como es el caso de los TIN y los *Lattices*, que son variaciones sobre el formato matricial.

Como complemento a estos dos tipos de información, aparece la información descriptiva, que viene a estar compuesta por tablas de atributos relacionadas con los elementos geográficos, ya sean estos vectoriales o matriciales.

3.4.1 Información vectorial

La información geográfica de muchas de las capas de información que se usan en la herramienta de planificación se encuentran en formato vectorial. Esto significa que los diferentes elementos geográficos de cada una de estas capas serán almacenados como conjuntos de puntos relacionados dentro de un sistema coordenado, que será el cartesiano. Esto es, el sistema de coordenadas cartesiano (pares x,y) hará referencia a la posición de los elementos en el mundo real.

De esta forma, no tendremos una representación continua de la información geográfica, sino que cada elemento que se quiera describir tendrá una descripción propia e individualizada, y estará considerado como un elemento individual y diferenciado dentro de la estructura de datos.

3.4.1.1 Tipos de elementos vectoriales

Arc/Info maneja tres tipos fundamentales de elementos vectoriales, cada uno de los cuales hará referencia a un tipo de elemento geográfico real:

- **Puntos:** son registrados como pares (x,y), y representan rasgos geográficos puntuales, demasiado pequeños para ser representados como líneas o polígonos, y de cuya geometría nos interesa sólo su posición. A cada rasgo geográfico representado como un punto, le asignamos un número identificador y el par de coordenadas x,y que describen su posición.

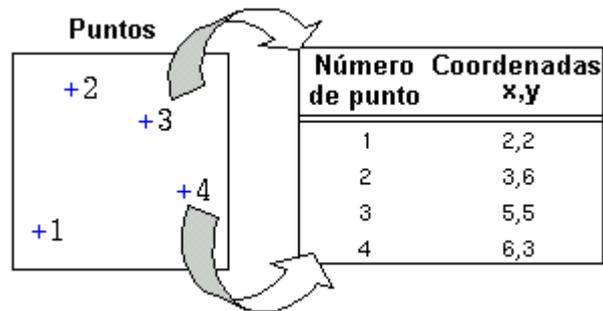


Figura 3.3: Registro de la información espacial de los puntos

Elementos del mundo real que en su representación vectorial parece conveniente modelar como puntos podemos citar, como ejemplos:

- localizaciones geográficas puntuales: ubicación de cotas del terreno, accidentes geográficos puntuales, etiquetas descriptivas del entorno...
 - Ubicaciones de elementos de interés, tales como tomas de corriente, telefónicas, instalaciones o centrales...
 - Núcleos urbanos o de población, cuando por alguna razón no nos interese su extensión ni forma y sólo se quiera resaltar su situación geográfica, sin ningún interés en modelarlos.
- **Arcos:** Un arco es registrado como un conjunto de pares coordenados (puntos) conectados, y representa rasgos geográficos demasiado estrechos como para considerar su área, y/o de cuyas dimensiones no nos interesa o no es significativo su grosor, sino sólo su longitud.

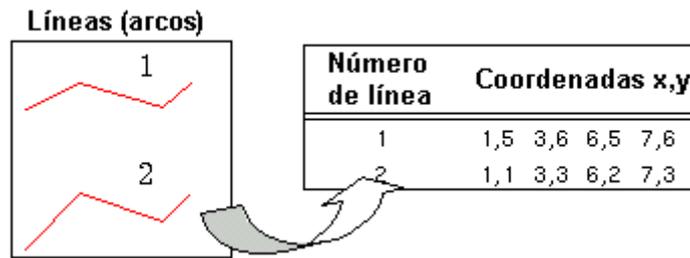


Figura 3.4: Registro de la información espacial de los arcos

Algunos ejemplos de elementos del mundo real susceptibles de ser representados como arcos son:

- Rasgos geográficos con una sola dimensión significativa, tales como ríos, carreteras, líneas de ferrocarril, etc.
 - Contornos que tienen longitud pero no enmarcan un área, como contornos o líneas de nivel de la elevación del terreno, que nos permiten modelar y representar superficies continuas
 - Elementos descriptivos con una dimensión de interés, tales como fronteras políticas, marcado de rutas o trazados que se desee señalar.
- **Polígonos:** un polígono viene a ser un conjunto de pares coordenados conectados que describen una trayectoria que se cierra sobre sí misma, describiendo así el perímetro del polígono. Representan elementos geográficos con un área significativa y que interesa tener registrada, de manera que a través de la tira ordenada de pares coordenados tenemos descrito el perímetro de los mismos y delimitada el área, cuyo valor será calculado por ARC/INFO para todo polígono.

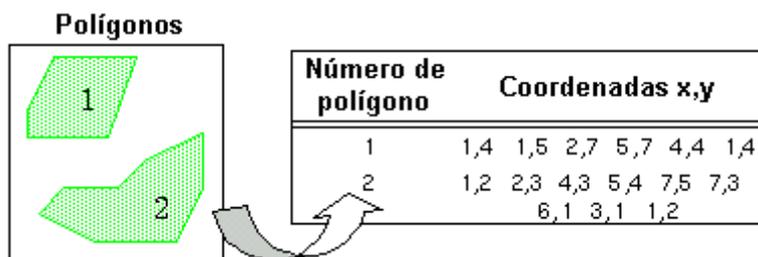


Figura 3.5: Registro de la información espacial de los polígonos

Algunos ejemplos de elementos reales que interesará representar como polígonos serán:

- Zonas urbanas, ya sean ciudades o núcleos de población menos densos, que interese destacar en su extensión. Si interesa modelar el interior de estas zonas, se modelarán los edificios como polígonos, quedando el núcleo de población descrito como una aglutinación de éstos.
- Rasgos geográficos que interese destacar en sus dos dimensiones significativas, como pueden ser lagos, parcelas, tipos de suelos, bosques, etc.
- Rasgos descriptivos o figurativos de interés, como áreas de países, provincias, municipios, etc.



Figura 3.6: Entorno urbano representado por polígonos en forma vectorial

Así pues, tendremos representada la realidad no de forma continua, sino almacenando sólo información para cada elemento significativo, haciendo esto en la forma vectorial de las mostradas que más convenga en cada caso.

3.4.1.2 Topología

A partir de los elementos básicos descritos en el apartado anterior, se describe la topología, que será un procedimiento para hacer explícitas las relaciones espaciales

entre los elementos, generándose una información que irá asociada a los mismos, y permitirá optimizar el almacenamiento y manejo de la información vectorial, además de proporcionar información útil como área, longitud, contigüidad de polígonos, conectividad de arcos, etc. La topología empleada por Arc/Info se basa en tres conceptos principales:

- Conectividad → topología arco-nodo

Se da en arcos que conectan unos con otros. Para soportar este concepto topológico, la estructura de datos manejará un elemento añadido que será el nodo. Se definen los nodos como los puntos de comienzo y fin de arco, así como los puntos de intersección entre arcos.

Se generará y mantendrá actualizada una lista ordenada en la que figuren para cada arco los nodos que contiene. De este modo, analizando los nodos de los arcos, encontraremos que tienen conectividad aquellos arcos que posean al menos un nodo en común.

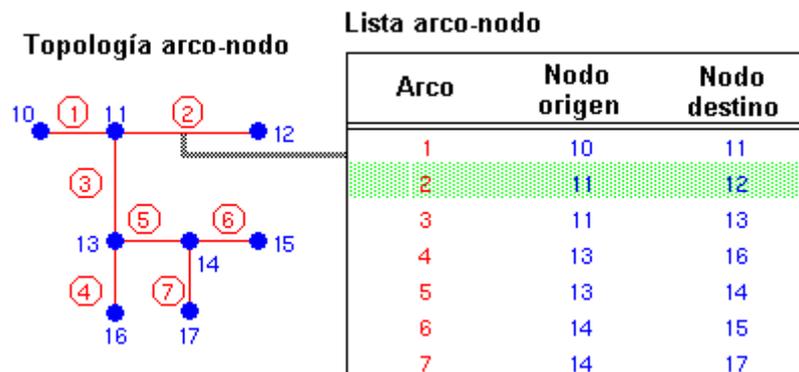


Figura 3.7: Topología arco-nodo

Esta información añadida que permite al GIS manejar con fluidez el concepto lógico de la conectividad da lugar a la llamada topología arco-nodo. Para simplificar más la estructura, los arcos se definen como los conjuntos de pares ordenados que empiezan y terminan en nodos, sin tener nodos intermedios. Esto es, cada arco tiene dos nodos: el nodo de comienzo y el nodo de fin.

- Área → Topología arco-polígono

Tiene lugar cuando los arcos que se interconectan enmarcan un área que define un polígono. No sólo se tendrá en cuenta el contorno externo del polígono, sino que también se contemplará la posibilidad de que el polígono tenga polígonos en su interior, distinguiéndose entonces un contorno interno para el polígono que contiene a los otros.

La información que se mantiene ahora en la estructura de datos para acoger este nuevo concepto, y que da lugar a la topología arco-polígono, viene a ser la relación para cada polígono de los arcos que lo forman. De esta forma, tendremos los polígonos descritos como suma de arcos, con lo cual, si dos polígonos son contiguos y por tanto comparten uno o más arcos, estos arcos no tienen que ser almacenados físicamente dos veces, sino tan sólo una vez, pues a cada polígono asociamos los identificadores de arcos que lo forman y no las coordenadas físicas de los mismos, con lo cual no hay información redundante. En la figura 3.8, para el polígono F se ha insertado un cero precediendo al arco 7. Con ello se indica que este arco pertenece al contorno interno del polígono.

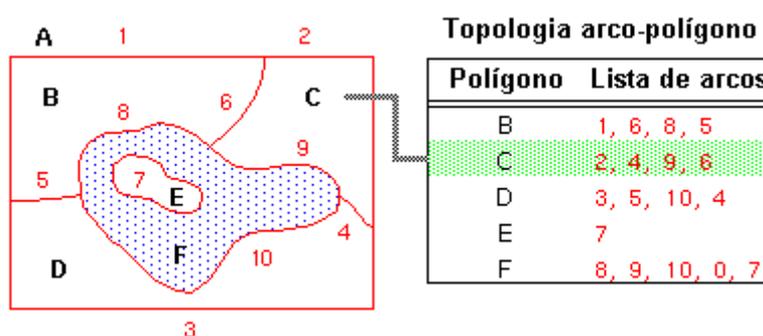


Figura 3.8: Topología arco-polígono

- Contigüidad → Topología derecha-izquierda

La contigüidad es el concepto topológico que permite al modelo de datos vectorial determinar adyacencia entre elementos. Dos rasgos geográficos que tienen un límite común serán adyacentes.

Los arcos, a través de la topología arco-nodo, contienen un nodo origen y un nodo destino. Con ello, se les está asociando implícitamente una dirección y un

lado izquierdo y derecho. Se aprovechará esta circunstancia para crear la topología izquierda-derecha, que hará referencia a los polígonos en el lado izquierdo y derecho de un arco. Cada arco tendrá, pues, solidaria la información del polígono que tiene a su izquierda y a su derecha. La adyacencia entre polígonos está, de este modo, descrita de forma directa en esta tabla. El polígono de la figura 3.9 etiquetado como A es el llamado polígono universo, y representa el mundo externo al área de estudio.

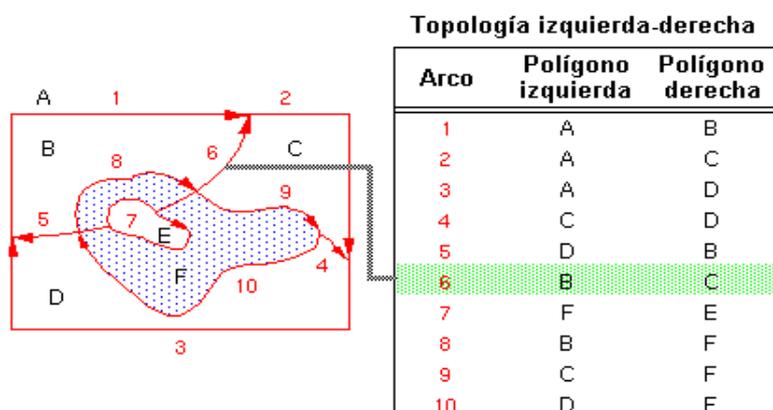


Figura 3.9: Topología izquierda-derecha

Tener una topología aplicada sobre la información vectorial, genera tal y como se ha visto toda una serie de informaciones adicionales sobre las estructuras de datos. Esta información será la que permitirá realizar tareas lógicas de forma casi inmediata, como pueden ser la identificación de vecindad o la existencia de ruta entre dos puntos. Además, evitará la redundancia de describir los elementos geográficos poligonales independientemente unos de otros, con la duplicidad en la definición de arcos que ello supone.

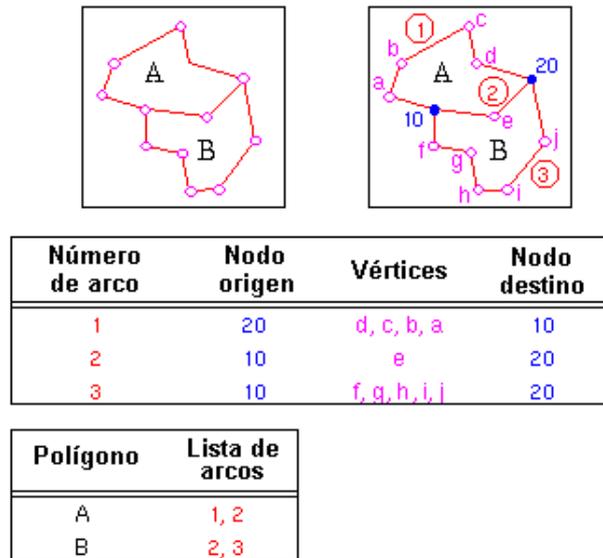


Figura 3.10: Polígonos descritos por los arcos que los forman y arcos descritos como conjuntos de pares coordenados, con información asociada de nodo-inicio y nodo-fin de arco

3.4.2 Información matricial

La información matricial realiza una descripción continua de la realidad, dividiendo la zona geográfica a describir en celdas de una determinada resolución a través de un mallado homogéneo de la misma y asignando a cada celda un valor determinado, indicativo de la cualidad que se está describiendo (altura, potencia, tipo de suelo...)

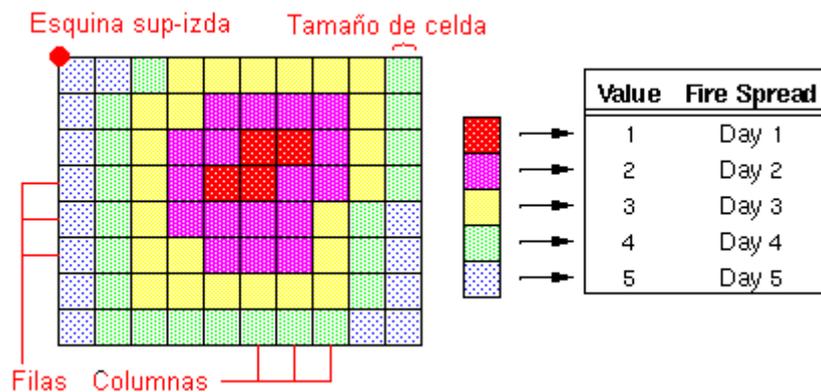


Figura 3.11: Registro de una zona geográfica de forma matricial

Ahora no se diferencian elementos ni se registra por separado cada elemento significativo, sino que se realiza un registro de un área geográfica determinada

siempre de la misma forma sin atender a lo que ésta contenga. Así, puntos, líneas o polígonos, son tratados de la misma forma, como se observa en las figuras siguientes.

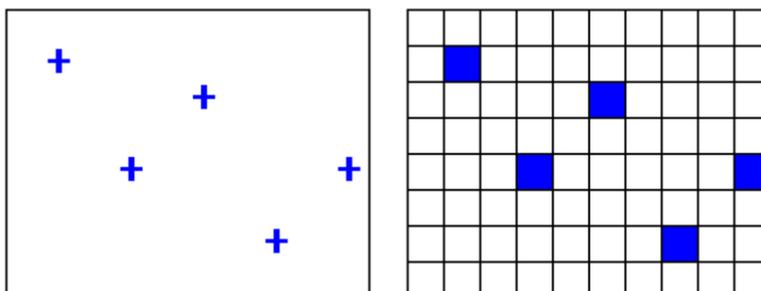


Figura 3.12: Registro de elementos geográficos puntuales de forma matricial

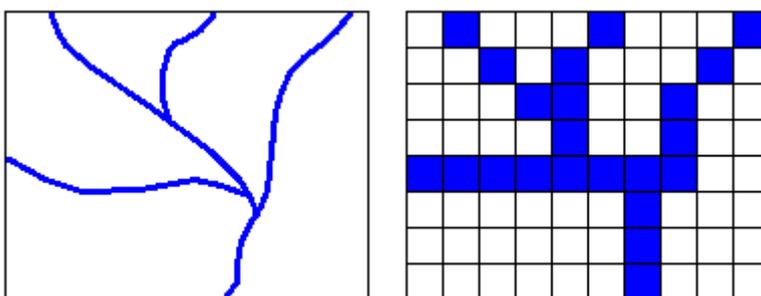


Figura 3.13: Registro de elementos geográficos lineales de forma matricial

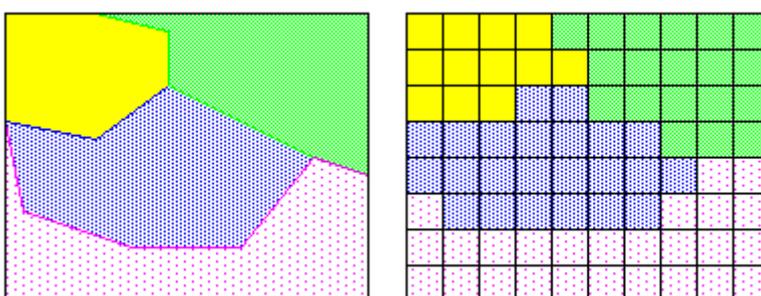


Figura 3.14: Registro de elementos geográficos poligonales de forma matricial

La precisión vendrá dada por el tamaño de celda empleado y por la escala del mapa sobre el que se realiza el mallado y posterior registro matricial. El volumen de información será tanto mayor cuanto mejor sea la resolución (celdas más pequeñas), por lo que será conveniente ajustarse, por razones de economía y coste

computacional, a la mayor (más gruesa, menos precisa) resolución que ofrezca resultados aceptables para cada caso.

Por otro lado, las relaciones espaciales vienen implícitas en el modelo matricial. Debido a que se utiliza un *grid* regular, conceptos como la vecindad o contigüidad vienen dados de forma directa por las posiciones relativas entre celdas, con lo que no se hace necesaria la creación de una información adicional como sucedía en el modelo vectorial a través de la topología.

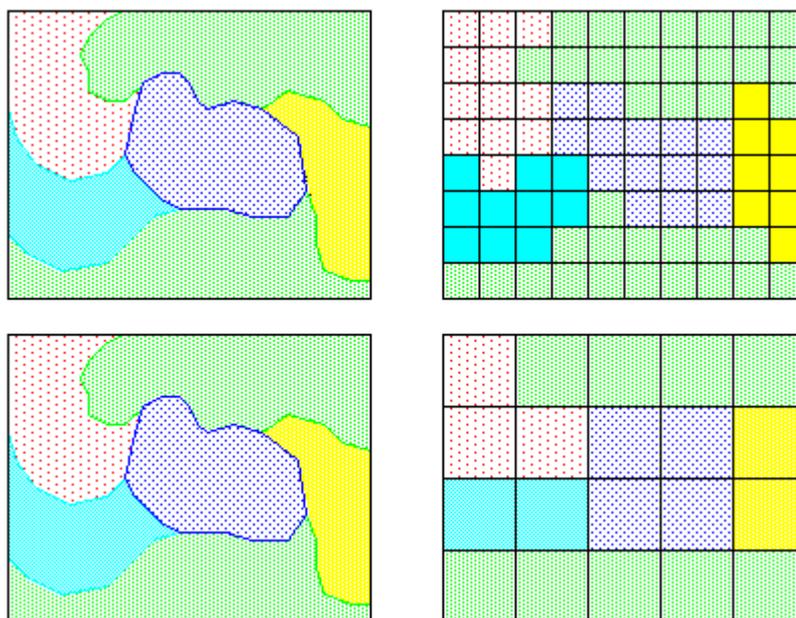


Figura 3.15: Efecto de la resolución en el grid resultado

3.4.3. Información vectorial vs información matricial

Utilizar uno u otro tipo de formato, vectorial o matricial, dependerá de los elementos geográficos a registrar, y de las tareas que queramos hacer con ellos, pues cada uno de los formatos tiene unas características más adecuadas para un tipo de operaciones y mayor complejidad para otras.

Para registrar superficies continuas de terreno, o elementos con variaciones continuas que no son significativas, utilizaremos una captura matricial, mientras que para elementos discretos y claramente delimitados utilizaremos el registro vectorial de

los datos para hacer uso de todas las posibilidades que ofrece en cuanto al tratamiento individualizado de elementos.

Esto es, transiciones graduales de propiedades quedarán resaltadas con el formato *raster*, como puede ser la altura del terreno, la densidad de tráfico, el grado de vegetación, etc., mientras que contornos, límites, rutas, o elementos bien delimitados como edificios, lagos, poblaciones... quedarán resaltados y delimitados de forma natural con el formato vectorial.

En cuanto a las acciones a realizar sobre la información geográfica, habrá que tener en cuenta que, por un lado, operaciones de superposición de capas y funciones matemáticas sobre las mismas son más naturales, directas y rápidas sobre información matricial, mientras que por otro, el modelo vectorial tiene toda la precisión que se quiera, pues define sus elementos en último término a través de pares x,y sin dimensión.

Por esto último, para cartografía de alta precisión el modelo vectorial ofrecerá mejores prestaciones, sobretodo teniendo en cuenta que no se halla sujeto a la escala de trabajo o *zoom* sobre la información. Además, la obtención de una mapa *raster* a partir de uno vectorial es una operación más sencilla que la inversa, y se puede hacer con la resolución que se quiera, mientras que en la operación inversa (mapa vectorial a partir de *raster*), nunca se podrá mejorar la resolución que el mapa matricial posee con su tamaño de celda.

Debido a todo esto, suele ser un modo de trabajo el tener cierta información geográfica en formato vectorial, y realizar la conversión a *raster* cuando se vayan a efectuar cierto tipo de operaciones matemáticas sobre ella, realizándose esta conversión con la resolución que se estime oportuna.

3.4.4 Información descriptiva

Tanto el modelo vectorial de almacenamiento de la información geográfica como el matricial, llevan solidaria una información adicional de carácter descriptivo, parte de la cual se genera por defecto al crearse las estructuras vectoriales y matriciales [39], mientras que la otra parte será añadida por el usuario cuando lo desee.

La información descriptiva complementa la información espacial, ya sea ésta vectorial o matricial, y estará construida por una serie de tablas en las que las columnas o *items* serán atributos o propiedades descriptivas de los elementos geográficos, y las filas serán registros de datos descriptivos. Arc/Info maneja tres clases de tablas de atributos:

- Las tablas de atributos principales, existiendo un modelo diferente para cada tipo de elemento geográfico. Se constituyen de entrada con una serie de atributos o columnas por defecto según el tipo de elemento geográfico que describan, y a partir de ahí se les puede añadir los atributos que se desee.
- Tablas INFO, que son tablas de atributos creadas desde el módulo Info y que se pueden relacionar con las *feature attribute tables* a través de *items* o atributos comunes que hagan de enlace entre los registros de unas y de otras.
- Tablas de atributos externas, que provienen de un sistema de manejo de bases de datos relacionales como Oracle, Ingres, Informix, Sybase o RDB.

Para el caso de información descriptiva sobre estructuras vectoriales, los registros de las tablas serán cada uno de los elementos geográficos individuales almacenados, existiendo tablas separadas para los puntos, arcos o polígonos. Cada uno de estos tipos de elementos vectoriales, tendrá una tabla de atributos asociada y un número identificador etiquetará a cada elemento geográfico y lo relacionará con un registro de la tabla de atributos que corresponda.

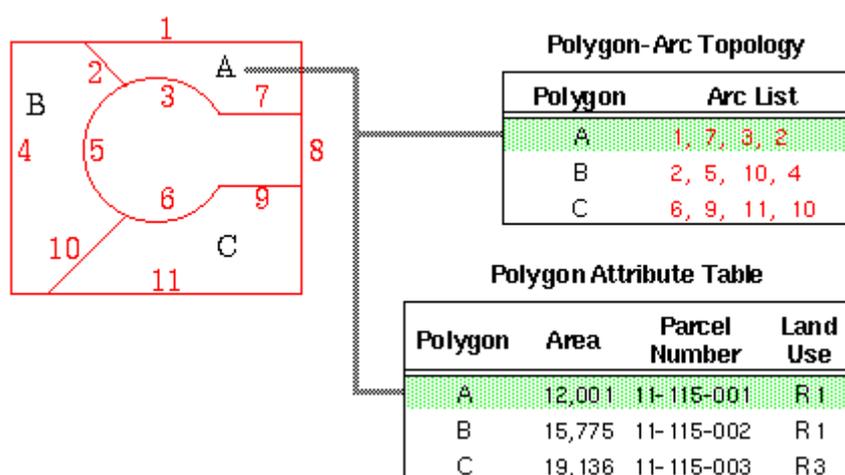


Figura 3.16: Tabla de atributos vectorial de una cobertura de polígonos

Cada tabla, según sea de polígonos, arcos, puntos... se creará con una serie de *items* (columnas) o atributos por defecto, y a partir de ahí se podrán ir añadiendo los atributos que se desee. Las tablas de atributos de polígonos, por ejemplo, se crean con cuatro *items* por defecto: identificador interno, identificador externo, área y perímetro. Sobre esta tabla de atributos, que para el caso de polígonos parte con cuatro *items* de inicio, se podrán añadir atributos nuevos, pero también se podrán crear tablas de atributos nuevas e independientes de esta originaria, y relacionarlas a través de *items* comunes con ella (llamada *feature attribute table*) o con otras tablas de atributos. Estas nuevas tablas se crearán desde el módulo Info de Arc/Info.

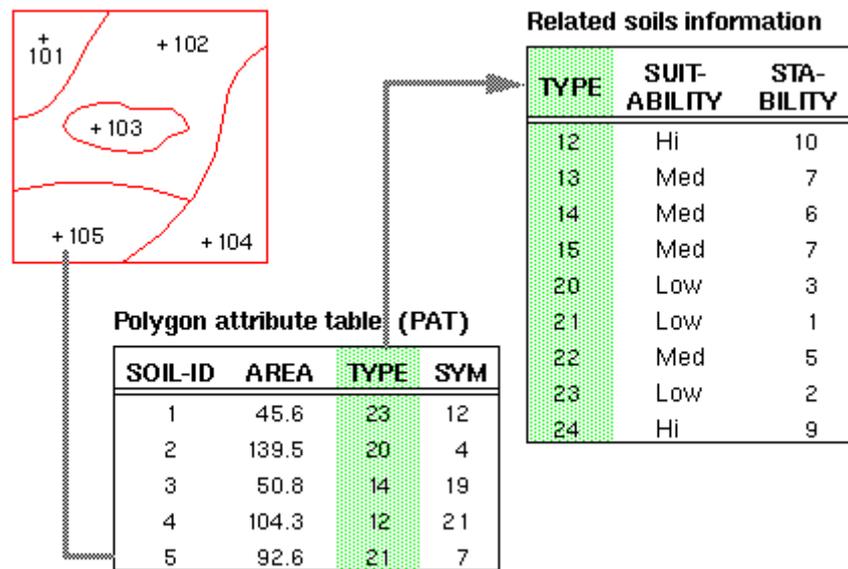


Figura 3.17: Tabla de atributos relacionada con la PAT a través de un ítem común

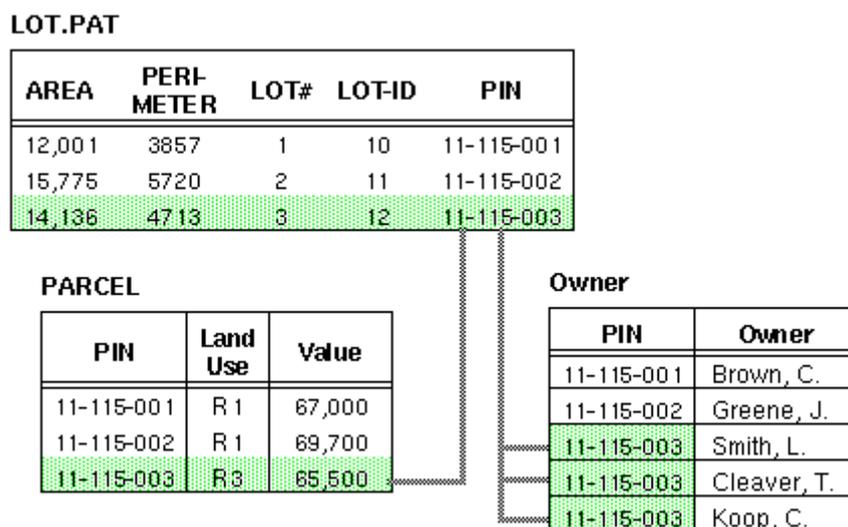


Figura 3.18: Tablas de atributos relacionadas por medio de un campo común

Para la información raster, estas tablas de atributos partirán siempre de la tabla denominada VAT (*Value Attribute Table*), en la que cada registro será un valor de los datos a las celdas que componen los mapas. Esto es, un registro o fila no es ahora la entrada de la tabla asociada a un elemento geográfico (pues en la información raster no hay elementos individuales), sino que corresponde a un valor determinado de las celdas, y los diferentes campos del registro aludirán a propiedades de las celdas que tengan ese valor.

La VAT se creará por defecto con dos *items*, *value* y *count*. El primero de ellos es el identificador del registro, y corresponde lógicamente a los valores asociados a las celdas, mientras que el atributo *count* indica el número de celdas que tienen ese valor. Del mismo modo que para las tablas de atributos de los elementos vectoriales, se podrán añadir *items* nuevos a esta tabla o bien crear tablas nuevas relacionadas con *items* comunes.

Value attribute table (VAT)

Value	Count	Type	Canopy	Height
20	112	Maple	50	35
25	235	Oak	62	56
30	331	Oldfield	5	15
40	216	Conifer	73	68
50	1218	Mixed	76	63
75	626	Water	0	0

Figura 3.19: Ejemplo de tabla de atributos matricial

3.5 Estructuras de datos en ARC/INFO

En el primer nivel del Sistema de Información Geográfica que desarrolla Arc/Info, encontramos, como ya se ha visto en el punto anterior, la base de datos geográfica, esto es, las diferentes estructuras de datos que maneja Arc/Info y en las cuales se insertarán los diferentes elementos geográficos con los que se trabajará. Elementos tales como la superficie del terreno, zonas urbanas, accidentes geográficos, fotografías... entrarán a formar parte del entorno de trabajo bajo el formato de una estructura dada, aquella que mejor los describa y se adapte de forma más adecuada a sus características.

Adjuntamos aquí una pequeña descripción de cada una de las diferentes estructuras de datos que componen la base de datos geográfica, soporte de toda la información de Arc/Info [40], [41].

3.5.1 Coverage

Es el elemento principal en Arc/Info para la representación vectorial de la información y se hará alusión a esta estructura con el apelativo de cobertura vectorial o simplemente cobertura. Generalmente, un *coverage* contiene un solo tipo de elementos geográficos (puntos, líneas o polígonos), aunque esto es por motivos de organización y no por

limitaciones, pues puede contenerlos a todos. Además, deberá contener tics que sirvan para georeferenciar los elementos, y normalmente, junto con el tipo de elemento geográfico existente existirán puntos a modo de etiquetas asociados a estos elementos. Ocasionalmente, también se adjuntarán *annotations* que son elementos puramente descriptivos del entorno a modo de etiquetas.

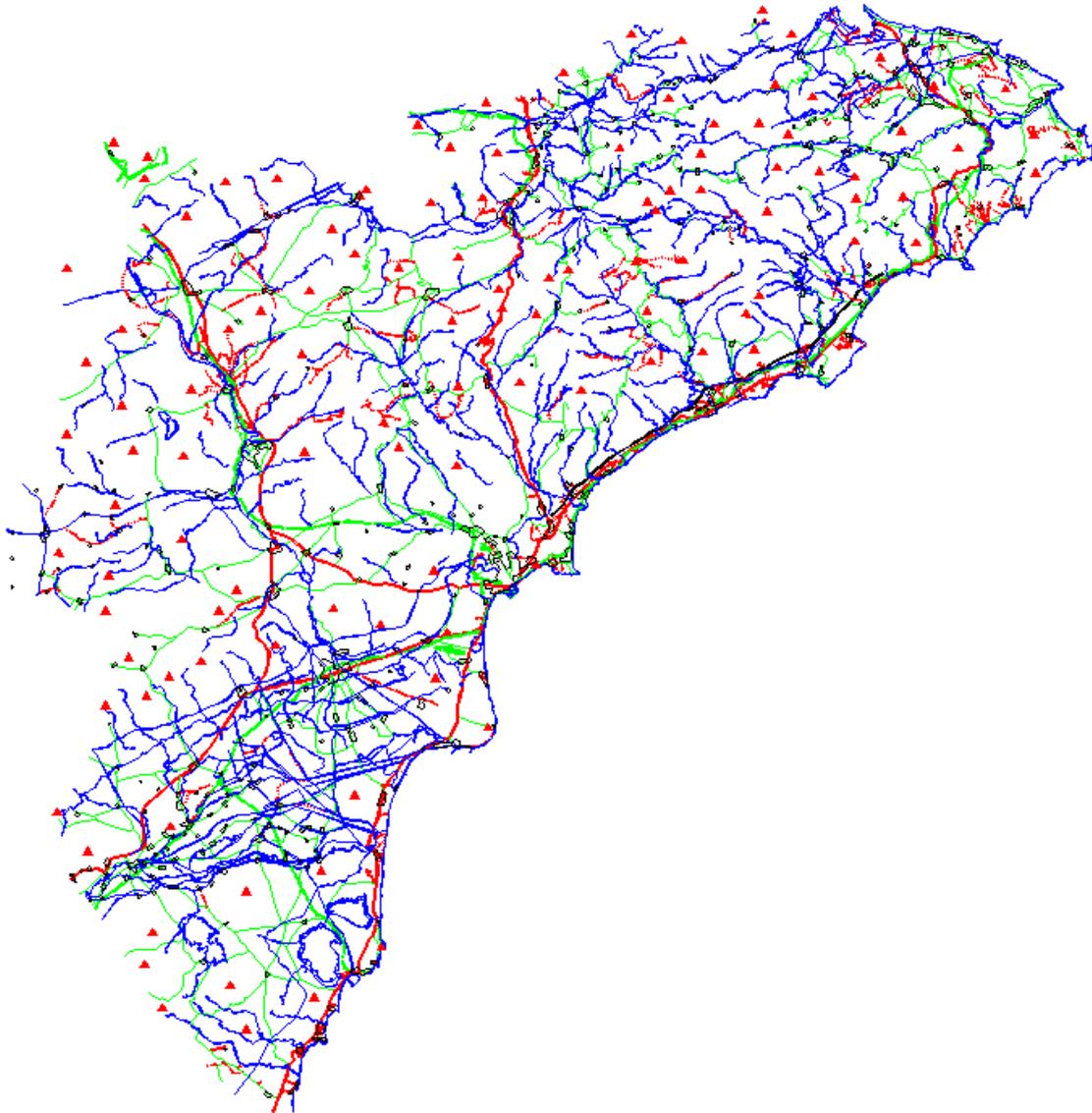


Figura 3.20: Coverages de puntos (picos), arcos (ríos y carreteras) y polígonos (poblaciones) correspondientes a la misma zona geográfica (Comunidad Valenciana)

Está formado por la información espacial de tipo vectorial que describe físicamente a los elementos y por información descriptiva de los mismos, parte de la cual se genera por defecto a través de la topología, como ya indicamos, y a partir de

ahí el usuario añade los atributos que cree convenientes para cada *coverage*. Esto estará contenido, como se ha visto, en tablas de datos, donde cada fila representará a un elemento particular y cada columna será un atributo determinado para los elementos del *coverage*. Si en el *coverage* conviven diferentes clases de rasgos geográficos (polígonos, puntos, arcos, etc.) la información descriptiva se organizará, como ya se comentó al hablar de ella, en estructuras separadas para cada clase, esto es, tablas de atributos para los puntos, tablas de atributos para los polígonos, etc.

La información espacial y la información descriptiva para cada clase de rasgos geográficos se encuentra relacionada a través de los números identificadores de los elementos, que serán columnas comunes en las tablas y que permitirán asociar a cada elemento de la cobertura el registro de la tabla de atributos que le corresponda.

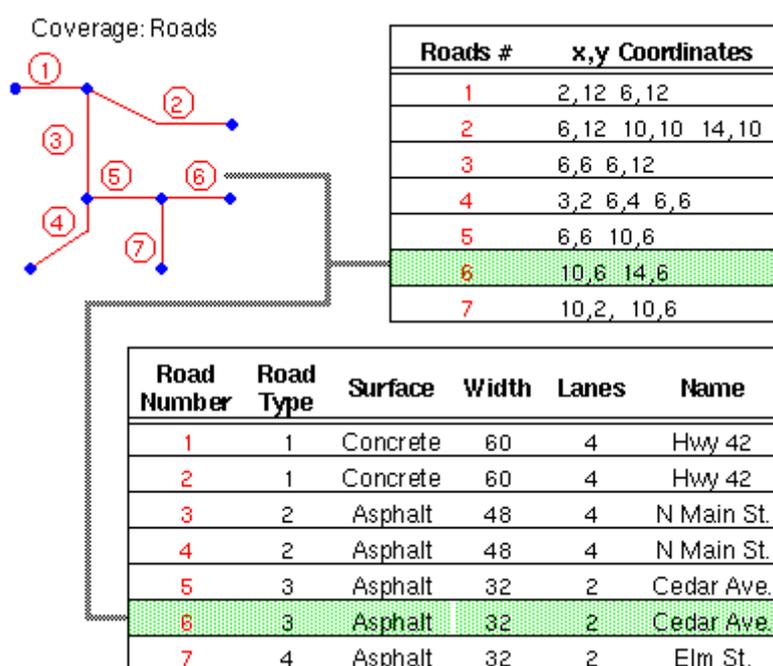


Figura 3.21: Tablas espaciales y de atributos de un *coverage* relacionadas a través del campo de identificación de los elementos individuales

Al crearse las relaciones topológicas sobre el *coverage* se añade la información reseñada al hablar de la topología, y que permite optimizar tanto el almacenamiento como el manejo de la misma.

3.5.2 Grid

Es el equivalente al *coverage* en formato matricial. Un *grid* se compone de una malla homogénea de celdas, cada una de las cuales está caracterizada por un valor. Cada *grid* representará así una variable espacial, y se dispondrá en filas y columnas en un patrón totalmente regular caracterizado por el tamaño de las celdas.

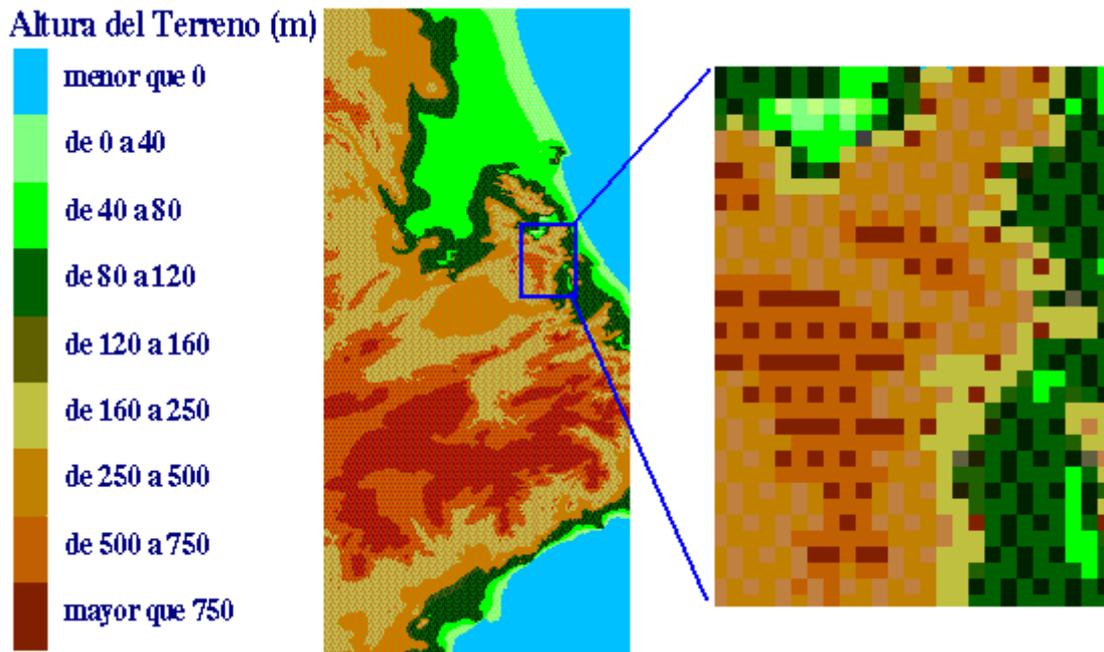


Figura 3.22: Grid de alturas de terreno y zoom de una pequeña parte del mismo

Análogamente al caso de los *coverages*, el *grid* puede recibir información descriptiva, esto es, atributos que el usuario añade al *grid*, y que también se encontrarán contenidos y organizados en tablas de datos. Como ya se adelantó, la tabla de atributos principal del *grid* es la VAT (*Value Attribute Table*), que contendrá por defecto los atributos *value* y *count* (que contienen el valor de las celdas el primero y el número de celdas con cada valor el segundo), tabla que se puede ampliar con nuevos atributos. Se podrán crear también nuevas tablas de atributos relacionadas con algún atributo o columna común a ellas.

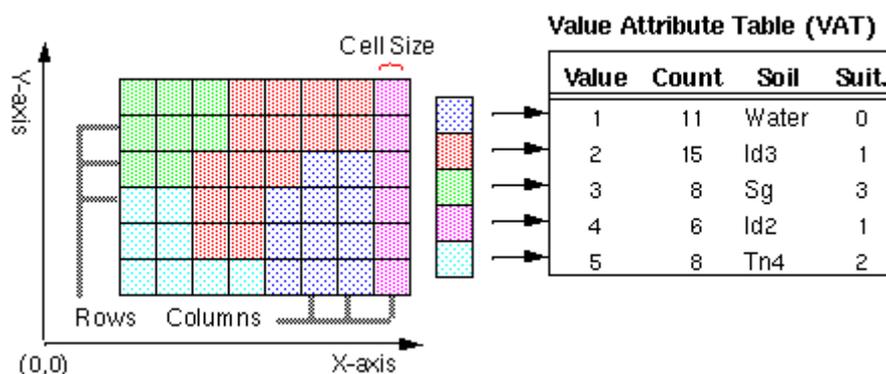


Figura 3.23: Tabla VAT de un grid

3.5.3 TIN

TIN son las siglas de *Triangulated irregular Network*, y constituye una alternativa a los *grids* para la representación de superficies continuas, especialmente terreno. Los TIN serán la estructura de datos más adecuada para representar superficies continuas con marcadas variaciones y con presencia de discontinuidades.

Un TIN [42] está formado por un conjunto de puntos xyz espaciados irregularmente. Cada uno de los puntos se denomina nodo, y uniendo cada nodo con sus nodos vecinos se forman triángulos, que son los elementos característicos de los TIN.

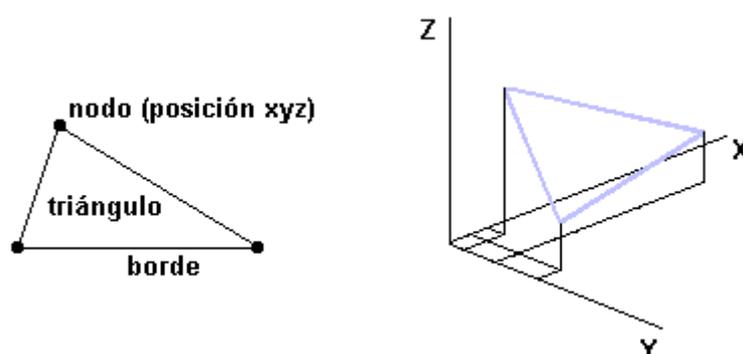


Figura 3.24: Elemento básico de la estructura TIN

Como el número de ubicaciones xyz de una superficie resulta infinito, un TIN tendrá que estar formado necesariamente sólo por un muestreo determinado de las mismas. La cuestión es determinar la cuantía de puntos necesaria para obtener una

representación precisa, y qué puntos seleccionar de todo el conjunto. A partir de este subconjunto de puntos, se construye un modelo teórico de la superficie en el cual el valor z de cualquier ubicación podrá ser obtenido por interpolación de los valores z muestreados.

Los puntos seleccionados en el muestreo serán aquellos en los que halla un cambio en la superficie. Por ejemplo, todos los vecinos del pico de una montaña están por debajo de éste, y todos los puntos vecinos de un punto situado sobre un río excepto los vecinos en el curso del río están por encima. Estos puntos en los que hay un cambio serán puntos seleccionados en el muestreo, y constituirán los nodos de los triángulos del TIN.

Las líneas, como los ríos o las orillas de accidentes geográficos, se denominan *breaklines*, y las áreas de elevación constante, como un lago, se denominan polígonos de exclusión. Estos elementos constituirán lados en los triángulos que se formarán.

Los polígonos de exclusión, las *breaklines* y los nodos controlarán el comportamiento de los operadores del modelado de la superficie del TIN. Por ejemplo, las orillas de un elemento geográfico como un lago o una isla tratarán la elevación del terreno como constante a un lado de la línea (dentro del lago y fuera de la isla). Esto controla a los algoritmos de interpolación para varios operadores de la superficie, como es el caso de la generación de contornos en la que los algoritmos de interpolación reconocen las orillas del lago o de la isla y evitan que los contornos pasen a través de estos límites.

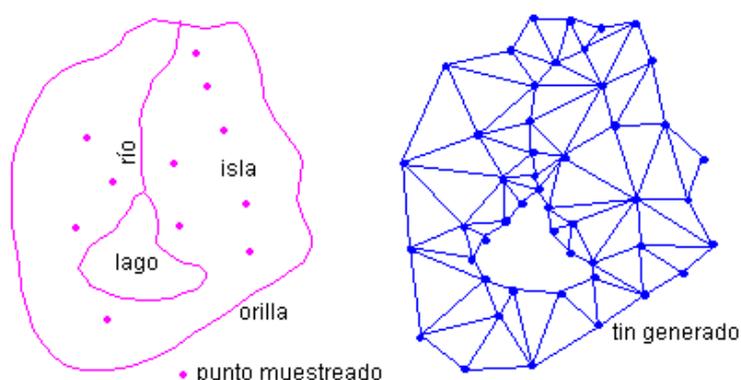


Figura 3.25: Formación de un TIN a partir de *breaklines* (el río), polígonos de exclusión (el lago y la orilla) y puntos relevantes

3.5.4 Lattice

Un *lattice* es un muestreo regularmente espaciado de puntos que representan una superficie. Cada uno de estos puntos es una ubicación xyz de dicha superficie, y el conjunto total de estos puntos formará una rejilla dispuesta en filas y columnas similar a la creada en los *grids*.

La estructura de datos de un *lattice* es la misma que la de un *grid*. De hecho, un *lattice* es prácticamente un *grid*, puesto que todo operador que pide un *lattice* como entrada admite también un *grid*.

La diferencia estriba en que mientras un *grid* asocia a toda la celda el valor muestreado, un *lattice* sólo asocia el valor muestreado al propio punto muestreado (que es el punto central de cada celda), y el valor para el resto de los puntos de la celda se obtiene por interpolación entre valores muestreados. En este sentido, un *grid* realiza una aproximación más gruesa de la superficie a modelar, mientras que el *lattice*, en virtud de la interpolación, busca una adaptación más suave a la superficie real.

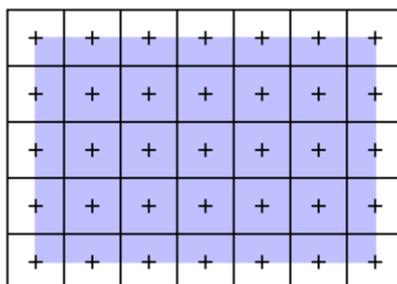


Figura 3.26: Esquema del muestreo que realiza un *lattice*

3.5.5 Image

Una *image* o imagen es un dibujo digital compuesto por celdas regularmente espaciadas llamadas *pixels*. Los *pixels* son la unidad más pequeña de una *image* y representan una ubicación rectangular y su valor. Se organizan en filas y columnas del mismo modo que las celdas de un *grid*, aunque al contrario que éstos, las *images* no tendrán utilidad para tareas de análisis o modelado, sino que se limitarán a enriquecer la información disponible de las zonas que representen.

Una imagen puede estar ya georreferenciada al importarse sobre Arc/Info en virtud de que el formato de la misma lo permita y se haya hecho uso de ello, y en cualquier caso, una vez importada en Arc/Info se puede georreferenciar de modo que pueda representarse en conjunción con otros elementos de Arc/info como *grids* o coberturas.

Para georreferenciar una imagen se puede proceder de varias formas. Una de ellas consiste en dar unas coordenadas geográficas de referencia a una serie de celdas de la imagen y a partir de ahí georreferenciar toda la imagen mediante determinados algoritmos. También existe un modo muy poco sutil de hacerlo que sería el de dar las coordenadas de un punto de referencia y un tamaño de celda y a partir de ahí que Arc/Info referencia el resto de celdas, aplicando el tamaño de celda como paso o incremento de las unidades geográficas de una celda a la contigua.

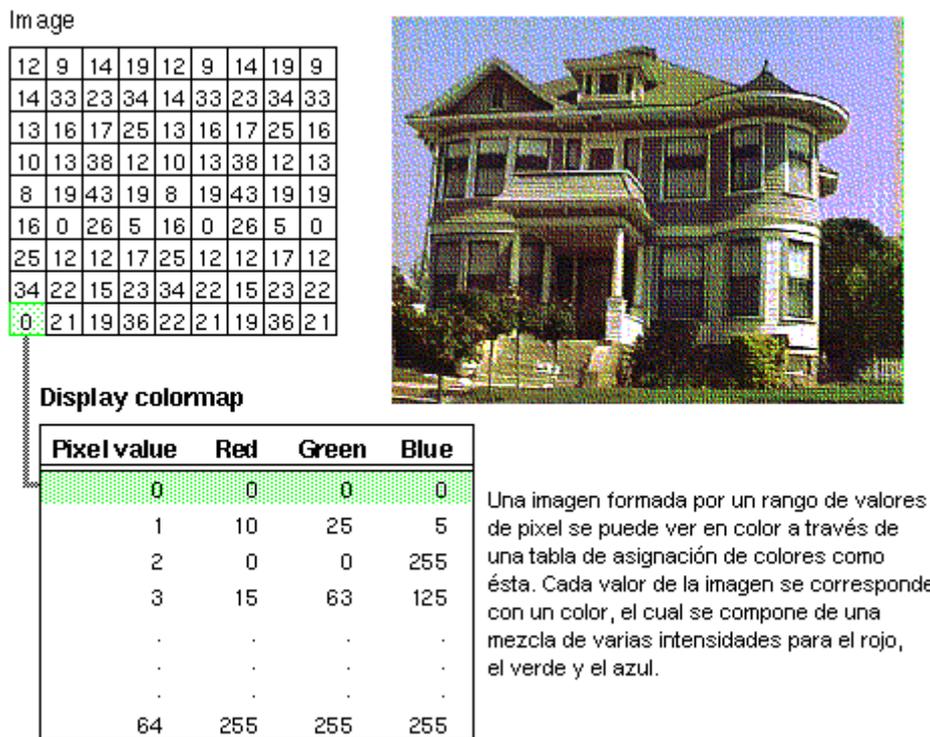


Figura 3.27: Imagen con paleta de colores

Un modo muy práctico para georreferenciar y importar una imagen con formato TIFF como capa de información es el de definir una serie de vectores de desplazamiento sobre la imagen *-links-*, de modo que el origen de cada vector es un punto de la imagen a desplazar (georreferenciar) y la punta del vector es el lugar de

destino de dicho punto. Para realizar esto hay que, o bien conocer las coordenadas destino explícitamente, o bien disponer de un mapa ya georreferenciado sobre el cual marcar estos puntos de destino. Éste es un método muy adecuado cuando se dispone de una imagen ya referenciada pero que se quiere ajustar con más exactitud a una serie de mapas de la misma zona geográfica que la imagen. Esta forma de proceder fue la empleada para georreferenciar el mapa de descriptivo de España a través del comando avanzado *rectify* del módulo *Arc*.

Todas las operaciones sobre las *images* las realiza el módulo *Image Integrator* de Arc/Info [43], el cual soporta los siguientes formatos: *GRID* (no sólo el de Arc/Info sino cualquier *grid* de ESRI), ADRG, ERDAS IMAGINE, GRASS, RLC, BIL, BIP, BSQ, TIFF y ficheros *raster* de Sun.

3.5.6 Dibujos CAD

CAD son las siglas de *Computer-aided drafting*, y hace referencia a los sistemas para crear mapas y dibujos de carácter técnico que durante años se han venido utilizando masivamente. Dentro de una base de datos GIS juegan el mismo papel que las *images*, esto es, el de presentar información a modo de dibujo del área de interés para enriquecer el conocimiento sobre una zona pero sin utilidad para el análisis o el modelado. Por ello, al igual que las *images*, dentro de una base de datos GIS suelen figurar como mapas de fondo o superpuestos a los mapas sobre los que verdaderamente se trabaja, que son los *grids* y los *coverages* [43].

Arc/Info puede convertir desde y hacia una serie de formatos comunes de CAD. A través de un interface de DXF, Arc/Info puede dibujar automáticamente ficheros DXF ASCII y binarios sin previa conversión de formato [44].

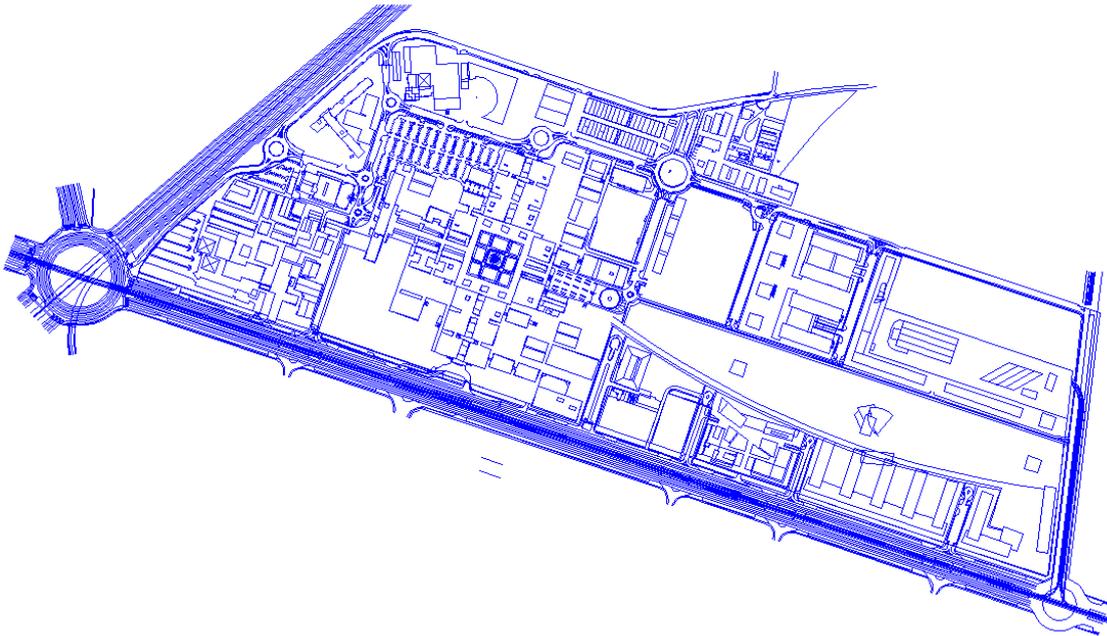


Figura 3.28: Dibujo CAD de la Universidad Politécnica de Valencia importado por Arc/Info

3.5.7 Las librerías de mapas

La información vectorial de Arc/Info, que cristaliza en las coberturas vectoriales o *coverages*, puede organizarse en las llamadas librerías de mapas. Éstas constituyen un modo eficiente de estructurar la información vectorial, y proporcionan una integración de las distintas coberturas vectoriales en estructuras compactas de modo que se obtendrán, al menos, las siguientes ventajas en relación a mantener individualizadas las coberturas vectoriales [45]:

- Manejo conjunto de las diferentes capas de información o coberturas vectoriales de cada zona geográfica, sin tener que incidir individualmente en cada una de ellas. Las distintas coberturas vectoriales de una zona geográfica se integrarán todas en una misma librería de mapas, de modo que cada cobertura será una *capa* de la librería de mapas. La librería de mapas se constituye así como una suma de capas, cada una de ellas diferenciada en la estructura de la librería, con lo cual se podrán manejar las capas en bloque o inhibir selectivamente algunas de ellas, según convenga en cada caso.

- Manejo eficiente de grandes volúmenes de información vectorial que se traducen en *coverages* de gran tamaño muy aparatosos de manipular. Esto se consigue seccionando el área de extensión de las coberturas en secciones llamadas *tiles*, de modo que internamente cada cobertura se partirá en fragmentos diferenciados sobre los que se podrá incidir individualmente.
- Control de acceso de usuarios a las diferentes librerías de mapas, organizado en cinco niveles de acceso. Cada nivel proporciona una serie de privilegios o permisos sobre las librerías, que van desde la prohibición total de acceso hasta el máximo privilegio sobre la librería, que será el del administrador de la misma. Cada librería de mapas tendrá su relación de permisos para los distintos usuarios, permisos que concederá el administrador de la librería.

Una librería de mapas, que en adelante también llamaremos mapoteca, es pues una agrupación de coberturas constituyendo cada una una *capa*, y divididas todas ellas en secciones llamadas *tiles* para mejor organización espacial de la información [46].

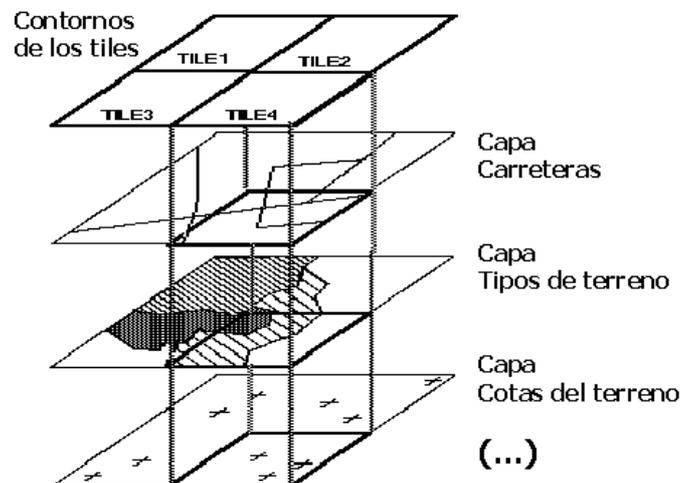


Figura 3.29: Esquema de una librería de mapas

Para definir los límites de los *tiles* se utiliza una cobertura vectorial de polígonos de referencia llamada índice, de manera que cada polígono demarca la extensión de cada *tile* de la mapoteca.

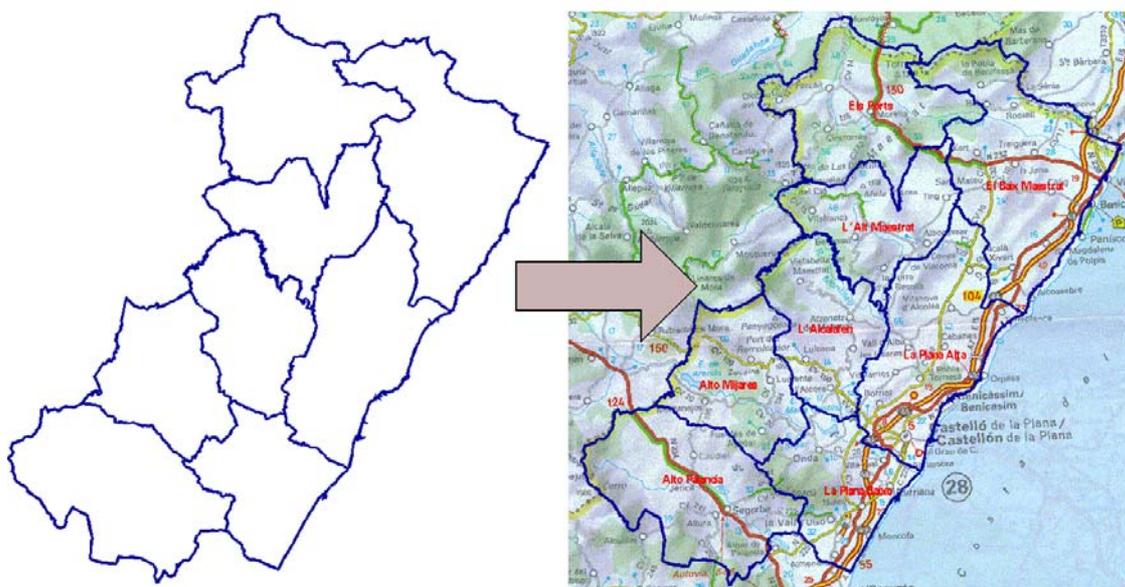


Figura 3.30: Índice de una mapoteca (izquierda) y tiles que origina (derecha)

En esta tesis, toda la información geográfica de tipo vectorial se encuentra organizada en mapotecas, de forma que cada mapoteca reúne la información vectorial de una zona geográfica dada. En la figura 3.30 se ve un ejemplo con la provincia de Castellón, constituyéndose una mapoteca dividida en *tiles* que son las comarcas de la misma.

3.6 Módulos del lenguaje de comandos de Arc/Info

El lenguaje de comandos utilizado en Arc/Info para la comunicación con el exterior se encuentra dividido funcionalmente en módulos independientes, cada uno de los cuales habilitan su propia línea de comandos (introducida por un *prompt* indicativo del módulo sobre el que se trabaja) y arranca sus propias ventanas gráficas. Tal es la independendencia entre los módulos, que incluso cada uno de ellos lleva licencias de uso diferenciadas, con lo cual un usuario puede adquirir sólo la parte de Arc/Info que le interese.

A continuación se describen los módulos utilizados en el desarrollo de esta tesis.

3.6.1 Arc

Es el módulo principal de la aplicación y la puerta de entrada a la misma. Siempre se debe arrancar en primer lugar, de modo que el resto de módulos se abrirán desde la línea de comandos de éste.

Contiene todo el repertorio de comandos para el manejo de las estructuras de archivos propias de Arc/Info, así como una variada selección de comandos de análisis [46], gestión y manipulación de las estructuras de datos soportadas por la herramienta, tales como los comandos conversores de unas estructuras a otras (*grid* a vectorial y viceversa, DXF a vectorial y viceversa, etc.), funciones de análisis de visibilidad o funciones generadoras de perfiles o vistas 3D [47].

3.6.2 Grid

Es el módulo que soporta la mayoría de acciones posibles sobre los *grids*. Incluye funciones y comandos, conformando un abanico extenso de posibilidades de análisis y tratamiento de la información de tipo *grid*, tanto desde una óptica celda-a-celda, como con tratamientos de tipo zonal, focal y global de los grids.

El módulo *Grid* [48] ofrece la posibilidad de invocar sobre él sin ningún tipo de elemento mediador a los comandos del módulo de dibujo *Arcplot*, a los comandos de TIN y de *Lattice*, y a los comandos de *Arc*, debiéndose anteponer a estos últimos la partícula *arc* para expresar que el comando que figura a continuación es de dicho módulo. Del mismo modo, las representaciones de mapas propias de *Arcplot* (los mapas vectoriales) pueden volcarse sobre la ventana gráfica de *Grid*, y de este modo aparecer sobre la misma ventana cuantos mapas matriciales y vectoriales simultáneos se desee.

Estas posibilidades de interacción desde el módulo *Grid* sobre otros módulos es la que provoca que sea este módulo el principal sostén de la aplicación, trabajándose en casi todo momento desde la línea de comandos de *Grid*, con incursiones puntuales en las líneas de comandos otros módulos (sobre todo *Arccedit* e *Info*). Del mismo modo, la ventana gráfica de *Grid* es la principal de la aplicación, limitándose el uso de ventanas de otros módulos a opciones muy específicas, tras las cuales se volverá siempre a la ventana gráfica de *Grid*.

3.6.3 Arcplot

Es el módulo especializado en la representación gráfica de todo tipo de mapas de información vectorial, así como imágenes, mapas de CAD y leyendas para todos ellos.

Debido a la posibilidad de invocar todos los comandos de *Arcplot* desde *Grid* y de representar sobre la ventana gráfica de éste los mapas propios de aquél, el módulo *Arcplot* [45] solamente se arrancará en esta tesis para el dibujo de gráficas, tales como perfiles de señal, histogramas, perfiles de alturas..., para lo cual *Arcplot* viene preparado con un paquete de comandos diseñados al efecto. Tras estas intervenciones puntuales del módulo *Arcplot* sin su invocación desde *Grid*, siempre se cerrará el módulo después de cada una de ellas y se volverá al módulo *Grid*.

3.6.4 Arcedit

Este módulo está especializado en la edición de mapas de información vectorial en cualquiera de las formas que estos pueden presentar. La edición no incluye sólo a la información espacial de estos mapas, sino también a la información descriptiva asociada a ellos. Es decir, se podrán editar las tablas de atributos de los mapas vectoriales, y con ello modificarlas, analizarlas, crearlas...

La edición de la información espacial, además de poder realizarse desde la línea de comandos de forma puramente textual, también podrá hacerse servir de la ventana gráfica de *Arcedit* para la manipulación desde ella de los mapas y los elementos que los conforman [49].

En esta tesis, el módulo *Arcedit* se abrirá puntualmente en la ejecución de algunas opciones que requieran la edición de mapas, bien para que el usuario mismo pueda incidir en modificaciones sobre los mismos, o bien para opciones en las que se requiera la creación auxiliar de mapas vectoriales (por ej., en la creación de coberturas de puntos como emplazamientos desde los cuales estudiar visibilidad directa del entorno) o la manipulación de mapas existentes. Tras cada una de sus intervenciones, este módulo se cerrará para ceder de nuevo el control al módulo *Grid*.

3.6.5 Info

Es el módulo destinado a la edición de tablas de datos [50], tanto tablas de atributos de las diferentes estructuras de datos como tablas de otra índole, como las de leyendas, las de información para el dibujo de mapas, tablas de datos de gráficas y de estadísticas, etc.

En la versión de Arc/Info utilizada en esta tesis, aparecen ya los llamados cursores, que constituyen una herramienta de acceso a las tablas Info que elimina la necesidad de abrir el módulo Info y trabajar sobre él. Además, los cursores consiguen un manejo muy cómodo y rápido de las tablas, por lo que en esta tesis se utilizan con profusión, quedando el uso de *Info* restringido a la creación de tablas, realizándose la edición desde los cursores. Los comandos que utilizan cursores están habilitados en *Arcplot*, por lo que desde *Grid*, por las razones ya mencionadas, se tendrá acceso a esta facilidad.

3.6.6 Librarian

El módulo *Librarian* es el encargado de crear, editar y gestionar las *Librerías de Mapas* o *Map Libraries*.

De acuerdo con la organización de la información realizada en esta tesis, la información geográfica se encontrará estructurada en librerías de mapas, tal y como se ha explicado con anterioridad. La creación de estas librerías de mapas se realizó desde este módulo. La actualización de las mismas, a medida que se fueron obteniendo nuevas capas de información, también se realizó desde este módulo, trabajando sobre la línea de comandos, así como la gestión y mantenimiento de estas estructuras de datos.

El módulo *Arcplot* contiene toda una serie de comandos especializados en la representación de la información de las librerías de mapas, pudiendo controlarse los *tiles* por separado así como las *capas*. Por esta razón, el uso de *Librarian* en esta tesis queda muy restringido, y finalmente se usa solamente en los casos en los que hay que crear un *grid* a partir de una zona geográfica determinada de una librería de mapas. Para ello, primero hay que extraer esta zona geográfica desde el módulo *Librarian*

para crear una cobertura vectorial no seccionada en *tiles*, y finalmente convertir esta cobertura vectorial a *grid* haciendo uso de los comandos de *Arc*.

3.6.7 Image integrator

Desde este módulo se manejan las *imágenes* o *images*. Entre las posibilidades que ofrece está la de importar diversos formatos de imágenes al entorno de Arc/Info, georreferenciar y crear catálogos de imágenes. Los catálogos de imágenes estarán formados por conjuntos de imágenes georreferenciadas que formarán en conjunto una imagen unión de todas ellas, quedando transparente al usuario el hecho de que la imagen que ve está formada en realidad por la unión de varias imágenes.

En esta tesis no se hará uso de este módulo, ya que la imagen del mapa de carreteras que constituye una de las capas de información de la aplicación, se puede dibujar desde *Arcplot*. Por su parte, el proceso de georreferenciar esta imagen se realizó con ayuda de un potente comando llamado *Register* que se encuentra en el módulo *Arc*.

3.7 El lenguaje de macros AML

La versión de Arc/Info utilizada en esta tesis (versión 7.0.3. sobre Unix) ofrece, como ya se ha indicado en apartados anteriores, un *shell* o línea de comandos como interfaz con el usuario. Al contrario que las últimas versiones de Arc/Info, que ofrecen sobre Windows un potente interfaz gráfico para el acceso del usuario al programa, esta versión se limita a habilitar ciertos interfaces gráficos (las *Arc Tools*) para tareas específicas de dibujo y edición de mapas, por lo que un usuario que quiera explotar a fondo las posibilidades de la aplicación operará sobre la línea de comandos para no verse ceñido a las opciones habilitadas en los mencionados interfaces.

Se hace necesaria por tanto la intervención de algún mecanismo para poder trabajar eficientemente, sobretodo en términos de automatización de procesos y en la creación de un interfaz que permita trabajar con rapidez y flexibilidad. Con este fin Arc/Info contiene un lenguaje de macros llamado AML (Arc Macro Lenguaje) [51], [52].

El AML es un lenguaje algorítmico de alto nivel para la generación de aplicaciones de usuario final. Incluye facilidades de creación de menús gráficos en

pantalla, uso y asignación de variables, control del flujo y estado de la ejecución, captura y uso indistinto de coordenadas de página (pulgadas, centímetros...) o de mapa.

Incluye un extenso paquete de comandos que pueden ser usados interactivamente desde la línea de comandos (desde cualquier módulo de Arc/Info) o bien en programas (macros) AML. Contiene también comandos que informan del estado del entorno de trabajo de Arc/Info. Los comandos de AML se pueden agrupar en cuatro clases:

- **Directivas:** palabras reservadas del lenguaje precedidas siempre con el identificativo "&" y que ejecutan algún tipo de acción, a partir de ninguno, uno o varios argumentos de entrada, o bien se utilizan en las estructuras propias de AML, como control del flujo, bucles, asignación de variables, etc.
- **Funciones:** estructuras enmarcadas entre corchetes que ofrecen un valor de salida a partir de uno o varios valores de entrada.
- **Widgets:** elementos para la creación de menús interactivos de usuario, tales como *inputs*, barras, listas, botones, etc. Aparecerán exclusivamente en los ficheros de tipo *menú*.
- **Comandos de Arc/Info:** Lógicamente, los comandos de Arc/Info podrán incluirse en los programas AML, pues finalmente son estos comandos los que ejecutan y explotan las acciones propias de Arc/Info.

A partir del AML se construyó la aplicación de alto nivel sobre Arc/Info que constituye el resultado de esta tesis. Básicamente, una aplicación de este tipo contiene tres tipos de ficheros fuente fundamental.

- **AML:** Son macros que se construyen desde cualquier editor de texto y que se ejecutan sobre el Arc/Info. Contienen código AML formado por los elementos antes mencionados, y podrán llamarse unas a otras, del mismo modo que podrán invocar menús o ficheros de algún lenguaje externo que se ejecutarán sobre el sistema operativo.

- Menús: Son ficheros de texto con un formato que entiende Arc/Info y que una vez interpretados por éste representan menús interactivos de usuario. Están constituido básicamente por los *widgets*, que eran los elementos de AML creados para este fin.
- Ficheros de otros lenguajes: Se invocan desde los ficheros AML y se ejecutan sobre el sistema operativo, fuera de Arc/Info.

Los AML y los menús son tratados en el *intérprete de AML de Arc/Info*. Esta herramienta genera, a partir de estos ficheros, el flujo de comandos que se ejecutarán sobre el lenguaje de comandos de Arc/Info. Se encargará de sustituir las variables por su valor, resolver las funciones, interpretar las condiciones lógicas, desdoblar las estructuras de control de flujo en la línea de flujo definitiva, etc. De este modo, el texto que sale del intérprete es ya un texto totalmente concreto formado por comandos que podrían haberse tecleado uno a uno desde la línea de comandos.

Debido a este modo de trabajar, con un intérprete que hace de intermediario entre el lenguaje de alto nivel y la línea de comandos de la aplicación, la velocidad de ejecución de estas estructuras no será comparable a la que ofrecen los lenguajes compilados, por lo que será conveniente hacer uso de la posibilidad de utilizar éstos para derivar la algorítmica que no sea propia del entorno de Arc/Info a módulos externos al GIS. Esto es lo que se hace en esta tesis, derivando la algorítmica que no trabaje directamente sobre la manipulación de estructuras de Arc/Info a rutinas de lenguaje C.

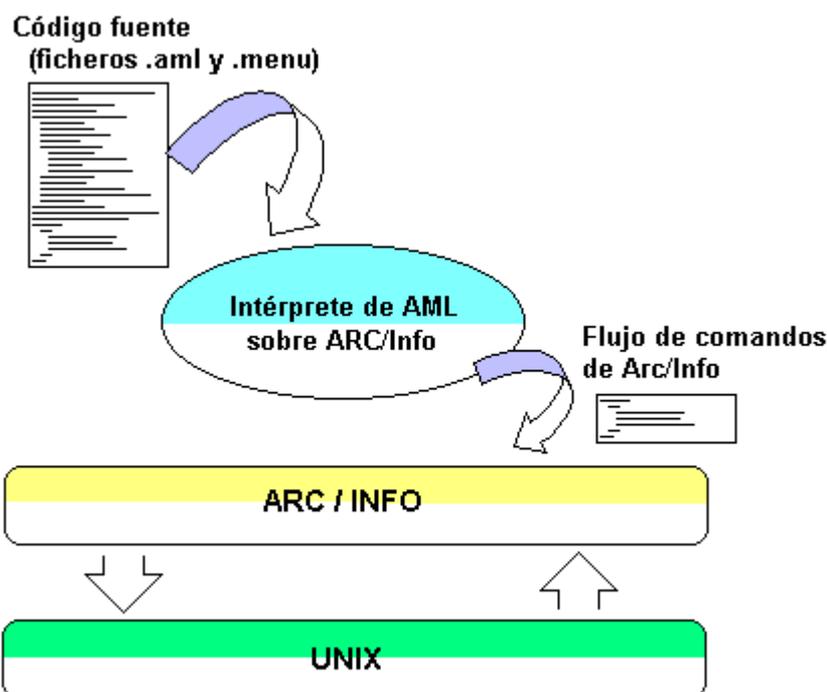


Figura 3.31: El Intérprete de AML transforma el código AML fuente en un flujo de comandos de Arc/Info

El código del lenguaje AML se estructura modularmente en los dos tipos ficheros comentados (AML y menús) y está concebido en la línea de los lenguajes de programación clásicos; esto es, se trata de un lenguaje procedural sin ninguno de los elementos que los lenguajes orientados a objetos de más reciente concepción han aportado.

Cada fichero se comporta como una rutina que puede a su vez invocar a otras, manejándose variables locales a las rutinas y también variables globales vistas por todas ellas. Cada fichero termina con la directiva *&return*, mientras que un programa terminará en el momento en que no quede ningún fichero abierto.

3.8 Escenario del sistema de referencia para simulaciones

UMTS

En el grupo de comunicaciones Móviles de la UPV se ha trabajado recientemente dentro del proyecto COST 273 en el tema de la estandarización de un escenario común de referencia para simulaciones UMTS [53]. En este apartado mostramos en

breve la relación de esta idea con los sistemas de información geográfica en la que hemos basado nuestro modelo de planificación.

Dentro del proyecto de COST 273 se ha propuesto un escenario común para desarrollar, probar y comparar las herramientas de simulación y optimización de redes móviles, denominado actualmente MORANS. La estructura de la red, la selección de emplazamientos, la cobertura radioeléctrica, el diseño de las antenas y los parámetros de calidad de servicio, tienen que ser tratados de forma común, por lo que será de alto interés un escenario de referencia para todas estas capas de información. Las aplicaciones pueden ser múltiples e incluir planificación y optimización de la Red, diseño de algoritmos de RRM, parámetros de nodos B, introducción de antenas inteligentes, codificación de canal, gestión de movilidad, y modelado de tráfico entre otros.

3.8.1 Requerimientos del Escenario de Referencia:

El escenario tiene que satisfacer un número de requisitos para ser de utilidad práctica. Algunos de estos requisitos son:

- Simplificado: Que requiera el mínimo número de parámetros y de información, usando los estrictamente necesarios.
- Flexible: Para dar una utilidad práctica a los resultados teóricos, se define un modelo general, que se ajusta al abanico de posibles situaciones reales.
- Acotado: Un número limitado de casos y de secciones. El problema principal surge de la incompatibilidad de diversos sistemas de información GIS.
- Estructurado en capas: Para guardar un alto grado de flexibilidad, los interfaces entre las diversas capas tienen que ser definidas. Esto permite una modificación simple del Escenario de la referencia.
- Simetrías horizontales y verticales: La estructura debe ser similar para escenarios reales y sintéticos, es decir el caso 1 en el mundo sintetizado debe ser equivalente al caso 1 en el escenario verdadero. Condiciones: esta simetría se debe mantener en los interfaces entre capas

- Extensible: El marco debe ser extensible. Para guardar una estructura básica simple se propone una extensión horizontal más bien que una vertical. Esto significa que la estructura de la capa no debe ser modificada, pero el plano horizontal da un número de posibilidades de varios escenarios.
- Independencia: El modelo tiene que ser independiente de cualquiera interés comercial directo o de ninguna red en particular.
- Disponibilidad: El objetivo es hacer los datos comunes disponibles para el público de modo que todos pueden comparar los resultados obtenidos bajo las mismas condiciones. Existen muchas posibilidades para manejar el esfuerzo de las organizaciones en este camino.

3.8.2 Capas de los datos

Todos los casos tienen algunas características en común. Estas características se pueden estructurar en cinco capas. Esta estructura permite compatibilidad completa a los modelos del despliegue descritos en la propuesta de 3GPP [54].

- Capa 1. Datos geográficos.

Para un escenario real esta capa debe ser la capa inferior. Para cubrir toda la zona de interés, el área propuesta tiene que incluir un escenario típico de COST como *typical urban, sub-urban, rural o hilly terrain*.

- Capa 2. Tráfico y cobertura.

En la capa 2 se definen los requisitos del tráfico y de la cobertura tienen que ser definidos. Esto también incluye los modelos de movilidad, y las definiciones de calidad de servicio.

- Capa 3. Localización de *sites*.

La capa tres define la localización de emplazamientos. Es importante definir un amplio conjunto de emplazamientos posibles, para dar la posibilidad de modificar la red para el aumento futuro del tráfico y la capacidad.

- Capa 4. Propagación

Esta capa define la propagación. Es necesario definir no solamente los modelos de propagación, sino proporcionar realizaciones de mapas de propagación para el área de investigación. Esto hace el modelo de propagación independiente de la implementación utilizada.

- Capa 5. Antenas y parámetros

La capa 5 finalmente incluye la antena, el nodo B y los parámetros generales de la Red. Para la antena se incluyen parámetros como el modelo de la antena, acimut, inclinación, etc. La separación entre los ficheros de la propagación y los parámetros de la antena permite una investigación más simple para diversos modelos de antenas. Respecto al nodo B se incluyen los parámetros físicos de la capa cómo *active set size*, margen de *handover*, las pérdidas del cable, etc.

4

Planificación de Sistemas 3G

4.1 Introducción

Como en cualquier sistema de comunicaciones móviles, un sistema 3G precisa de un proceso de planificación radio previo a la implantación de la red. La planificación radio en UMTS, tiene por objeto realizar los cálculos de cobertura y capacidad para optimizar el despliegue de estaciones base para cumplir los requisitos de calidad de servicio establecidos por el operador.

En sistemas CDMA, la planificación de cobertura radio es más complicada que en sistemas TDMA (como GSM), ya que al contrario que en estos últimos, en CDMA la cobertura, el tráfico cursado (volumen y tipo: voz, datos, etc.) y la distribución geográfica de los usuarios no están relacionados entre sí. En sistemas UMTS se produce el denominado efecto de “respiración celular”, que consiste en que a medida que el tráfico por estación crece, los radios de cobertura efectivos de las celdas disminuyen. Por esto, un determinado despliegue sólo será válido si el tráfico cursado se ajusta a los parámetros de diseño. Los aspectos más importantes a considerar para la planificación de un sistema 3G son los siguientes:

- Determinación del radio de cobertura de las estaciones base.
- Estimación del volumen y el tipo de tráfico cursado por estación base.
- Distribución geográfica de los usuarios en el área a cubrir.
- Entorno de propagación del sistema.

Puesto que nuestro modelo se basa en GIS debemos conocer muy bien la estructura de los sistemas de información geográfica. Existen diferentes sistemas GIS en el mercado y se han optado por utilizar el GIS ARC/INFO de ESRI.

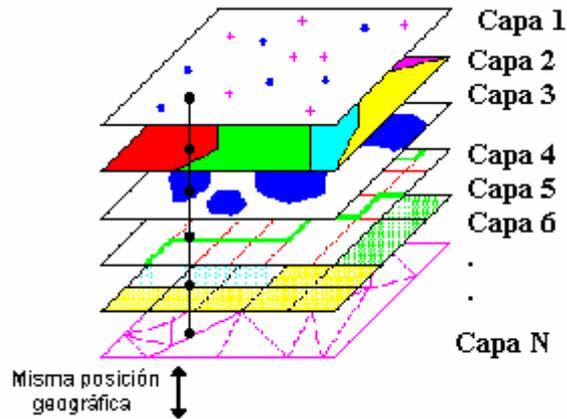


Figura 4.1: El modelo de planificación de sistemas 3G está basado sobre multi capas de Información geográfica

Esta información como se ha visto en el Capítulo anterior se podía traducir en rejillas con diversos colores asociados para representar una cierta información de la ciudad como las calles, edificios, ríos, zonas de arbolado, número de plantas de los edificios. Alguna de esta información es almacenada en formato vectorial, pudiéndose manejar fácilmente desde fuera con las sintaxis de ARC/INFO [40] y del sistema operativo. Véase las figuras 4.1, 4.2

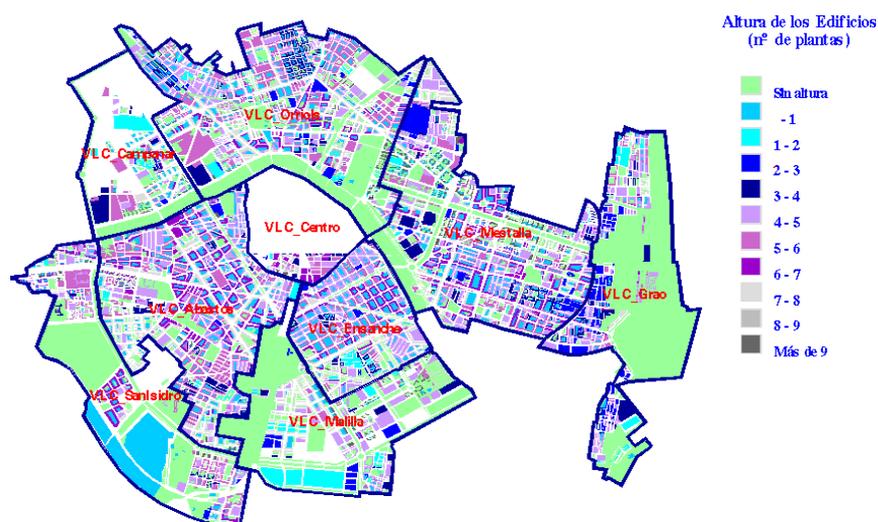


Figura 4.2: Representación de los edificios de la ciudad de Valencia con el número de plantas en diferentes colores

En la figura siguiente se muestra la estructura del modelo de planificación que se ha empleado en esta tesis.

El cuadro que aparece en gris es la base de datos del terreno que está actualmente en formato *grid* del software de Arc/Info como se ha explicado en el capítulo anterior, los cuadros que aparecen en azul son las tablas utilizadas en esta tesis y fueron proporcionadas por el UMTS Forum, el cuadro en verde, es la penetración del mercado, que es un parámetro de entrada depende del operador como se verá a continuación, los cuadros en amarillo, son los resultados que se han obtenido en esta tesis y que se ven en la pantalla, y los cuadros en blanco son los cálculos internos que se calculan y manejan durante el proceso de planificación. A continuación vamos a analizar este bloque de diagrama por partes.

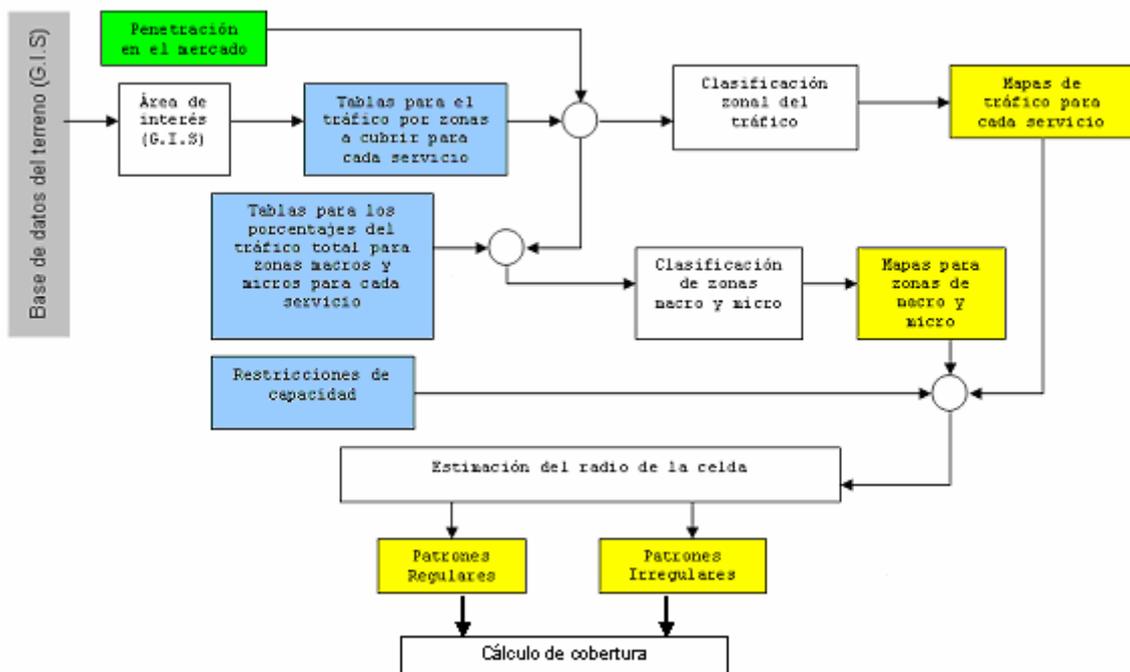


Figura 4.3: Esquema General del modelo de planificación empleado en esta tesis

4.2 Estimaciones del tráfico UMTS

Haciendo uso de las estimaciones de tráfico facilitadas por el UMTS Forum [55], podemos crear los mapas de tráfico asociados con nuestros mapas de trabajo. Las estimaciones de tráfico aparecen en las siguientes tablas:

Tabla 4.1: OBQ UL (kbit/h/km²) after Adjustment for Blocking, Year 2005

Services	CBD/Urban (in Building)	Suburban (in building or on street)	Home (in building)	Urban (pedestrian)	Urban (vehicular)	Rural (in-&out-door)
High Interactive MM	3.78×10^8	4.73×10^5	5.37×10^3	8.69×10^6	2.17×10^6	1.66×10^4
High MM	1.38×10^6	2.62×10^4	1.38×10^3	3.93×10^5	6.75×10^2	8.62
Medium MM	5.75×10^5	6.82×10^3	3.60×10^2	1.67×10^5	2.86×10^2	2.24
Switched Data	9.58×10^7	2.99×10^5	9.22×10^3	4.76×10^6	3.66×10^5	5.61×10^3
Simple Messaging	2.76×10^6	5.53×10^4	2.92×10^3	8.29×10^5	1.42×10^3	1.82×10^1
Speech	3.52×10^8	1.29×10^6	5.98×10^4	8.20×10^7	3.56×10^6	3.46×10^4

Tabla 4.2: OBQ DL (kbit/h/km²) after Adjustment for Blocking, Year 2005.

Services	CBD/Urban (in building)	Suburban (in building or on street)	Home (in building)	Urban (pedestrian)	Urban (vehicular)	Rural (in- &out-door)
High Interactive MM	3.78×10^8	4.73×10^5	5.37×10^3	8.69×10^6	2.17×10^6	1.66×10^4
High MM	2.76×10^8	5.24×10^6	2.77×10^5	7.86×10^7	1.35×10^5	1.72×10^3
Medium MM	2.21×10^7	2.62×10^5	1.38×10^4	6.42×10^6	1.10×10^4	8.62×10^1
Switched Data	9.58×10^7	2.99×10^5	9.22×10^3	4.76×10^6	3.66×10^5	5.61×10^3
Simple Messaging	2.76×10^6	5.53×10^4	2.92×10^3	8.29×10^5	1.42×10^3	1.82×10^1
Speech	3.52×10^8	1.29×10^6	5.98×10^4	8.20×10^7	3.56×10^6	3.46×10^4

Podemos observar que la clasificación zonal del tráfico estimado depende directamente del tipo de entorno.

Para distinguir entre las diferentes zonas indicadas en las estimaciones, hemos utilizado la información digital asociada a cada mapa de las ciudades que disponemos, como un factor de densidad de población. Uniendo la información de las zonas con las tablas de tráfico estimado, obtenemos los mapas de tráfico asociados a cada uno de los tipos de servicio como se muestra a continuación en la figura 4.4 donde se representa el caso de servicio de voz en este mapa de tráfico para el UL, correspondiendo el color más oscuro a las zonas con mayor densidad de tráfico.

Este mapa fue generado por nuestro modelo de planificación, donde se pueden observar referencias geográficas a los puntos del mapa.

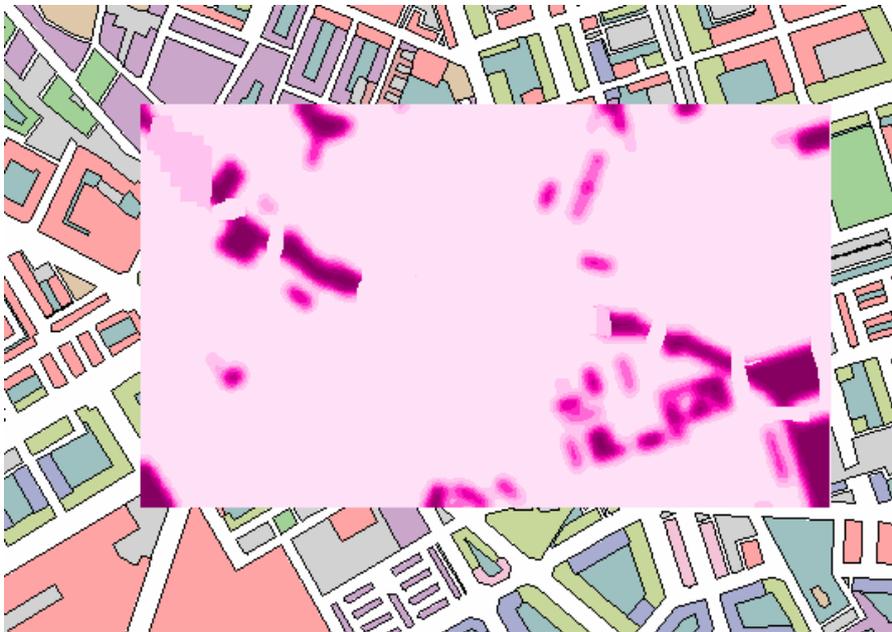


Figura 4.4: Mapa de tráfico para el servicio de Voz en UL

Para poder aplicar los valores anteriores necesitamos hacer una distribución zonal. Se puede realizar de muy diversas formas utilizando una selección manual de zonas, utilizando la información de las alturas o utilizando información de ubicación de empresas y zonas industriales. Todo ello, además, se debe especificar para cada tipo de entorno que se encuentra definido en función de aspectos de propagación y volumen y tipo de tráfico y que se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 4.3: Definición de los entornos de planificación

Entorno	Definido en función de:	
	Aspectos de propagación	Volumen y tipo de tráfico
Urbano Denso	Áreas dentro del perímetro urbano densamente pobladas y con edificios homogéneos con una altura superior a 7 plantas (21 m).	Se produce la demanda más alta tanto de tráfico convencional como de negocios.
Urbano	Áreas con edificios de altura igual o superior a 3 plantas (9 m.) de entre los que puede que destaque alguno que otro. El patrón de las calles es regular y éstas no son muy anchas.	Volumen alto de tráfico, pero no está uniformemente distribuido debido a la existencia de zonas puntuales de negocios o comerciales con una alta densidad de tráfico.
Suburbano	Los edificios no sobrepasan las 2 ó 3 plantas (6 ó 9 m.) y las calles son anchas, forman un patrón regular y son perfectamente visibles. Se encuentran espacios abiertos con vegetación y casas aisladas.	Se espera una densidad media de tráfico uniforme, pero también pueden existir zonas con alta demanda (por ejemplo, polígonos industriales con un tipo de tráfico de negocios variable a lo largo del día).
Rural	Pequeños núcleos poblados dispersos a las afueras de las ciudades con edificios inferiores a 3 plantas (9 m.).	Baja densidad de tráfico y distribución no uniforme debido a la presencia de núcleos urbanos dispersos
Carretera	Carreteras de interés que pueden, además, atravesar núcleos de población. En muchos casos el terreno presenta irregularidades.	La densidad de tráfico puede variar considerablemente a lo largo del día y en días diferentes de la semana.

Cuando no se dispone de información sobre el tipo de entorno, una manera simple de obtener la división zonal de nuestro entorno de trabajo, es dividir la altura de los edificios utilizando unos límites, que llamaremos L_1, L_2, L_3, L_4 y L_5 . Estos límites cumplen que: $L_1 < L_2 < L_3 < L_4 < L_5$

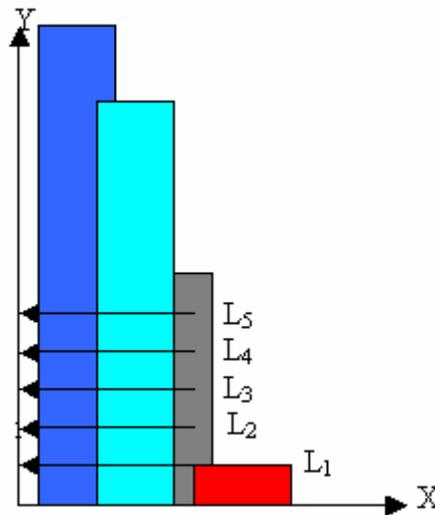


Figura 4.5: la altura de los edificios se dividen en 5 límites para clasificarlos aproximada en zonas de la densidad demográfica para el tráfico estimado

Podemos asumir que cada intervalo (de x_1 a x_5) se corresponde con un tipo de entorno que generará un determinado tráfico. La clasificación queda de la siguiente manera: Zona rural (*out-door*): Intervalo $x_1 < L_1$, Zona urbana (vehicular): Intervalo $L_1 < x_2 < L_2$, Zona urbana (*pedestrian*): Intervalo $L_2 < x_3 < L_3$, Zona *Home* (en edificios): Intervalo $L_3 < x_4 < L_4$, Zona suburbana (en edificios o en calle): Intervalo $L_4 < x_5 < L_5$, y Zona CBD/Urbana (en edificios): Intervalo $x_5 > L_5$.

Estos límites se aplican tanto para el UL como para el DL. La combinación de las tablas 4.1 y 4.2 junto con la información geográfica de la que disponemos nos permite obtener 6 *grids* por enlace, uno por cada uno de los servicios disponibles (HIMM, HMM, MMM, Datos conmutados, Mensajes y Voz). Cada uno de estos *grids* contiene la información completa de todas las zonas de tráfico que hemos diferenciado.

4.3 Clasificación de zonas macro y micro o pico en función del tráfico

Como en apartados anteriores, el uso del GIS facilitará los cálculos necesarios, puesto que dispone de funciones de análisis y cálculo con datos en formato matricial (*grids*). Para diferenciar entre zonas macro y zonas micro o pico se hace uso de la tabla 4.4, también proporcionada por el UMTS Forum [55]. En esta tabla se muestran los porcentajes del tráfico total en función de cada tipo de servicio que deben ser cubiertos por cada una de las jerarquías de la estructura celular del sistema.

Haciendo uso de estos valores y de los mapas de tráfico que obtuvimos anteriormente podemos diferenciar entre aquellas zonas donde el tráfico pueda ser cubierto por la jerarquía macro y donde no, obteniendo el resultado que buscamos.

Tabla 4.4: La jerarquía del tráfico

Service class	Macro cell layer	Micro cell layer	Pico cell layer
	share	share	share
HIMM	5%	70%	25%
HMM	0%	0%	100%
MMM	5%	70%	25%
Switched data	10%	65%	25%
Simple messaging	10%	65%	25%
Speech	10%	65%	25%
	1FDD carrier	2FDD carrier	1TDD carrier
Loading of DL	48%	42%	25%
Loading of UL	32%	25%	11%

4.4 Estimación del radio de la celda

Hasta ahora y a partir de estos datos podemos considerar la cantidad de tráfico que cada una debe cubrir con las jerarquías y realizar una distribución de celdas. La distribución de celdas debe considerar tanto las restricciones de compatibilidad

electromagnética (que marcará un radio mínimo para la celda), como las restricciones de cobertura y capacidad.

De aquí en adelante, se suponen estaciones base trisectoriales y estructuras celulares hexagonales para dimensionar capacidad y cobertura, aunque la mayoría de los conceptos teóricos son aplicables a cualquier tipo de estructura celular. El Nodo B presta servicio a un área que recibe el nombre de célula y cada una de ellas está formada por tres sectores. Cada sector está servido por una antena del Nodo B y tiene su propio código de aleatorización para separarlo del resto. La figura siguiente muestra la estructura celular con la que se trabaja:

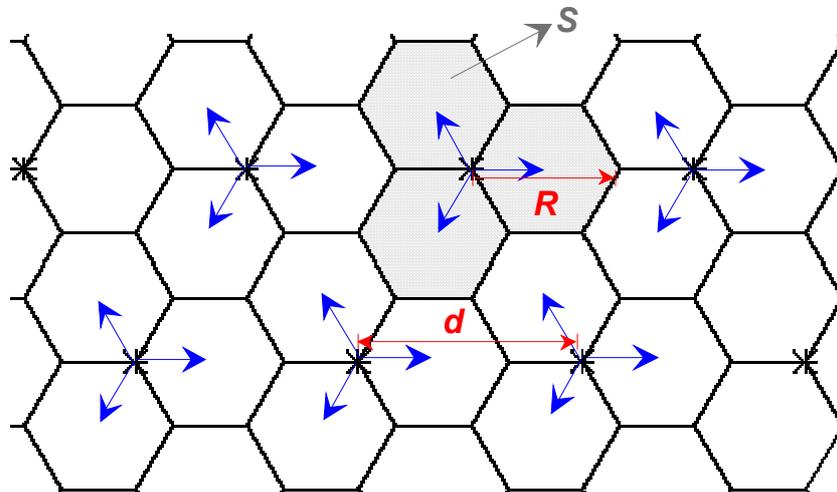


Figura 4.6: Estructura celular hexagonal

El radio de cobertura R de la estación base nos proporciona el área de cada célula S y la distancia entre emplazamientos según las expresiones {4. 1} y {4. 2}:

$$S = \frac{9}{8} \sqrt{3} R^2 \quad \{4. 1\}$$

$$D = \frac{3}{2} R \quad \{4. 2\}$$

Podremos observar las restricciones de cobertura calculando y simulando los sistemas celulares con nuestra herramienta. La capacidad máxima por celda viene dada por muchos factores que dependen entre otros del tipo de servicios que se ponen en marcha, de la calidad que se requiere para cada uno de esos servicios y de

la forma de implementar el procesamiento de las señales en banda base y los equipos de RF. En la bibliografía se pueden encontrar numerosas publicaciones que estiman la capacidad máxima (en MHz/portadora o MHz/celda), de entre las cuales se ha seleccionado la publicada por Holma-Toskala [1]. La tabla 4.5 muestra estas estimaciones.

Tabla 4.5: Simulaciones de capacidad para Macro y Micro celdas.

Capacidad en Kpbs/Mhz/Celda		
	UL	DL
Macro 12 Kpbs	192	108
Macro 144 Kpbs	388	108
Micro 2 Mbps (5 Mcps)	1040	80
Macro 2 Mbps (5 Mcps)	360	40

4.5 Patrones regulares e irregulares

La planificación clásica ha hecho uso de patrones regulares para simplificar los cálculos y porque no se disponía de GIS y datos 3D sin embargo, a partir de la capacidad máxima, el porcentaje de carga con el que se planifique, y el tráfico estimado en la zona, podremos obtener un radio para la distribución de las celdas. Esta distribución de las celdas puede ser de dos maneras:

- **Regular:** se utilizan patrones celulares regulares, de manera que todas las celdas tendrán el mismo radio pero distinta densidad de tráfico.
- **Irregular:** las celdas tendrán un tamaño que (pudiendo variar entre los límites marcados por las restricciones antes indicadas) dependerá del tráfico. Lo que intentamos conseguir es que todas las celdas cursen el mismo tráfico.

Una vez obtenidos estos patrones, se deben calcular las coberturas de aquellos *sites* que han sido marcados por el patrón celular. Con estas coberturas crearemos un sistema, en el cual observaremos las restricciones radioeléctricas.

Estas restricciones serán las causantes de que alguna de las celdas no sea significativa en el sistema o que sea demasiado significativa.

Haciendo uso de una de las funciones de nuestro modelo de planificación, podremos obtener el tráfico que va a cubrir cada una de las celdas del sistema a partir del mapa de *Best-Server* del sistema y del mapa de tráfico que nosotros deseemos. Los resultados que podemos obtener son:

- Mapas de tráfico para cada tipo de servicio en el UL.
- Mapa de separación de zonas Macro y micro para el UL.
- Mapas de tráfico para cada tipo de servicio en el DL.
- Mapa de separación de zonas Macro y micro para el DL.
- Radios de distribuciones de celdas regulares utilizando 1 o 2 portadoras tanto para UL como para DL.

Una vez obtenidos estos datos se nos presenta la posibilidad de encadenar la creación de un patrón celular, a partir de los radios. Nuestro modelo nos permite elegir entre el patrón regular o el irregular.

4.5.1 Patrones Regulares

En caso de elegir el patrón regular los parámetros de entrada que utilizamos en esta herramienta serán:

- Zona de análisis: es aquella zona en la que se realizarán las estimaciones de tráfico y de separación de zonas macro celulares y micro celulares.
- Penetración en el mercado: es el porcentaje del mercado que se desee cubrir con esta planificación.
- Estación Base de Referencia: marca el punto de las coordenadas a partir del cual se empezará a desarrollar el patrón.
- Inclinación: permite indicar la desviación en planta del patrón respecto a cero grados.

- Número de portadoras utilizadas: en este caso pueden ser una o dos. Dependiendo de la opción escogida, el radio de las celdas de la distribución será diferente.

En la figura 4.7 se muestra un patrón regular obtenido a partir de los resultados de este proceso



Figura 4.7: Ejemplo de un patrón regular dibujado sobre una parte del mapa de Valencia

4.5.2 Patrones Irregulares

Antes que nada cabe señalar que en un sistema UMTS real todas las celdas no van a soportar el mismo factor de carga, esto se debe a que el tráfico generado por los abonados a un operador no es homogéneo, ni por superficie ni por servicios. Pero el diseño óptimo de una estructura celular UMTS debe perseguir este objetivo, es decir, que la carga de tráfico se distribuya por igual en las celdas que componen el sistema.

Para ello se utilizarán patrones celulares irregulares, en los que el tamaño de celda viene fijado por la zona que se desea cubrir, es decir, si es una zona con alta demanda de tráfico, el radio de la celda será menor que en zonas en la que no exista

tal demanda, también micro celdas para absorber *hot-spots* de tráfico y algoritmos de control de acceso a la red.

Los parámetros a introducir son los mismos que para el patrón regular, pero con esta opción el radio del patrón varía dependiendo del tráfico calculado previamente sobre el mapa, conservando al mismo tiempo que el tráfico en todas las celdas será igual. El resultado que se obtiene se muestra en la siguiente figura:

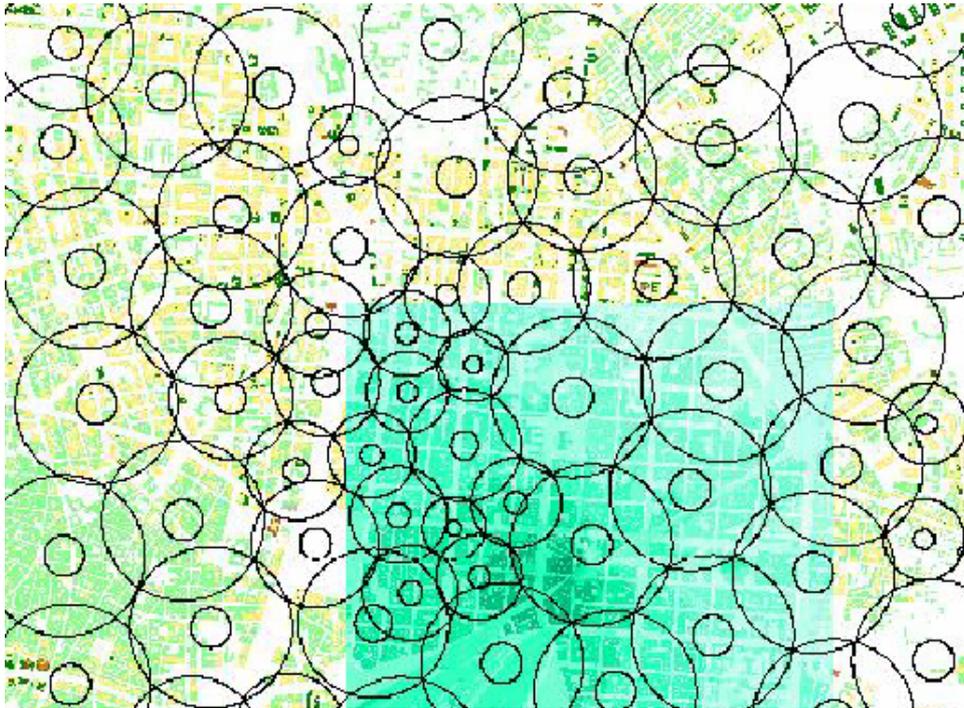


Figura 4.8: Ejemplo de un patrón irregular dibujado sobre una parte del mapa de Madrid

4.6 Cálculo de cobertura de las células

Uno de los parámetros a considerar en los sistemas de telefonía móvil celular es el de la cobertura que cada estación base proporciona a su entorno, esto es, el área o zona de influencia de cada emplazamiento en la cual las estaciones móviles pueden contactar vía la interfaz radio con él.

En los estudios teóricos, las coberturas de las células se esquematizan con hexágonos cuyo centro es la estación transmisora de la célula y dispuestos de tal forma que no existe solape entre ellos ni tampoco zonas sin cubrir. En realidad, las zonas donde una estación base proporciona cobertura tienen una forma irregular dada

por las características del entorno (obstáculos, terreno, etc) además de por las características de la estación transmisora y las receptoras. Debido a esta influencia del entorno, el área de cobertura que finalmente tenemos se perfila de manera muy irregular.

En una primera etapa de la planificación de una estructura celular, interesará modelar de forma teórica y lo más homogénea posible la cobertura que cada célula tendrá sobre el área total en la que se asienta el sistema. Con ello, se pretende realizar un primer acercamiento a la disposición de células para el sistema, y partir de este patrón homogéneo para afinar e ir modelando las características de la estructura en sucesivas etapas.

El modelado teórico que se aplica a la cobertura de las células parte de la suposición de una transmisión omnidireccional, esto es, de igual intensidad en todas las direcciones, y con la suposición de terreno homogéneo. El resultado son zonas de cobertura circulares. Para que con áreas circulares podamos cubrir toda la superficie de análisis sin dejar huecos habrá que solapar las mismas, con lo cual tendremos zonas comunes cubiertas por más de una transmisora.

Esto es en realidad deseable, pues los móviles deben conmutar de una transmisora a otra cuando cambian de área de cobertura, y para esta conmutación, llamada *handover* o *handoff*, es conveniente que los dos transmisores implicadas tengan cobertura en la zona de cambio de una a la otra.

Dado que este modelo ideal presenta solapes, en la planificación teórica de la ubicación de estaciones transmisoras se utilizan otras aproximaciones a la cobertura de las células cuya repetición sí cubra todo el plano sin huecos ni solapes. Por ello se utilizan estructuras poligonales de triángulos, cuadrados o hexágonos, que son los únicos polígonos que cumplen estos requisitos. De entre ellas se elige la estructura hexagonal por ser la que para un mismo radio R ocupa la mayor superficie, con lo cual el número de repeticiones para cubrir un área determinada será menor.

Así pues, utilizaremos áreas de cobertura hexagonales para planificar los diferentes patrones posibles en los sistemas celulares y analizar las características que presenta cada uno, entendiendo que éste será un modelo orientativo y sólo

aproximado a la realidad, el cual nos permitirá extraer conclusiones acerca de la conveniencia y cualidades de unos patrones y de otros.

4.6.1 Composición de una celda

Las celdas son las estructuras de datos que utilizamos en nuestra herramienta para simular la presencia de estaciones base de un sistema celular y la cobertura que éstas proporcionan en el entorno geográfico sobre el que se asientan.

Son los elementos que almacenarán la información relativa a las coberturas radioeléctricas individuales, y las piezas elementales de partida a partir de las cuales se construirán los sistemas celulares, los cuales son el objeto final de la planificación. De hecho, un sistema celular surge de la unión organizada de celdas individuales. Éstas se constituyen así como las unidades básicas de información radioeléctrica que maneja nuestra herramienta.

Una celda es básicamente una estructura *grid* de Arc/Info que lleva asociada una serie de atributos almacenados en estructuras *info* (tablas). El *grid* representa una estimación de la potencia recibida en una zona geográfica determinada desde la estación base de la celda. Por su parte, los atributos describen todas las características de la celda y se encuentran físicamente inmersos en la tabla de atributos de la base de datos de celdas.

Cada celda tendrá reservado un registro de esta tabla, en el que se encontrará la información relativa a la misma ordenada en campos o *items*. A su vez, algunos de estos campos serán enlaces a otras tablas, las cuales ampliarán información relativa a algún aspecto particular de la celda, como puede ser el emplazamiento en el que se ubica la estación base, el equipo transmisor utilizado o la antena. El esquema de la figura siguiente muestra los elementos de una celda.

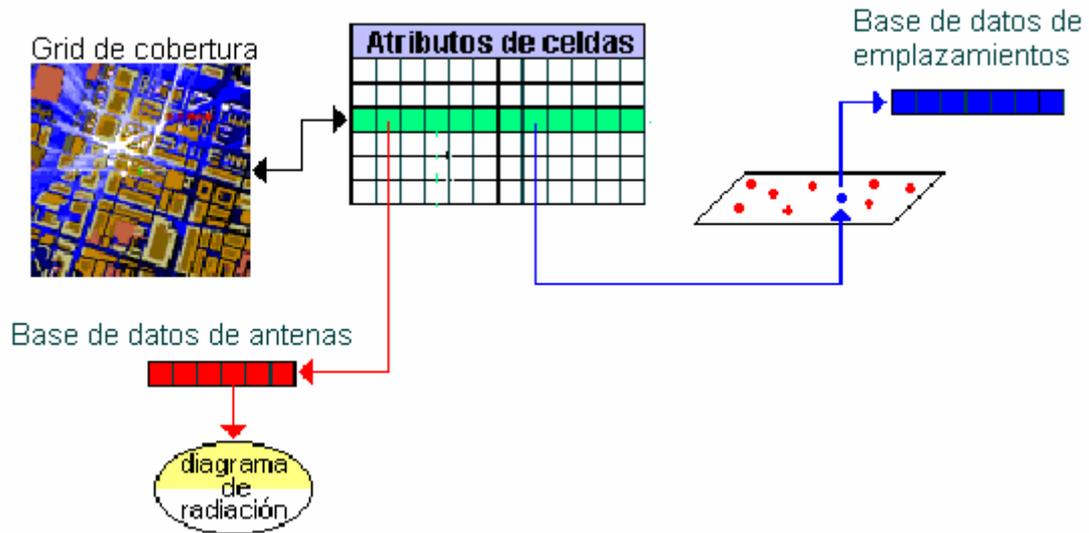


Figura 4.9: Esquema de la composición de una celda

Para tener completamente definida una celda, habrá que precisar toda una serie de datos tanto geográficos como radioeléctricos que consigan que las características de la misma queden lo suficientemente indicadas y que sea posible así crear un *grid* de potencia para la celda.

La información descriptiva de una celda se guarda en un registro de la base de datos de celdas. Este registro está dividido en una serie de campos, cada uno de los cuales será un atributo o parámetro de la celda. Algunos de estos campos servirán para relacionar a este registro con otros registros pertenecientes a tablas de otras bases de datos. Es decir, que la base de datos de celdas estará relacionada con otras a través de determinados campos.

Los campos de información descriptiva de una celda son los siguientes:

- Parámetros geográficos
- Parámetros para los cálculos radioeléctricos
- Parámetros de antena

4.6.1.1 Parámetros geográficos

Los parámetros geográficos son aquellos relativos a la zona en la que se asienta la celda. Se distinguen:

- **Emplazamiento:** Este campo contiene el identificativo del emplazamiento de la estación base de la celda. En aquél se encontrarán las coordenadas x e y UTM del emplazamiento, la altura de la ubicación y otros parámetros de interés sobre el mismo.
- **Límites geográficos:** Se delimita sobre el mapa el marco geográfico de actuación de la celda sobre el cual se realizarán los cálculos de cobertura.
- **Resolución:** Indica la resolución a emplear en el *grid* de cobertura. Será el tamaño del lado de cada celdilla del *grid*. En entorno urbano suele elegirse un valor entre 1 y 10 metros, mientras que para entorno abierto no suele cogerse un valor menor a 100 metros. Este factor refleja el grado de exactitud, cuando esta sea menor, el grado de exactitud será mayor.
- **K de la Tierra:** Cuando la zona de análisis empieza a ser considerablemente extensa (de varios kilómetros), el radio de curvatura de la Tierra comienza a influir en los cálculos de propagación. Esto sucederá para los cálculos de entorno abierto, en los que las celdas son de varios kilómetros de radio. En este campo el usuario indicará el valor de k a utilizar para tener en cuenta el efecto de curvatura de la Tierra.

4.6.1.2 Parámetros para los cálculos radioeléctricos

Se definen aquí los parámetros necesarios para realizar los cálculos de pérdidas de propagación para los mapas de cobertura:

- **Radio:** Indica el radio desde el emplazamiento que tiene la zona de análisis de la celda.
- **Frecuencia:** Indica la frecuencia de portadora en MHz a la que trabajará la celda.
- **EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power*):** Indica el nivel de potencia de transmisión de la estación base. Se da en dBm, y es la suma de la potencia transmitida y la ganancia de la antena,.
- **Altura de la estación base:** Es la altura total a la que se encuentra la estación base. El emplazamiento indica la altura del terreno y del edificio, si lo hay, sobre el que se ubica la estación base, pero no la altura del mástil sobre la cota del

terreno o el edificio. Esta altura total, incluyendo al mástil, la indica el usuario en este parámetro.

- **Altura del móvil:** Indica la altura del receptor sobre el suelo. Se suele escoger la altura de un coche o de una persona (entre 1 y 2 metros).
- **Modelo de propagación:** Se indica en este campo el modelo de propagación con el que se ha realizado el *grid* de potencia recibida. Estos modelos de propagación se han visto en detalles en el capítulo 2.

4.6.1.3 Parámetros de antena

Se recogen los parámetros necesarios para incluir el efecto de la antena utilizada en el mapa de cobertura.

- **Diagrama de radiación:** Se recoge el nombre de la antena utilizada. Este nombre relacionará a este campo con un registro de la base de datos de antenas. De esta base de datos interesará sobre todo el fichero ASCII que contiene el diagrama de radiación de la antena que se utiliza en los cálculos de propagación.
- **Inclinación en la vertical:** Indica en grados la inclinación de la antena en la vertical. Normalmente las antenas se inclinarán un tanto hacia abajo para paliar el efecto de las interferencias a otras celdas. El rango de este parámetro va desde 0° (posición horizontal) hasta 90° (posición vertical mirando hacia abajo).
- **Inclinación en acimut:** Indica el giro en acimut con respecto al norte. Se da en grados, y el rango va desde 0° hasta 360°.

4.6.2 Cálculo del *grid* de cobertura de potencia

El *grid* de cobertura de potencia recibida constituye el cálculo básico y el origen del resto de la información radioeléctrica generada en la aplicación. Es la pieza más importante del programa, puesto que representa la fuente de la mayoría de cálculos y estructuras de tipo radioeléctrico que se realizan en el mismo.

De la buena estimación de la cobertura de potencia de estos *grids* dependen buena parte de los resultados y parámetros radioeléctricos manejados por el programa. Unos *grids* de potencia poco fiables derivarán en la creación de sistemas celulares a

partir de ellos defectuosos y alejados de una situación real, y la planificación se encontrará en muy malas condiciones. Por ello, es muy importante que estos *grids* se calculen de forma rigurosa y lo más precisa posible, y que se tenga siempre noción del grado de exactitud que se puede esperar en cada momento.

Para realizar el cálculo del *grid* de potencia recibida en una zona geográfica, se llevan a cabo los siguientes pasos:

- Los parámetros de entrada indicados por el usuario se incluyen en un fichero de texto que servirá de entrada al modelo de propagación.
- La información geográfica almacenada en la zona de análisis marcada se pasa a un fichero ASCII mediante el comando *gridascii* del módulo Arc de Arc/Info [40]. Esta información será enviada al modelo de propagación, que la empleará como origen de los datos del entorno, necesarios para realizar los cálculos.
- Se hace uso de un algoritmo que realiza las estimaciones de pérdidas de propagación. Este algoritmo tomará el fichero del entorno de propagación y el fichero de los parámetros radioeléctricos y realizará una estimación punto a punto sobre toda la zona de análisis de las pérdidas de propagación. Se generará así un fichero ASCII de salida que contendrá la información matricial de las pérdidas de propagación. Esta información se transformará a la estructura *grid* (*grid* de pérdidas de propagación) con el comando *asciigrid* del módulo Arc.
- Se evalúa el efecto del diagrama de radiación de la antena sobre la zona de análisis. Para ello se prepara un fichero ASCII de entrada con los parámetros necesarios para el cálculo, y se usa el fichero ASCII de la información geográfica utilizado por el algoritmo de cálculo de las pérdidas de propagación. Se genera un fichero ASCII con esta información matricial, que se convierte a *grid* (*grid* del diagrama de radiación) de la misma forma que se hizo con el fichero de pérdidas de propagación.
- Se suma al *grid* del diagrama de radiación el valor del EIRP, y al *grid* resultado se le resta el *grid* de pérdidas de propagación. Así obtenemos el *grid* con la potencia recibida en cada punto de la zona de análisis. La resolución de este *grid* será la indicada por el usuario.

A continuación se muestra un *grid* de cobertura de potencia representado en rampa y en intervalos de colores. En la figura 4.10 se representa un *grid* de cobertura de potencia con leyenda en rampa, mientras que en la figura 4.11 se hace lo propio pero con una leyenda en intervalos.

Este *grid* representa la cobertura de potencia dada por una macrocelda de entorno urbano, y ha sido calculado con el modelo teórico de propagación de Walfisch-Bertoni.

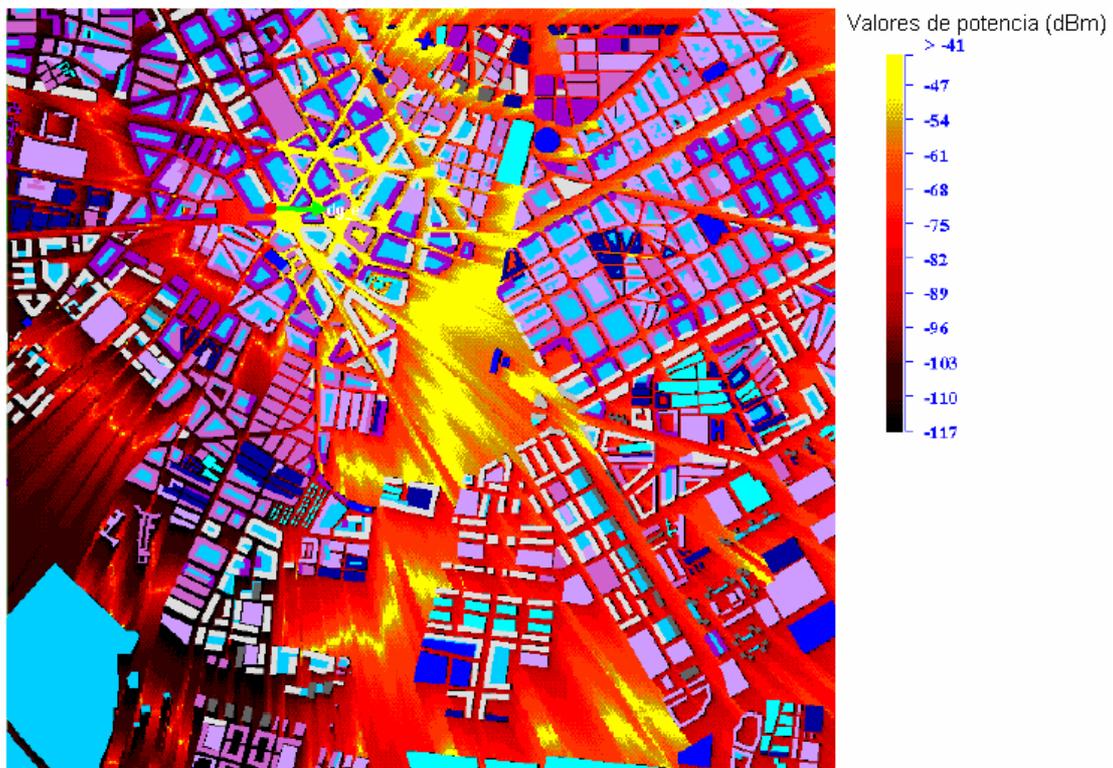


Figura 4.10: Grid de cobertura de potencia representado en rampa de colores

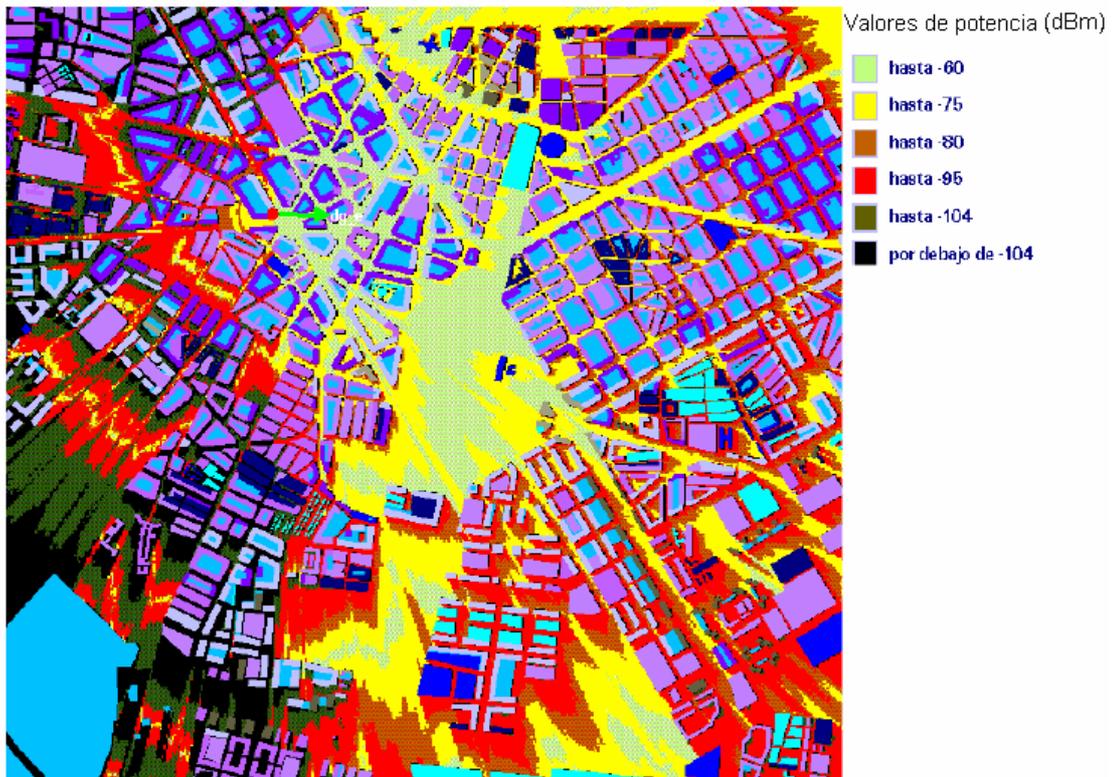


Figura 4.11: Grid de cobertura de potencia representado en intervalos de colores

En el capítulo de resultados se muestran más ejemplos de *grids* de cobertura de potencia calculados con cada uno de los modelos de propagación empleados en esta tesis.

4.7 Cálculo de la Capacidad de los sistemas UMTS

El proceso de dimensionamiento de una red celular se encarga, básicamente, de ofrecer una estimación inicial del número de estaciones bases necesarias. En todas las redes se necesitan dos tipos de dimensionamiento: de capacidad y de cobertura. El primero calcula los recursos necesarios para satisfacer los requisitos de tráfico; el segundo se encarga de asegurar la cobertura radioeléctrica en toda la zona a cubrir. Estos dos procesos se encuentran muy ligados en el sistema UMTS y se tiene que realizar un análisis conjunto de ambos.

Como se verá posteriormente, el sistema se encuentra limitado por sus propias interferencias, que son generadas por las conexiones en ambos enlaces, y el objetivo

del dimensionamiento será mantenerlas en niveles relativamente bajos para asegurar el correcto funcionamiento del mismo.

4.7.1 Conceptos generales

La capacidad en un sistema WCDMA está muy relacionada con la cobertura y debe analizarse por separado en los enlaces ascendente y descendente. Para todos los enlaces ha de verificarse que [56]:

$$\left(\frac{E_b}{N_0} \right)_k \leq \frac{(P_{ik} G_i / A_{ij}) / R_k}{(I_{\text{int}} + I_{\text{ext}} + N) / W} = \frac{(P_{ik} G_i / A_{ij})}{(I_{\text{int}} + I_{\text{ext}} + N)} G_{pk} \quad \{4. 3\}$$

donde:

$(E_b/N_0)_k$ es el umbral absoluto de relación energía por bit-densidad de perturbación para el servicio k-ésimo,

P_{ik} es la potencia del transmisor i-ésimo (sea móvil o estación base) para el servicio k-ésimo,

G_i es la ganancia absoluta de la antena del transmisor i-ésimo,

A_{ij} es la atenuación de propagación entre el transmisor i-ésimo y el receptor j-ésimo,

R_k es la velocidad de bits (bits/s) para el servicio k-ésimo,

I_{int} es la potencia de la interferencia intracelular,

I_{ext} es la potencia de la interferencia intercelular o potencia externa,

N es la potencia de ruido térmico,

W es la velocidad de chips (chips/s),

G_{pk} es la ganancia de procesamiento en el servicio k-ésimo.

Existe una inecuación para cada tipo de servicio, cada enlace (ascendente o descendente) y para cada terminal. Para que se pueda cumplir la ecuación anterior, es decir, para que el enlace sea viable, la potencia transmitida por el terminal deberá ser menor que la máxima disponible.

En caso contrario, se considerará que el enlace se encuentra fuera de servicio y no se tendrá en cuenta a la hora de resolver el sistema. El objetivo de la planificación es asegurar que exista sólo un cierto porcentaje relativamente bajo de terminales móviles fuera de servicio (por ejemplo, un dos o tres por ciento). La tarea de plantear el sistema de ecuaciones {4. 3} es algo complejo y no puede utilizarse para calcular los lugares óptimos donde ubicar las estaciones base. Cuando la red ofrece un mismo tipo de servicio, se puede recurrir a simplificaciones con las que se obtienen expresiones analíticas fáciles de manejar. Para varios servicios en la red, las simulaciones son la única solución a mano.

En el caso del enlace ascendente, se tiene un gran número de terminales distribuidos que aportan interferencias dentro y fuera de la célula bajo estudio; en el enlace descendente, el terminal recibe interferencias de un número limitado de Nodos B en posiciones concretas. Para el enlace ascendente, la capacidad puede crecer ilimitadamente a costa de una degradación progresiva de la calidad; en el descendente, la capacidad ofrecida deja de aumentar cuando el Nodo B no dispone de más potencia para asignar a los canales de tráfico de los terminales.

Debido a lo anterior, el cálculo de la capacidad en el enlace descendente es más complejo que en el ascendente y, para no complicarlo, supone que el Nodo B tiene una potencia ilimitada. De esta forma, el análisis para ambos enlaces es prácticamente el mismo y se hace éste para el enlace ascendente para después aplicarlo al descendente.

Para un determinado objetivo de calidad, la capacidad para el enlace ascendente depende del nivel de interferencia que generan los terminales que trabajan en la misma frecuencia (tanto en la propia célula como en las células vecinas). Se permitirá un nivel máximo de interferencias, lo que se traduce en un número máximo de usuarios que generan una cantidad de tráfico equivalente. La capacidad puede aumentar a costa de una degradación en la calidad de servicio. Supóngase que la red ofrece un único tipo de servicio. Si la potencia de recepción es P_r , la expresión {4. 3} queda como:

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = \frac{P_r/R}{(I_{\text{int}} + I_{\text{ext}} + N)/W} = \frac{P_r}{I_{\text{int}} + I_{\text{ext}} + N} G_p \quad \{4.4\}$$

Se debe incluir el factor de actividad α en los servicios de voz para reflejar la transmisión discontinua de la fuente. Este factor expresa el porcentaje de tiempo de transmisión en una sesión. Supóngase que en una célula existen K usuarios activos y que el mecanismo del control de potencia es ideal, de forma que la potencia recibida en la estación base es de P_r para cada uno de ellos. La potencia de la interferencia que percibe un usuario dentro de su célula es generada por los $K-1$ usuarios restantes en la forma:

$$I_{\text{int}} = P_r(K-1)\alpha \quad \{4.5\}$$

Además, si se define en UMTS factor de reutilización f como:

$$f = \frac{I_{\text{tot}}}{I_{\text{int}}} = \frac{I_{\text{int}} + I_{\text{ext}}}{I_{\text{int}}} \quad \{4.6\}$$

La potencia de interferencia intercelular se puede expresar de la forma:

$$I_{\text{ext}} = (f-1)I_{\text{int}} \quad \{4.7\}$$

El valor de f varía fuertemente con el entorno, distribución de usuarios y el tipo de células. Medidas realizadas en el sistema IS-95 proporcionan un valor de $f = 1.8$ para una estación base trisectorial [56]. Teniendo en cuenta {4.5} y {4.7}, la expresión {4.4} queda como:

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = \frac{P_r}{[P_r(K-1)\alpha f + N]} G_p \quad \{4.8\}$$

Despejando de la ecuación anterior, la potencia que el Nodo B recibe viene dada por:

$$P_r = \frac{N}{G_p / (E_b/N_0) - (K-1)\alpha f} \quad \{4.9\}$$

Se observa que a medida que aumenta el número de usuarios, la potencia recibida por el Nodo B aumenta. Para cierto valor $K_{m\acute{a}x}$, la potencia recibida tiende a infinito. Este valor se obtiene al hacer nulo el denominador de {4. 9}:

$$K_{m\acute{a}x} = 1 + \frac{G_p/(E_b/N_0)}{\alpha f} \approx \frac{G_p/(E_b/N_0)}{\alpha f} \quad \{4. 10\}$$

Cada uno de los sectores de un emplazamiento es capaz de soportar un número de usuarios $K < K_{m\acute{a}x}$ y, de forma análoga, el sistema deberá funcionar en estas condiciones para evitar que grandes interferencias lo inhabiliten. Se define el factor de carga de la red como el cociente:

$$X = \frac{K - 1}{K_{m\acute{a}x} - 1} \approx \frac{K}{K_{m\acute{a}x}} \quad \{4. 11\}$$

El factor de carga será un parámetro de entrada en el diseño de nuestra red que jugará un papel importante en los resultados finales. Como norma general, se intentará no cargar mucho al sistema para que las interferencias no sean demasiado elevadas. Un rango de valores de diseño muy común para las primeras fases de despliegue de una red está comprendido en el intervalo $0.4 \leq X \leq 0.6$.

De las expresiones {4. 9}, {4. 10} y {4. 11} se puede obtener la sensibilidad (potencia mínima necesaria recibida) que se requiere en el receptor fijado un factor de carga determinado:

$$S = N \frac{1}{G_p} \left(\frac{E_b}{N_0} \right) \frac{1}{1 - X} \quad \{4. 12\}$$

y teniendo en cuenta que $N = kT_0FW$ donde k es la constante de Boltzman, T_0 la temperatura de referencia (290 K), F el factor de ruido del receptor, W la velocidad de chip y $G_p = W/R$ la ganancia de procesado, la sensibilidad queda de la forma:

$$S = KT_0RF \left(\frac{E_b}{N_0} \right) \frac{1}{1 - X} \quad \{4. 13\}$$

A continuación se generalizan las expresiones anteriores para un sector que contiene un conjunto de usuarios K que hacen uso de los tipos de servicio sin considerar las interferencias intercelulares. Si se supone que un usuario sólo puede hacer uso de un único servicio de forma simultánea, la relación energía por bit densidad de perturbación para un usuario i -ésimo viene dada por:

$$\left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i = \frac{P_{ri} G_{pi}}{I_{\text{int}} + N} \quad \{4. 14\}$$

donde:

$(E_b/N_0)_i$ es la relación energía de bit-densidad de perturbación para el usuario i -ésimo,

P_{ri} es la potencia con que se recibe el usuario i -ésimo,

G_{pi} es la ganancia de procesamiento para el usuario i -ésimo,

I_{int} son las interferencias intracelulares,

N es la potencia de ruido térmico.

Las interferencias intracelulares están producidas por todos los usuarios menos por el i -ésimo:

$$I_{\text{int}} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^K \alpha_j P_{rj} = \sum_{j=1}^K \alpha_j P_{rj} - \alpha_i P_{ri} \quad \{4. 15\}$$

y la expresión {4. 14} queda como:

$$\left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i = \frac{P_{ri} G_{pi}}{\sum_{j=1}^K \alpha_j P_{rj} - \alpha_i P_{ri} + N} = \frac{P_{ri} G_{pi}}{I_{\text{tot}} - \alpha_i P_{ri}} \quad \{4. 16\}$$

donde se ha tomado:

$$I_{\text{tot}} = \sum_{j=1}^K \alpha_j P_{rj} + N \quad \{4. 17\}$$

que representa las interferencias producidas por todos los usuarios de la célula y por el ruido térmico. La potencia que el Nodo B recibe del usuario i -ésimo se obtiene de {4. 16}:

$$P_{ri} = \frac{I_{tot}}{\alpha_i + \frac{G_{pi}}{(E_b/N_0)_i}} \quad \{4. 18\}$$

De forma análoga al caso con un único usuario, se puede definir en esta situación el factor de carga que corresponde al usuario i -ésimo:

$$\lambda_i = \frac{\alpha_i P_{ri}}{I_{tot}} = \frac{\alpha_i}{\alpha_i + \frac{G_{pi}}{(E_b/N_0)_i}} \quad \{4. 19\}$$

que no indica otra cosa que la contribución del usuario i -ésimo a las interferencias totales del sistema. Este parámetro únicamente depende del tipo de servicio y se usará después para dimensionar la capacidad del sistema.

Se debe obtener el factor de carga total del sistema y para ello, haciendo uso de las expresiones {4. 18} y {4. 19} se extrae a partir de {4. 17} que:

$$I_{tot} \left(1 - \sum_{j=1}^K \lambda_j \right) = N \quad \{4. 20\}$$

El cociente I_{tot}/N indica el aumento de las interferencias del sistema por el hecho de que exista más de un usuario activo:

$$\frac{I_{tot}}{N} = \frac{1}{1 - \sum_{j=1}^K \lambda_j} \quad \{4. 21\}$$

A raíz de la expresión anterior, el factor de carga del sistema en el enlace ascendente viene dado por:

$$X = \sum_{j=1}^K \lambda_j \quad \{4. 22\}$$

La expresión anterior contempla únicamente el caso de una única célula. Para reflejar la situación real multicelular se debe introducir el factor de reutilización f que tiene en cuenta las interferencias extracelulares, de modo que X queda finalmente como:

$$X = f \sum_{j=1}^K \lambda_j \quad \{4. 23\}$$

Todos los usuarios de un mismo tipo de servicio tienen un factor de carga idéntico. Si existen K_j usuarios de un servicio j -ésimo con un mismo factor de carga λ_j cada uno de ellos, en una red con M servicios diferentes la expresión {4. 23} es equivalente a:

$$X = f \sum_{j=1}^M K_j \lambda_j \quad \{4. 24\}$$

Para el enlace descendente las expresiones son similares; simplemente se debe sustituir f por $f - o$, donde o es el factor de ortogonalidad medio del sector bajo estudio. Este factor se incluye porque los códigos en el enlace descendente son ortogonales y, en teoría, la interferencia intracelular debería ser nula. Sin embargo, la ortogonalidad se ve mermada en la práctica por la propagación multicamino. El factor o toma valores $0 \leq o \leq 1$ (si $o = 1$ los códigos son perfectamente ortogonales).

A partir de la expresión {4. 24} se puede obtener el número máximo de usuarios $K_{m\acute{a}x}$ de un mismo servicio que soporta un sector tanto para el enlace ascendente como para el descendente. Se obtiene cuando las interferencias totales son infinitas, lo que equivale a un factor de carga de uno:

$$X^{ea} = f K_{m\acute{a}x}^{ea} \lambda^{ea} = 1 \quad \{4. 25\}$$

que, teniendo en cuenta la ecuación {4. 19}, se tiene para el enlace ascendente:

$$K_{m\acute{a}x}^{ea} = \frac{1}{f \frac{\alpha}{G_p} + \alpha + \frac{G_p}{(E_b/N_0)^{ea}}} \quad \{4. 26\}$$

y para el descendente:

$$K_{m\acute{a}x}^{ed} = \frac{1}{(f - o) \frac{\alpha}{G_p} + \alpha + \frac{G_p}{(E_b/N_0)^{ed}}} \quad \{4. 27\}$$

4.7.2 Parámetros que afectan a la capacidad

En el presente estudio se han considerado los parámetros que tienen cierta influencia sobre la capacidad de un sistema de Tercera Generación. A continuación se analiza cada uno y la influencia que tienen sobre el sistema bajo estudio.

4.7.2.1 Ortogonalidad de los códigos

Los sistemas CDMA se caracterizan por la transmisión de la señal de información ensanchada en espectro. Este ensanchamiento se logra multiplicando la señal digital en banda base por una secuencia conocida en emisión y en recepción. El producto obtenido modula una portadora y esto es lo que se trasmite. En recepción la señal ensanchada (modulada), se multiplica por la misma secuencia para obtener de nuevo la señal en banda base.

Estas secuencias empleadas en CDMA tienen propiedades excepcionalmente buenas en cuanto a la correlación de las mismas, es decir, el producto de una secuencia consigo misma produce un valor mucho mayor que esa misma secuencia desplazada o con otra secuencia distinta. Esta diferencia de valores es lo que permite en recepción discernir entre las transmisiones de los distintos usuarios.

Las secuencias utilizadas son básicamente de dos tipos: pseudoaleatorias y ortogonales. Las primeras son secuencias que tratan de imitar a las secuencias aleatorias pero tienen un periodo finito de repetición, suelen tener buenas propiedades de correlación pero el producto entre dos secuencias distintas no es exactamente cero.

Las secuencias ortogonales sí cumplen esto último, es decir, el producto entre dos de ellas que sean distintas es nulo. Sin embargo esta propiedad sólo se conserva mientras las secuencias mantengan una sincronización mutua y se deteriora considerablemente e incluso se pierde cuando se producen desplazamientos temporales entre ellas. Este efecto se ha de tener en cuenta en transmisiones radio por multicamino, donde la señal puede recibirse junto con versiones de ella misma afectadas por distintos retardos y atenuaciones.

Por tanto, en sistemas que emplean técnicas de acceso CDMA, el desacoplo entre comunicaciones no es perfectamente ortogonal, siempre existe un residuo de interferencia procedente de comunicaciones ajenas que coexisten en el espacio radioeléctrico. La relación entre potencias de señal útil e interferente desciende a medida que aumenta el número de transmisiones simultáneas. Esto tiene dos consecuencias, la primera consiste en el aumento/reducción de la cobertura de una celda a medida que disminuye/aumenta su carga de tráfico y la segunda es, la gran importancia que cobra el control de potencia cuyos errores repercuten directamente en la capacidad del sistema.

En el enlace descendente, la multiplicación por la secuencia correspondiente se realiza en dos pasos. La señal en banda base se multiplica primero por un código de canalización, mediante el cual se ensancha la señal y que se suele emplear para separar las comunicaciones de los distintos usuarios de la misma celda. La señal obtenida se multiplica por una secuencia de aleatorización (*scrambling*) que separa las transmisiones de las distintas celdas.

Los códigos de canalización empleados en el enlace descendente son los denominados OVSF (*Orthogonal Variable Spreading Factor*). Estos códigos tienen la particularidad de mantener sus propiedades de ortogonalidad incluso para distintos valores *Spreading Factor* (factor de ensanchado). Sin embargo, el efecto multicamino hace que esta ortogonalidad se pierda, lo que se traduce en la aparición de interferencias entre usuarios de una misma celda, también llamadas interferencias intracelulares.

Los códigos de scrambling utilizados en el *downlink* son habitualmente secuencias periódicas (pueden ser cortas o largas), con ciertas propiedades de ortogonalidad entre ellas. En definitiva, la pérdida de las propiedades de ortogonalidad

entre códigos provoca un aumento de las interferencias entre las comunicaciones de usuarios de la misma celda o celdas distintas, lo cual supone una reducción en la capacidad del sistema.

El factor de ortogonalidad toma valores en el intervalo $\{0, 1\}$ y los códigos son perfectamente ortogonales cuando $\rho = 1$. (ver expresión 4.27)

4.7.2.2 Margen de *soft handover* (M_{SH})

En modo *soft handover* el receptor considera las señales más de una estación base, obteniendo una ganancia que depende de la correlación entre dichas señales. En sistemas de Tercera Generación se emplean técnicas de traspaso con continuidad, este tipo de traspaso supone la inclusión de varias estaciones base en una lista denominada *Active Set*, en la que se recogen las estaciones base que se encuentran activas en ese instante a efectos de traspasos.

La entrada y salida de estaciones base en el *Active Set* se controla mediante un parámetro llamado Margen de *Soft Handover*, que consiste en un valor expresado en dB, que representa la máxima diferencia entre los niveles de potencia que recibe el terminal móvil desde las distintas estaciones base del *Active Set*. Por tanto cuando la diferencia entre la potencia que recibe un terminal móvil desde una estación base candidata a entrar en el *Active Set* y la potencia recibida desde la *Best Server* es menor que el M_{SH} la estación base se incluye en el *Active Set* y cuando se da la situación contraria se saca a la estación base del *Active Set*.

En realidad, además del Margen de *Soft Handover* se considera un margen de histeresis, que proporciona la seguridad de que al decidir incluir una nueva estación en el *Active Set* o eliminarla, debido al desvanecimiento rápido y lento, dicha operación no sea errónea.

El Margen de *Soft Handover* tiene una influencia muy directa sobre la capacidad de un sistema 3G. Esto se debe a que el M_{SH} gobierna la pertenencia de un usuario al grupo de usuarios servidos por una estación base, así a medida que crece M_{SH} , la estación base da servicio a usuarios que pueden situarse a una mayor distancia de la misma, es decir, puede servir a un mayor número de usuarios

potenciales (ya que aumenta el radio de cobertura efectivo de la estación base), con lo cual en principio la capacidad del sistema aumenta al crecer el M_{SH} .

Esto es así hasta un determinado punto en que el aumento de potencia necesario para servir a usuarios que están muy alejados, provoca un aumento de las interferencias que hace que la capacidad disminuya de nuevo.

4.7.2.3 Velocidad del terminal Móvil

Las fluctuaciones del canal radio se modelan suponiendo un desvanecimiento lento espacio-temporal según una variación lognormal. Se toma al terminal móvil como punto de referencia, es decir, si suponemos que el terminal móvil está quieto, sólo habrá componente temporal. Esto es así porque aunque el móvil no se desplace, a lo largo del tiempo se producen variaciones en la señal que recibe.

La componente espacial del desvanecimiento aparece cuando la velocidad del terminal móvil es no nula y refleja el hecho de que en distintas posiciones el terminal móvil recibe distinto nivel de señal debido a variaciones del entorno, reflexiones, etc. En general, el desvanecimiento temporal es mucho menor que el espacial y suele despreciarse.

De esta forma, cuando aumenta la velocidad a la que el terminal móvil se desplaza, se produce una variación más rápida en la componente espacial del desvanecimiento. Este efecto se traduce en un aumento de la varianza del *shadowing*, aunque puede modelarse como un aumento de la calidad requerida por el terminal móvil en términos de (E_b/N_0) .

Por otra parte cuando aumenta la velocidad del terminal móvil, éste cambiará con mayor frecuencia de estación base, generando de esta forma un mayor número de situaciones de *Soft Handover* con una gran variación en las estaciones pertenecientes al *Active Set*. Por lo tanto, estos traspasos podrán ser atendidos en la medida en que los equipos que constituyen los Nodos B sean capaces de soportar un rápido flujo de información de señalización dedicada a ellos y de reservar y liberar los canales necesarios con la celeridad necesaria.

4.7.2.4 (E_b/N_0) requerida

Este parámetro está muy relacionado con la calidad de los canales de tráfico y determina la capacidad y cobertura de las células UMTS, ya que la planificación de los sistemas de UMTS se realiza para cumplir los requerimientos de (E_b/N_0) . (Ver expresión 4.3)

Los valores objetivo que se utilizan en el diseño de redes son los que garantizan el cumplimiento de los requisitos de calidad: $BER < 10^{-3}$ para voz y $BER < 10^{-6}$ para datos. Estos valores de (E_b/N_0) dependen principalmente del tipo de servicio, del entorno y de la velocidad del móvil, siendo mayores cuanto peores son las condiciones de propagación y desvanecimientos.

Asimismo, a pesar de requerir una BER más estricta, los valores objetivo de (E_b/N_0) para datos serán menores que los requeridos para voz. Además, estos valores para servicios de datos aumentan según la tasa binaria de los mismos, de forma que a mayor tasa de datos, mayor es el valor de (E_b/N_0) objetivo, debido a que el factor de ensanchado (o ganancia de proceso) disminuye, por lo que, habiendo fijado la potencia a transmitir, se reduce la energía por *bit* (E_b).

4.7.2.5 Ganancia de proceso

En los sistemas CDMA, se define ganancia de proceso como la relación entre el ancho de banda ocupado por la señal ensanchada y la tasa binaria neta de dicha señal sin ensanchar.

La tasa binaria neta dependerá del servicio ofrecido (12.2Kbps para voz y 144Kbps, 384Kbps o 2Mbps para datos). De esta forma, partiendo de la expresión (4.3), la ganancia de proceso influirá directamente en la relación (E_b/N_0) , y por tanto en la capacidad del sistema, ya que será necesaria más o menos potencia para satisfacer este requisito de calidad.

4.7.2.6 Factor de actividad

Es un dato estadístico, ya que depende del comportamiento humano, y representa el porcentaje de tiempo que un servicio utiliza el canal radio para transmitir. Por ejemplo, en una conversación normal se considera que la señal está activa durante el 35-50% del tiempo. El factor de actividad vocal suele estar comprendido entre 0.4 y 0.7 [56].

En los sistemas UMTS, el factor de actividad será menor que 1 debido a la utilización de la conmutación de paquetes frente a la conmutación de circuitos, y tan solo variará dependiendo de si el canal se utiliza para voz o para datos.

El factor de actividad proporciona una mejora en la capacidad y cobertura en el caso del servicio de voz. Esta mejora es debida a la reducción del nivel de interferencia que supone el utilizar codificadores de voz de tasa variable, los cuales reducen la velocidad de los bits de información en momentos de baja actividad o en periodos de silencio. De esta forma, la relación señal a ruido necesaria para demodular correctamente la señal es menor, y por tanto, la potencia de transmisión de la estación base se reduce.

4.7.2.7 Ruido térmico

El ruido térmico se encuentra presente en las comunicaciones radio en general. La consideración del efecto del ruido térmico hace que la potencia transmitida tenga que aumentar para cumplir los requerimientos de calidad.

De la misma forma que intervienen las interferencias en la relación (E_b/N_0) , lo hace la potencia de ruido. La expresión de potencia de ruido térmico en unidades lineales es la siguiente: $N = kT_0FW$ donde k es la constante de Boltzman, T_0 la temperatura de referencia (290 K), F el factor de ruido del receptor, W la velocidad de chip, por ello el valor de esta expresión crecerá a medida que el terminal móvil se aleja de la estación base.

En la relación (N_0/C) , a diferencia de las relaciones (I/C) , solo el término del denominador C depende de las distancias, por ello el valor de esta expresión crecerá a medida que el terminal móvil se aleje de la estación base. Por consiguiente, la relación (E_b/N_0) sufrirá una reducción a medida que el radio de la celda aumente,

influyendo sustancialmente en la capacidad del sistema, ya que existirán terminales móviles más alejados de la estación base, con una mayor probabilidad de ser servidos por ésta.

4.7.2.8 Margen del control de potencia M_{CP} (dB)

En el sistema UMTS se aplica un control de potencia con una frecuencia de 1500 Hz que sirve para compensar el desvanecimiento rápido (*fast fading*) del canal. Cuanto más preciso sea el control, se dispondrá de mayor capacidad en la red. Sin embargo, el mecanismo del control de potencia no es perfecto y se necesita un margen para compensarlo que depende del modelo de canal utilizado.

El control de potencia no es efectivo si el terminal se desplaza a velocidades elevadas y, en este caso, no se requiere margen de corrección alguno. Los valores típicos del M_{CP} son: 1'5 dB de peatonal a 3 km/s y de 0 dB de vehicular a 120 km/s.

4.7.2.9 Tipos de servicio

El tipo de servicio ofrecido a los usuarios de una celda será determinante para el cálculo de capacidad de la misma. La red puede ofrecer servicios en modo conmutación de circuitos o conmutación de paquetes.

- **Servicios en modo conmutación de circuitos**

En el caso de que se ofrezcan varios servicios a la vez, el factor de carga total se puede calcular para ambos enlaces de la forma:

$$X = \frac{K_1}{K_{máx,1}} + \frac{K_2}{K_{máx,2}} + \dots + \frac{K_M}{K_{máx,M}} = \sum_{j=1}^M \frac{K_j}{K_{máx,j}} \quad \{4.28\}$$

donde K_j es el número de usuarios simultáneos del servicio j , $K_{máx}$ el número máximo de usuarios simultáneos y M es el número total de servicios.

Esta expresión proporciona un resultado pesimista (factor de carga mayor que el real) porque supone que los recursos del Nodo B para cada un servicio sólo pueden ser utilizados por ese mismo servicio. Sin embargo, en la realidad la asignación de los recursos es dinámica y ello proporciona una ganancia por multiplexado estadístico.

En el caso de servicios con conmutación de circuitos, los usuarios de un sector de un Nodo B tienen que ser satisfechos con cierto grado de servicio (*Grade of Service -GoS*), que se define como la relación entre el tráfico no cursado o rechazado por falta de recursos A_r y el tráfico medio ofrecido por los usuarios del sector durante la hora cargada A_o :

$$GoS = \frac{A_r}{A_o} \quad \{4.29\}$$

Un canal o servidor de un servicio es la parte de los recursos hardware que el usuario necesita para llevar a cabo la comunicación. Para calcular el número de servidores C_s capaces de satisfacer un tráfico medio de A_o con un grado de servicio GoS se hace uso de las tablas de Erlang-B. El tráfico medio ofrecido A_o es inmediato si se tienen estimaciones del número de usuarios en la hora cargada por sector u y el tráfico medio que genera uno de ellos A_u :

$$A_o = uA_u \quad \{4.30\}$$

Si se tiene en cuenta que un usuario que ocupa el canal todo el tiempo genera un tráfico de 1 Erlang, el número medio y el número de pico de usuarios simultáneos en un sector vienen dados por:

$$K_m = A_s \quad \{4.31\}$$

$$K_p = C_s \quad \{4.32\}$$

que darán lugar a un factor de carga medio X_m y de pico X_p respectivamente si se aplica la ecuación {4.28}. Si sólo existen servicios en modo conmutación de circuitos, X_p no debe sobrepasar el factor de carga máximo $X_{m\acute{a}x}$.

- **Servicios en modo conmutación de paquetes**

En el caso de servicios de conmutación de paquetes no se emplea Erlang-B, sino que se aplica una filosofía *best-effort*: el tráfico se cursa si quedan recursos disponibles (que no están siendo usados por los servicios de conmutación de circuitos). En este contexto no se dimensiona la red para albergar una cantidad determinada de estos

servicios, simplemente se calculará el *throughput* total T disponible en el sector, que es la suma de los *throughputs* individuales para cada usuario.

El *throughput* de un usuario se entiende como la tasa binaria de transmisión que percibe el usuario. Esto no debe confundirse con la tasa media de transmisión en toda la duración de la llamada. Por ejemplo, un usuario podría percibir un *throughput* de 60 kbit/s pero transmitir a una tasa media de 20 kbit/s durante toda llamada (los datos se envían a ráfagas).

El *throughput* total disponible en el sector viene dado por la siguiente expresión:

$$T = R_b C_{be} = R_b K_{m\acute{a}x} X_{be} \quad \{4.33\}$$

donde R_b es la tasa binaria del servicio portador en modo paquete, C_{be} son los canales que quedan libres para el servicio, $K_{m\acute{a}x}$ es el número máximo de usuarios del servicio y $X_{be} = X_{m\acute{a}x} - X_m$.

4.7.2.10 Fluctuaciones del canal radio

En los canales radio es una característica habitual la existencia de fluctuaciones. Sin embargo, la decisión de la ejecución de un traspaso se ha de basar fundamentalmente en el análisis de las condiciones de propagación e interferencia a largo plazo, es decir, aquellas que pueden afectar durante un periodo de tiempo considerable a una conexión. Por tanto, no debería tener en cuenta fluctuaciones a corto plazo como sería la presencia de desvanecimientos rápidos.

El canal radio está afectado por desvanecimientos rápidos modelados por una variable aleatoria tipo Rayleigh y desvanecimientos lentos modelados por una variable aleatoria gaussiana lognormal de media nula y desviación típica σ . El terminal móvil realiza un promediado durante el intervalo t_0 , que compensa los desvanecimientos rápidos. (Ver figura siguiente)

Este coeficiente de correlación depende del entorno de funcionamiento del sistema de comunicaciones móviles bajo estudio.

A continuación vamos a mostrar los pasos realizados en esta tesis para diseñar un simulador basado sobre la base de la información geográfica explicada en el capítulo anterior, y el concepto teórico de la capacidad en sistemas UMTS, para ver el efecto de esta correlación entre trayectos de las señales recibidas en un mismo terminal, sobre la capacidad del sistema. Los resultados fueron recogidos y analizados por Matlab ®. Este simulador se ocupa de implementar los fundamentos teóricos anteriores.

Para empezar se supone que tenemos un recorrido de móvil de corta distancia “ L ”, esta recorrido se marca en el centro de la zona de análisis elegida por el usuario sobre el mapa digital del terreno. El recorrido del móvil debe estar en el centro de esta circuito y debe ser mucho menor que el radio de la celda en tal caso que $10L \ll R$, esto nos sirve para considerar el recorrido como un punto cuando calculamos el ángulo desde esta recorrido y la estación base sobre el circuito.

La separación angular entre estaciones bases es el ángulo α , este ángulo: $\alpha = n/365$. Ahora se supone que tenemos un circuito de un radio R en la misma zona, la longitud de esta radio es lo mismo para las celdas de las estaciones bases que están sobre el circuito. Todas las estaciones bases que forman parte del circuito tienen que tener la misma altura, las mismas características (ganancia, inclinación,...etc.), la orientación debe ser hacia el centro del circuito y emiten la misma potencia.

Calculamos las señales ($P_1, P_2, P_3, P_4, \dots, P_n$) que llegan al recorrido de cada estación base. En la figura siguiente se muestra como se colocan las estaciones base y como se apuntan todas hacia el centro del recorrido.

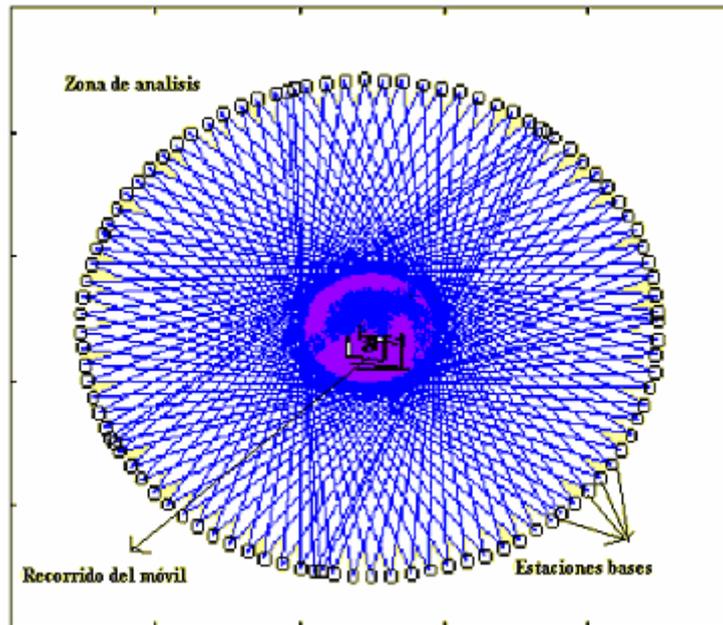


Figura 4.13: Un muestreo del recorrido con las estaciones bases sobre la zona de análisis para estimar la relación Correlación & Ángulo

El cálculo de los perfiles de señal es una función de nuestra herramienta que ofrece la posibilidad de marcar perfiles sobre mapas de información geográficas con parámetros radioeléctrica a lo largo de rutas marcadas por el usuario. De este modo, se puede tener una visión diferente de los niveles de señal presentes y de su variación a lo largo de determinados recorridos.

A través de la aplicación de esta función sobre determinadas rutas, se podrá observar la evolución de los niveles de señal a lo largo de elementos geográficos tales como carreteras o calles. Para llevar a cabo esto, jugarán un papel importante las capas de información geográfica de la herramienta, las cuales deberán ser activadas junto con la representación del mapa radioeléctrico a analizar. Así, se tendrá una visión conjunta de todos estos elementos y se podrá marcar una ruta que se ajuste a las carreteras o calles de interés.

El grupo de comandos utilizados para llevar a cabo esta opción es muy variado. Por un lado, el cálculo del perfil se apoya en comandos del módulo TIN que, aunque en un principio requieren estructuras TIN para calcular sobre ellas los perfiles, también admiten las estructuras que realmente se les ofrece por nuestra herramienta, que son *grids*. Estos comandos son *surface*, *section*, *surface*, *lattice* y *surface*, *extent* [42]. Por

otra parte, para la representación de las gráficas de los perfiles se recurre al módulo Arcplot.

En la figura 4.14 se observa el perfil de señal obtenido sobre una cobertura de potencia de una celda situada en una zona de la ciudad de Valencia. La gráfica obtenida indica el valor recibido de la señal en cada punto del recorrido del móvil en todo el tramo de la zona estudiada, puesto que el valor mínimo de potencia recibido es de -82.3 dBm, el cual es suficiente en cualquier caso.

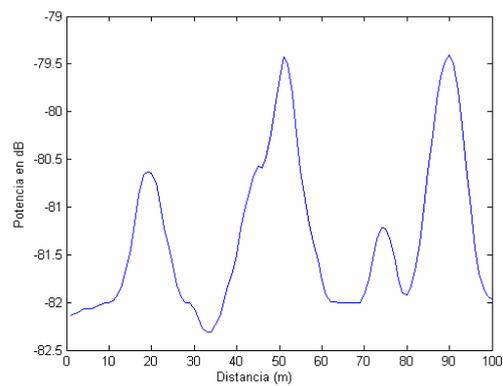


Figura 4.14: Perfil de una cobertura de potencia en la ciudad de Valencia

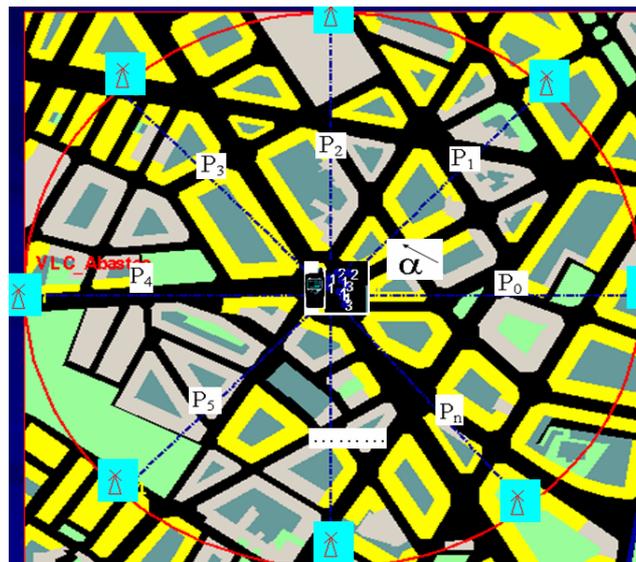


Figura 4.15: Un muestreo de una zona real para el cálculo de la relación Ángulo vs. Correlación

El cálculo de la señal recibida por el móvil se hace mediante algoritmos prediseñados y ejecutados por esta simulador (ver capítulo 2). Debido a las características de estos algoritmos, las características geográficas del entorno de análisis se tienen en cuenta al ejecutar el cálculo de las señales recibidas por el recorrido (ver figura 4.15).

Es lógico que las señales procedentes de las distintas estaciones bases sufren desvanecimiento por ser un entorno real con edificios, obstáculos, etc. Para tener resultados más fiables aplicamos las señales recibidas a un filtro para quitar el desvanecimiento a corto plazo. Ver las figuras en 4.16

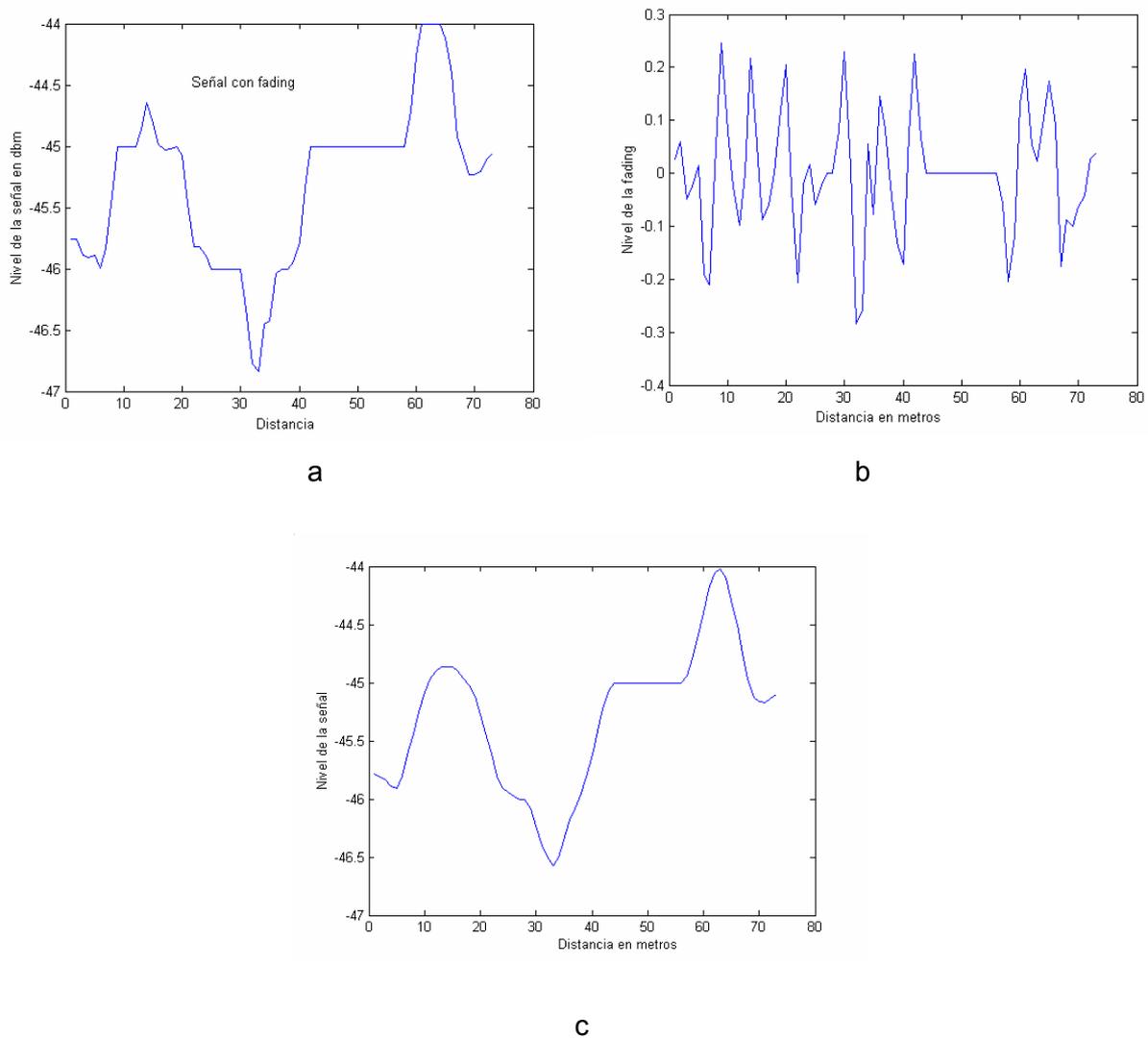


Figura 4.16 **a:** la señal original con el fading, **b:** el fading quitado de la señal por el filtro, **c:** la señal recibida filtrada del fading

Si fijamos una estación base de estas n estaciones como referencia, y calculamos las correlaciones entre esta señal de referencia y todas las demás señales que llegan al recorrido, obtenemos estas correlaciones: P_1P_2 , P_1P_3 , P_1P_4 , P_1P_5, \dots , P_1P_n . Donde P_1P_2 es la correlación entre la señal de referencia P_1 y la señal P_2 , hasta P_n , que es la señal emitida por la estación n -ésima (ver tabla 4.6).

Tabla 4.6: Correlaciones y ángulos para una estación de referencia

Ángulo	Valores de correlaciones
α	P_1P_2
2α	P_1P_3
3α	P_1P_4
4α	P_1P_5
5α	P_1P_6
...	...
$(n-1)\alpha$	P_1P_n

El paso siguiente es aplicar todo el método anterior cambiando cada vez la estación base de referencia con la siguiente, y repetimos el método anterior hasta terminar el cálculo de las señales recibidas de todas las estaciones.

Tabla 4.7: Correlaciones y ángulos cambiando cada vez la estación de referencia para un radio

Ángulo	Valores de correlaciones
α	P_1P_2 P_2P_3 P_3P_4 P_4P_5 P_5P_6 P_6P_7 ... P_nP_1
2α	P_1P_3 P_2P_4 P_3P_5 P_4P_6 P_5P_7 P_6P_8 ... P_nP_2
3α	P_1P_4 P_2P_5 P_3P_6 P_4P_7 P_5P_8 P_6P_9 ... P_nP_3
4α	P_1P_5 P_2P_6 P_3P_7 P_4P_8 P_5P_9 P_6P_{10} ... P_nP_4
5α	P_1P_6 P_2P_7 P_3P_8 P_4P_9 P_5P_{10} P_6P_{11} ... P_nP_5
...
$(n-1)\alpha$	P_1P_n P_2P_1 P_3P_2 P_4P_3 P_5P_4 P_6P_5 ... $P_nP_{(n-1)}$

Con el motivo de analizar el efecto de la distancia se asume un radio inicial R_{min} que es el radio mínimo y un radio máximo R_{max} , estos radios son parámetros de

entrada al simulador y deben estar en el margen de la zona de análisis, se repita todo el proceso anterior m veces aumentando el radio de la celda cada vez un incremento:

$$\Delta = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{m} \quad \{4.34\}$$

Así tenemos m tablas con valores distintos a la tabla 4.6 para cada radio:

$$R_m = R_{\min} + m\Delta. \quad \{4.35\}$$

Una vez tenemos todas las correlaciones calculadas, y los ángulos que son duplicaciones de α hasta $(n-1)\alpha$ ya podemos estimar la relación Correlación & Ángulo mediante técnicas de MatLab®. Se calcula el término medio, y la desviación típica de todas las correlaciones con el ángulo para todos los radios. (Ver figura siguiente)

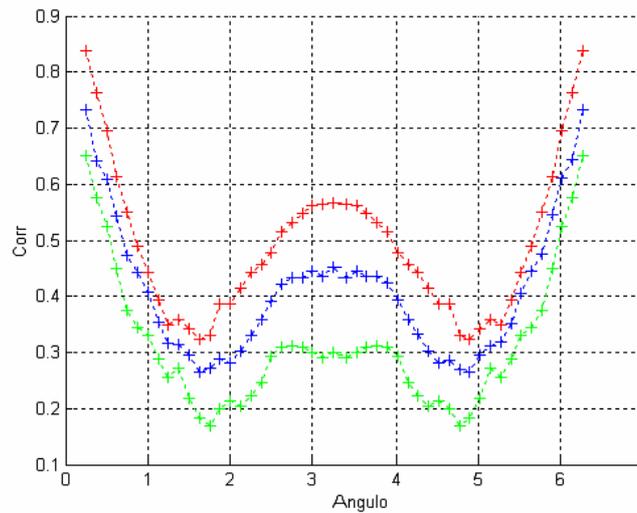


Figura 4.17: Estimación de la relación Correlación & Ángulo en un escenario real

A partir de las técnicas de MatLab, podemos destacar una fórmula común para la relación Correlación & Ángulo que es una ecuación de cuarto grado:

$$\rho = 0.0057719\alpha^4 - 0.075433\alpha^3 + 0.33403\alpha^2 - 0.57224\alpha + 0.8035 \quad \{4.36\}$$

Donde ρ es la correlación media total, α es el ángulo entre la estación base y el recorrido del terminal Móvil. Resultados detallados y ejemplos relacionados al tema se muestran en el próximo capítulo .

5

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados de las simulaciones realizadas. Se incluyen las gráficas obtenidas más significativas y comentarios a las mismas. Se han realizado distintas simulaciones, variando algunos parámetros, para poder evaluar el comportamiento del sistema en distintas situaciones.

5.1 Estimación de tráfico y radio de celdas

Como ya hemos visto en el capítulo 3 de que se puede manejar el sistema de la información geográfica fácilmente desde fuera con las sintaxis de ARC/INFO y del sistema operativo. Vamos a mostrar a continuación algunos resultados obtenidos a partir de nuestro módulo, el cual se ejecuta sobre DC-CELL, en diferentes zonas de las ciudades de Valencia y Munich.

Los resultados obtenidos para ambas ciudades se encuentran en las tablas 5.1 y 5.2 respectivamente. En estas tablas se han tomado 5 zonas diferentes para cada ciudad con un área aproximada de 3 km² y una penetración de mercado del 35%, el tráfico total estimado se representa en kbit/h y la estimación del radio de la celda en metros.

Tabla 5.1: Estimación para el tráfico y radio de celdas en la ciudad de Valencia

Escenarios	Tráfico en UL (kbit/h)	Tráfico en DL (kbit/h)	1 Portadora UL radio (m)	2Portadoras UL radio (m)	1 Portadora DL radio (m)	2Portadoras DL radio (m)
Zona 1	$1.74 \cdot 10^8$	$2.83 \cdot 10^8$	507	878	450	779
Zona 2	$1.43 \cdot 10^8$	$2.62 \cdot 10^8$	712	1233	579	1003
Zona 3	$1.55 \cdot 10^8$	$2.7 \cdot 10^8$	619	1072	538	932
Zona 4	$1.62 \cdot 10^8$	$2.8 \cdot 10^8$	550	953	470	814
Zona 5	$1.71 \cdot 10^8$	$2.9 \cdot 10^8$	474	821	359	622

Tabla 5.2: Resultados estimados para el tráfico y radio de celda en la ciudad de Munich

Escenarios	Tráfico en UL	Tráfico en DL	1 Portadora UL radio (m)	2Portadoras UL radio (m)	1 Portadora DL radio (m)	2Portadoras DL radio (m)
Zona a	$1.56 \cdot 10^8$	$2.85 \cdot 10^8$	430	745	370	641
Zona b	$1.77 \cdot 10^8$	$2.93 \cdot 10^8$	390	675	310	537
Zona c	$2.08 \cdot 10^8$	$3.14 \cdot 10^8$	383	663	272	471
Zona d	$2.44 \cdot 10^8$	$3.53 \cdot 10^8$	377	653	254	440
Zona e	$2.5 \cdot 10^8$	$3.6 \cdot 10^8$	362	627	220	381

En las tablas 5.1 y 5.2 se pueden apreciar las siguientes conclusiones:

- El tráfico estimado en el DL siempre es mayor que en el de UL. Esto verifica el concepto de planificación del UMTS Forum como mostraba en el capítulo 4 en la tabla 4.4.
- El radio estimado para el tráfico en DL es más restringido que en el caso del UL. Por esta razón en la planificación se utiliza el radio de una portadora del DL al ser más restringido de dos portadoras.
- En las simulaciones hechas con nuestro modelo se nota que el mayor tráfico obtenido está en la zona e en la ciudad de Munich con un radio de 220 metros, esto se debe a que la zona está ubicada en el centro de la ciudad, lo cual supone mayor cantidad de población y tráfico.

- Se aprecia que para la zona 2 en la ciudad de Valencia se obtiene el máximo radio estimado, esto es debido a que la mayor parte de la zona seleccionada para este caso está ocupada por zona verde o zona rural. Lo cual se traduce en una menor densidad de población, o lo que es lo mismo, una menor cantidad de tráfico.
- Se puede observar que el tráfico estimado en la ciudad de Munich es mucho mayor que el tráfico en la ciudad de Valencia, y esto es debido a que la densidad de población que refleja la Información geográfica GIS del mapa geográfico de la ciudad de Munich es mucho mayor que en la ciudad de Valencia.
- Los *grids* generados por las funciones implementadas por nuestro modelo de planificación representan de forma muy clara el tráfico asociado a cada uno de los servicios en función de la división zonal establecida. La figura 5.1 muestra un ejemplo real obtenido en una zona de la ciudad de Madrid para el servicio de voz en DL.

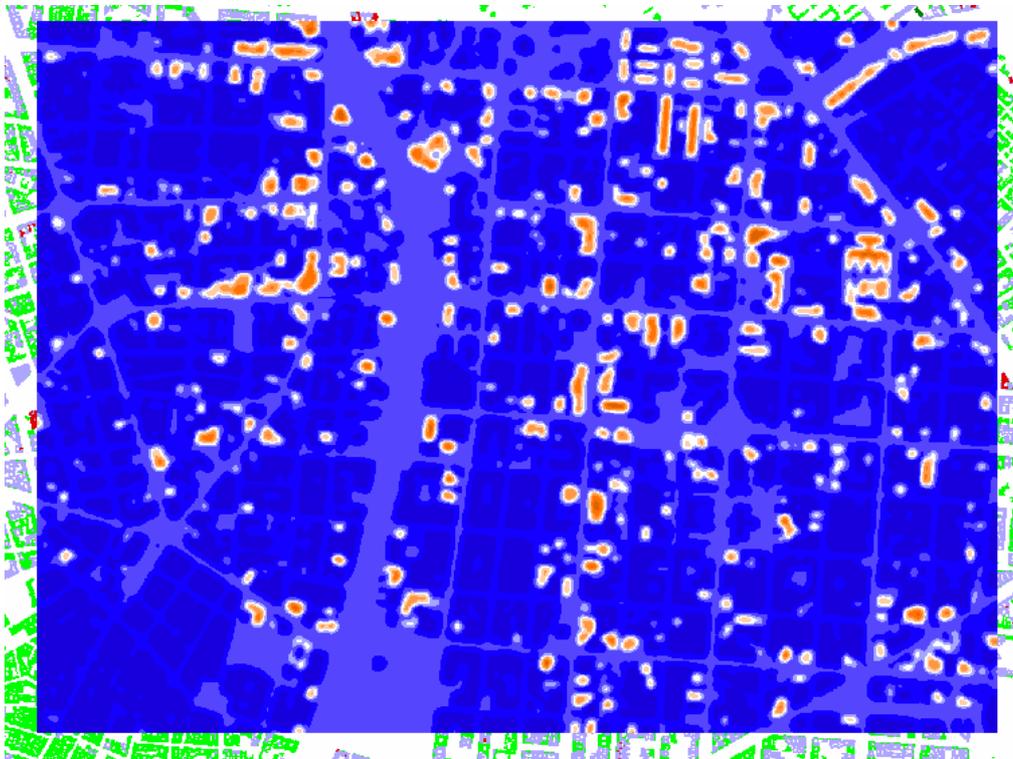


Figura 5.1: Un ejemplo del servicio de voz en DL; en la figura se observa la diferencia de los colores en función de la densidad de tráfico

- Según el modelo de planificación nuestro, se puede calcular el radio y dibujar el patrón sobre el mapa geográfico como se ha explicado en el capítulo 4 en dos maneras: regulares o irregulares. Ver figuras 5.2 y 5.3.

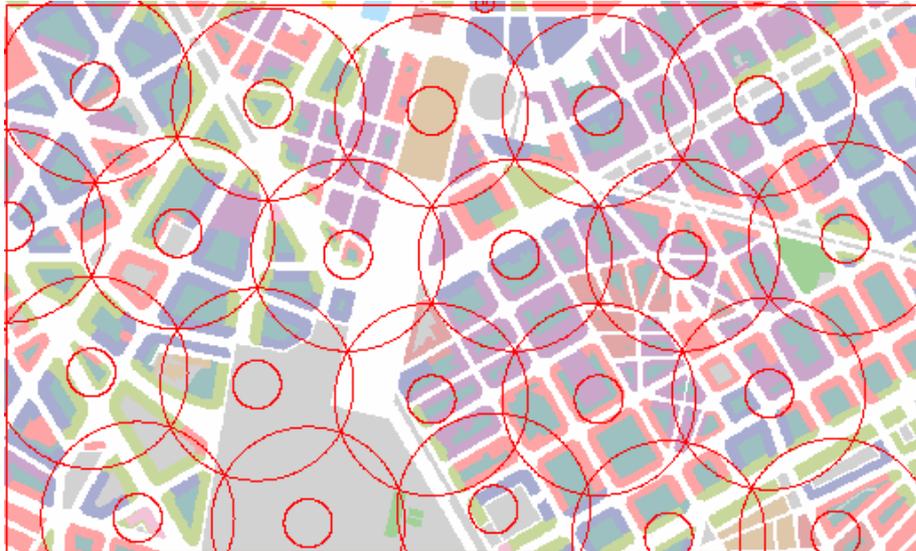


Figura 5.2: Patrón regular dibujado en una zona de la ciudad de Valencia

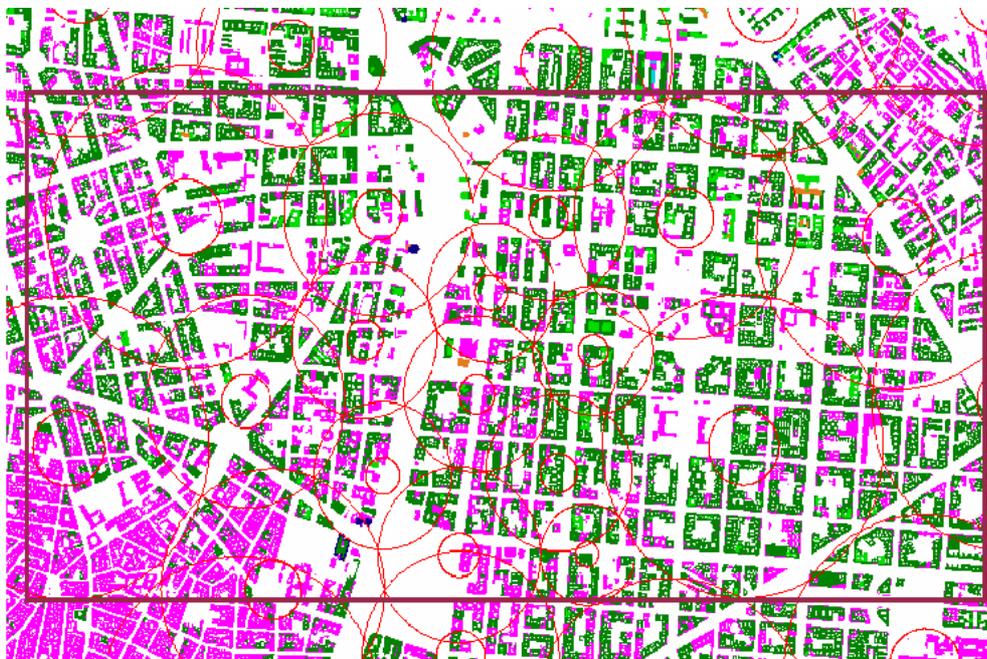


Figura 5.3: Patrón irregular en la ciudad de Madrid; las celdas tendrán un tamaño que pudiendo variar entre los límites marcados por las restricciones del tráfico

5.2 Cálculo de cobertura

A continuación se muestran grids de cobertura de potencia calculados con cada uno de los modelos de propagación utilizados en esta tesis. Con el fin de poner de relieve las diferencias entre ellos, la celda utilizada es siempre la misma para el caso de las macroceldas y lo único que va cambiándose es el modelo de propagación utilizado.

Los parámetros de la celda pueden ser modificados para utilizar el modelo en cada caso particular. En este ejemplo utilizamos una celda con los siguientes parámetros:

- Radio = 750 m
- EIRP = 30 dBm
- Frec = 945 MHz
- $H_{\text{edif}} = 21$ m
- $H_{\text{tot}} = 24$ m
- $H_{\text{rx}} = 1.7$ m
- Resolución = 4 m
- Antena: isotrópica

En la figura 5.4 se muestra el grid de potencia de una celda calculado con el modelo de Okumura-Hata y en la figura 5.5 se muestra el grid con el modelo de Walfisch-Bertoni.

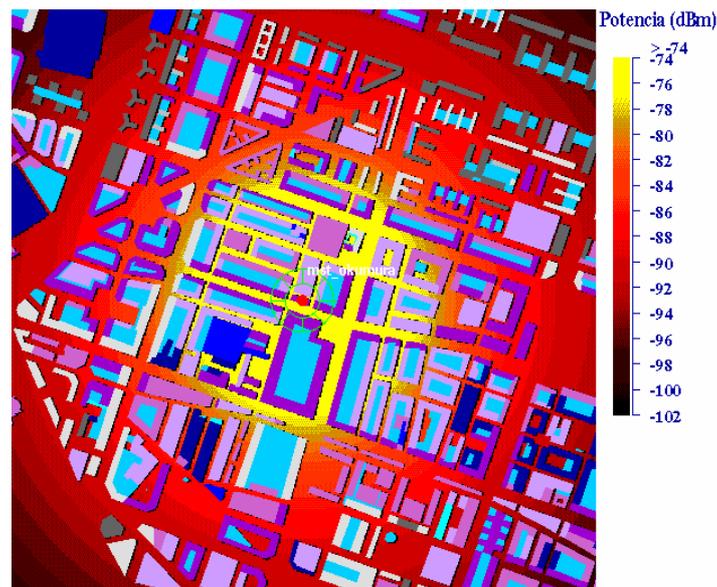


Figura 5.4: Grid de cobertura de potencia calculado con Okumura-Hata

Se aprecia cómo el modelo de Okumura-Hata realiza una estimación que, una vez fijados los parámetros de entorno para el modelo, sólo depende de la distancia al transmisor. Por ello, el resultado son circunferencias con centro en la estación base. Es una estimación menos precisa que la proporcionada por los otros modelos pero el tiempo de cómputo es el menor de todos con notable diferencia, se ha tardado 19 s en realizarse la estimación.

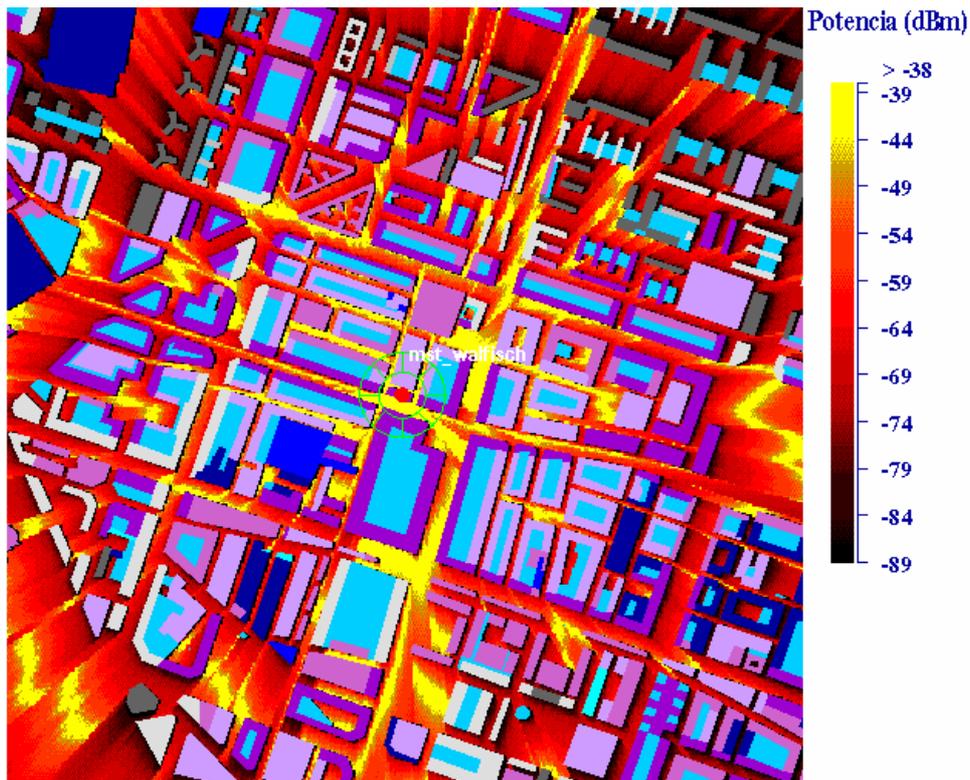


Figura 5.5: Grid de cobertura de potencia calculado con Walfisch-Bertoni

Por su parte, el modelo de Walfisch-Bertoni sí ha tenido en cuenta más parámetros del entorno, lo cual queda reflejado en el grid resultante, que se ve claramente afectado por la presencia de los edificios. Es una estimación mejor que la de Okumura-Hata, aunque el tiempo de cómputo ha aumentado.

Para el cálculo de este grid, que tiene exactamente las mismas dimensiones y resolución que el de Okumura-Hata, se ha tardado 1 min. 5 s en realizar los cálculos.

La figura 5.6 presenta el grid de potencia de la celda propuesta calculado con el modelo de Uni-Valencia. El tiempo de cómputo ha sido de 1 min. 36 s. Al igual que los otros modelos queda muy lejos de los tiempos de calculo de Okumura-Hata.

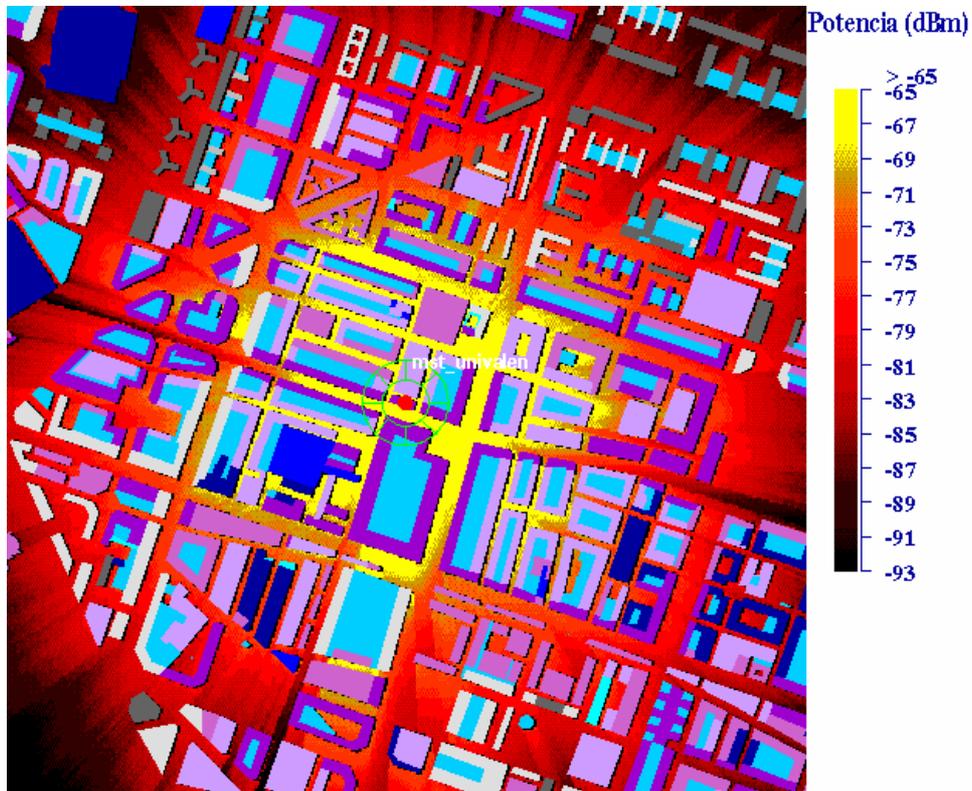


Figura 5.6: Grid de cobertura de potencia calculado con el modelo de Uni-Valencia

La figura 5.7 muestra un conjunto de coberturas calculadas de macro y micro células sobre el mapa digital de la ciudad de Munich, formando un sistema completo. En esta figura se observa el nivel de potencia calculado en una rampa de color con las antenas directivas y otras isotropitas

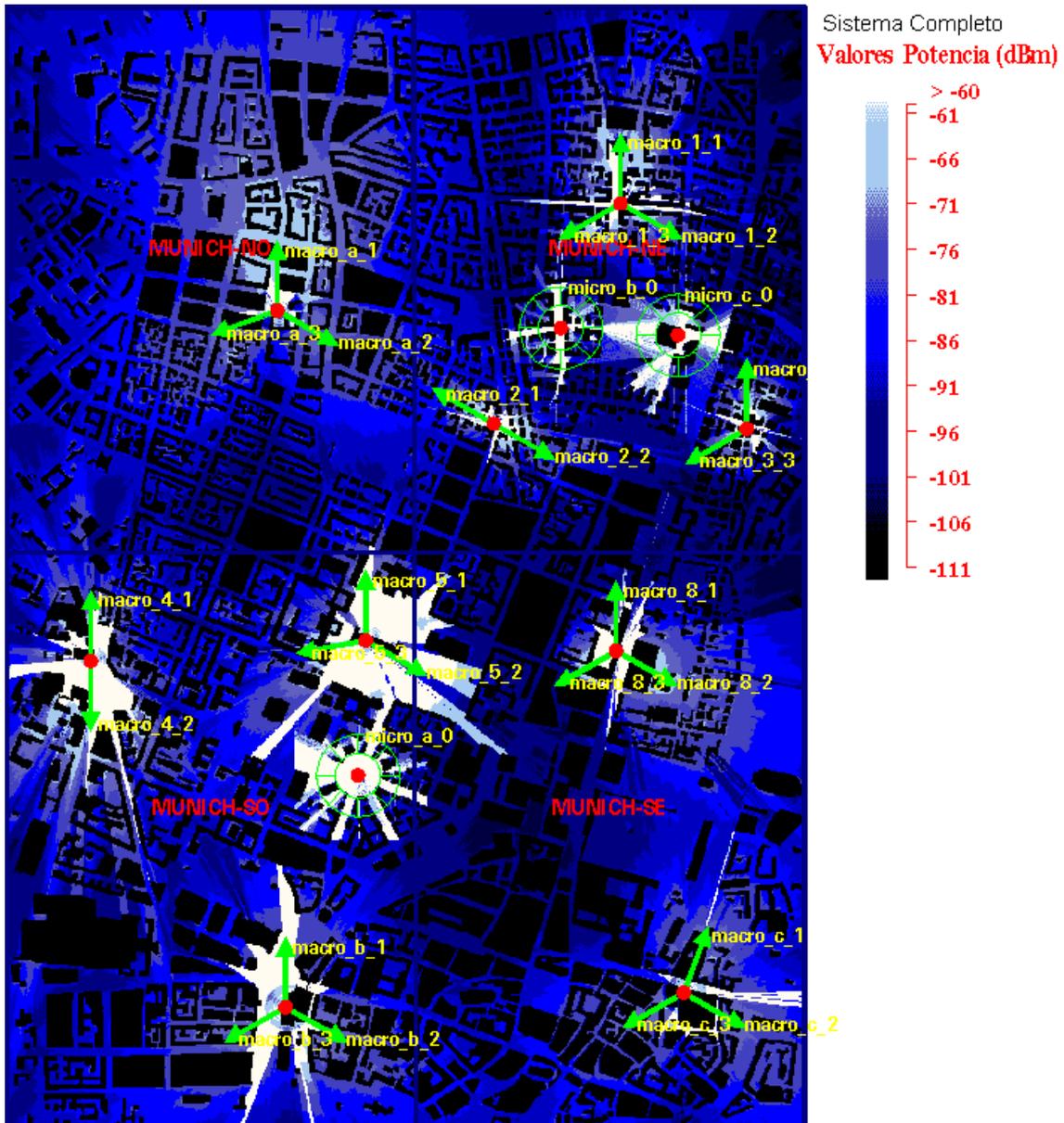


Figura 5.7: Grid de un sistema completo con los valores de potencia calculado en la ciudad de Munich

La figura 5.8 representa un mapa de Zonas de Mejor Enlace o *Best-Server*. En ella se pueden apreciar las diferentes zonas del mapa y la celda a la que pertenece cada una. Sobre este mapa, también se representa la ubicación de las celdas y su orientación en acimut.

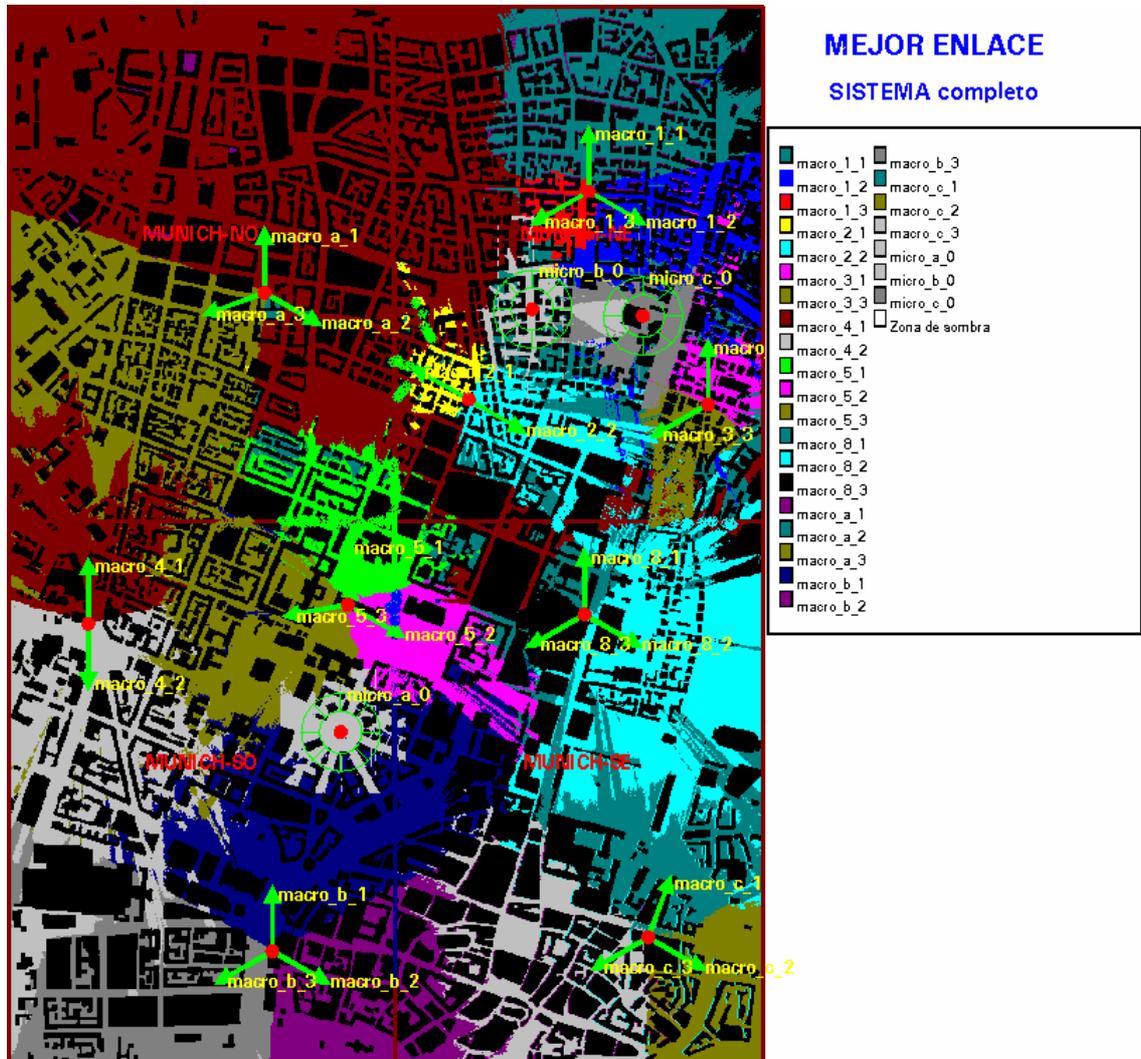


Figura 5.8: Mapa de Zonas de Mejor Enlace o *Best-Server* de un sistema celular

5.3 Cálculo del perfil de la señal

El cálculo de los perfiles de señal, como ya hemos visto en el capítulo 4 es una función de nuestra herramienta que ofrece la posibilidad de marcar rutas por el usuario sobre la mapa de información geográfica y calcular el nivel de la señal en esta perfil a partir de coberturas calculadas previamente con parámetros radioeléctrica.

En este párrafo vemos un ejemplo ejecutado sobre el mapa digital de la ciudad de Munich por nuestra herramienta. En la figura 5.9 se muestra una ruta marcada por el usuario sobre el mapa de esta ciudad. Se muestra los 12 puntos de la ruta marcados por color amarillo. Mientras que en la figura 5.10 se observa la evolución del cálculo en la curva de la distancia & niveles de señal con la referencia de cada punto sobre la curva.



Figura 5.9: Ejemplo de una ruta marcada sobre una calle del mapa digital de la ciudad de Munich

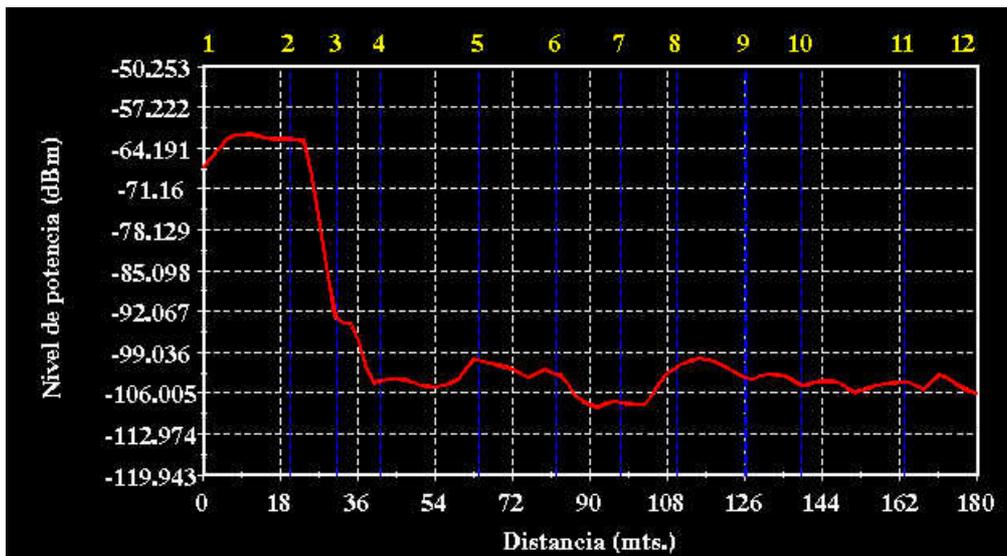


Figura 5.10: la curva de nivel de potencia & distancia de la ruta marcada en la figura 5.5

Comparando las dos figuras 5.9 y 5.10, se puede observar que el nivel máximo de la señal está en el punto 2 y 3, esto debido a que en estos dos puntos hay una visión directa desde la estación base hacia el móvil, mientras que el resto del recorrido sufre gran desvanecimiento. La precisión del cálculo depende del modelo de propagación utilizado, que en este caso se ha utilizado el modelo de Walfisch-Bertoni que tiene en cuenta la presencia de edificios en el trayecto que una transmisor y receptor (ver capítulo 2).

En la siguiente figura 5.11 se muestra otro ejemplo para el cálculo de la señal de una ruta marcada sobre el mapa de la ciudad de Valencia. En la figura 5.12 se nota que en los puntos 2 y 7 el nivel de la señal recibida es el máximo debido a que en estos dos puntos hay una visión directa entre la estación base y el terminal móvil.

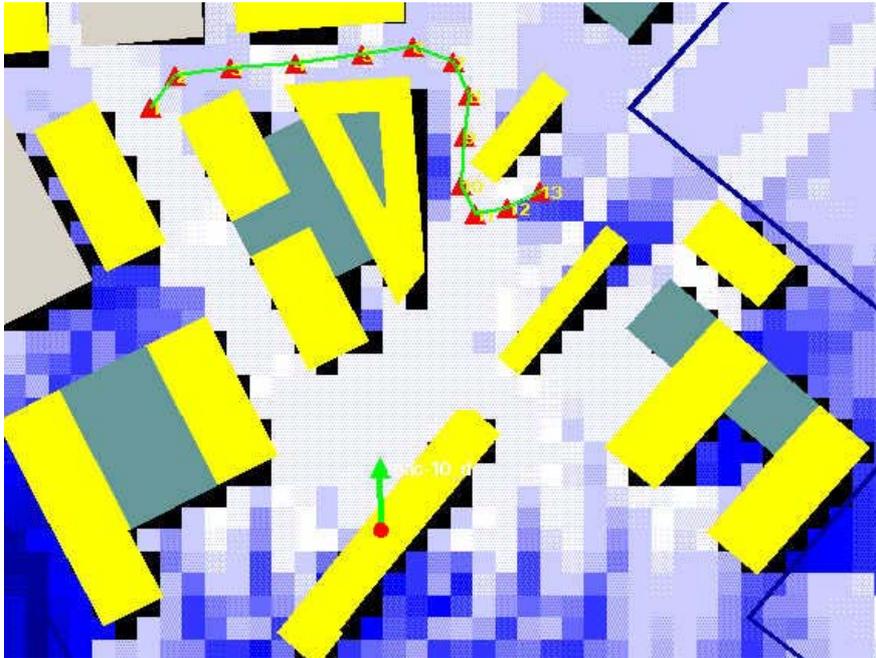


Figura 5.11: Ejemplo de una ruta marcada sobre el mapa digital de la ciudad de Valencia

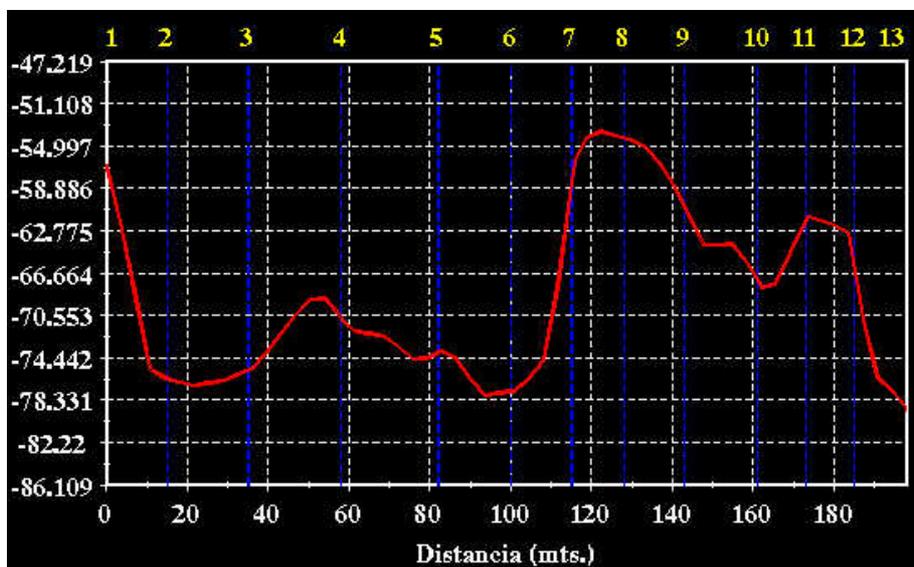


Figura 5.12: la curva del nivel de potencia & distancia de la ruta marcada en la figura 5.10

5.4 Coeficiente de correlación entre estaciones base

Para mostrar los resultados del simulador de la correlación del *shadowing* entre estaciones base, vemos aquí un ejemplo de simulación para un escenario en la ciudad de Valencia. En este caso hemos ubicado 50 estaciones bases con una separación angular de $365/50 = 7,3$ grados y con un radio inicial de 250 m para cada estación.

Cuando la correlación “ ρ ” entre estaciones base $\rho=0$, significa que el desvanecimiento que sufren las señales procedentes de las distintas estaciones base es estadísticamente distinto por completo. Se dice entonces que las señales están incorreladas. Por el contrario cuando $\rho=1$ significa que el desvanecimiento que sufren las señales procedentes de las distintas estaciones base es estadísticamente idéntico.

Si aumentamos el radio de la celda cada vez, por ejemplo unos 25 metros manteniendo el mismo número de estaciones bases hasta llegar a un radio de 2000 metros, (valores típicos), y calculamos la media total, el máximo, y el mínimo de la relación Correlación & Angulo & Distancia para varios escenarios tanto en la ciudad de Valencia como en la ciudad de Munich con los mismos parámetros radioeléctricos, se obtienen los resultados deseados.

Los resultados obtenidos muestran que el efecto de la distancia es muy pequeño y que se puede considerarse insignificante, mientras que el efecto del tipo del entorno geográfico es muy importante y se refleja más en cuanto a la relación con el ángulo.

En un entorno homogéneo como en la figura 5.13, se ha mostrado que el *shadowing* que sufren las señales procedentes de las distintas estaciones base es muy parecido, y las señales son más correladas, mientras que en un entorno heterogéneo como se ve en la figura 5.14, hace que el efecto de la correlación entre estas señales queda menos correladas y así afecta a los resultados final de la relación entre la correlación y el ángulo.

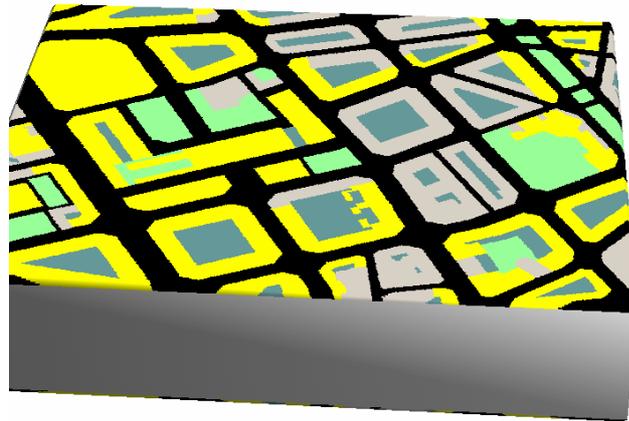


Figura 5.13: Un parte del mapa digital de Valencia muestra una zona homogénea

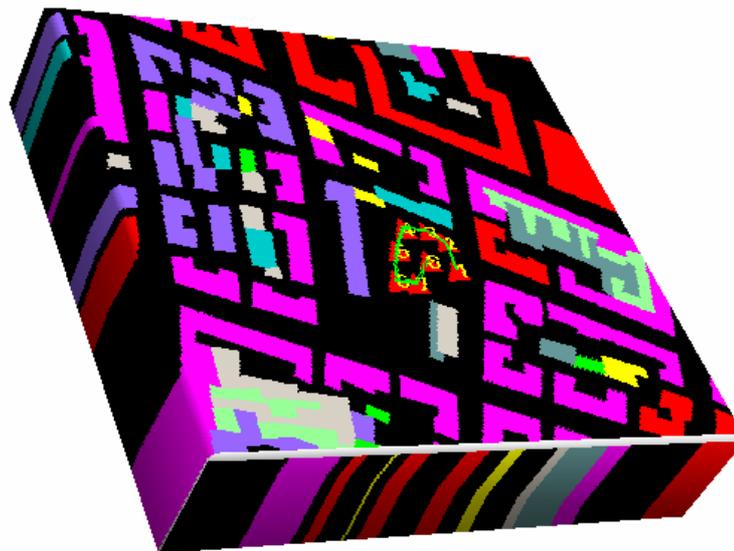


Figura 5.14: Un parte del mapa digital de Munich muestra una zona heterogénea

Las siguientes gráficas muestran la relación de la Correlación & Ángulo. Cada figura muestra la media, el máximo, y el mínimo de esta relación.

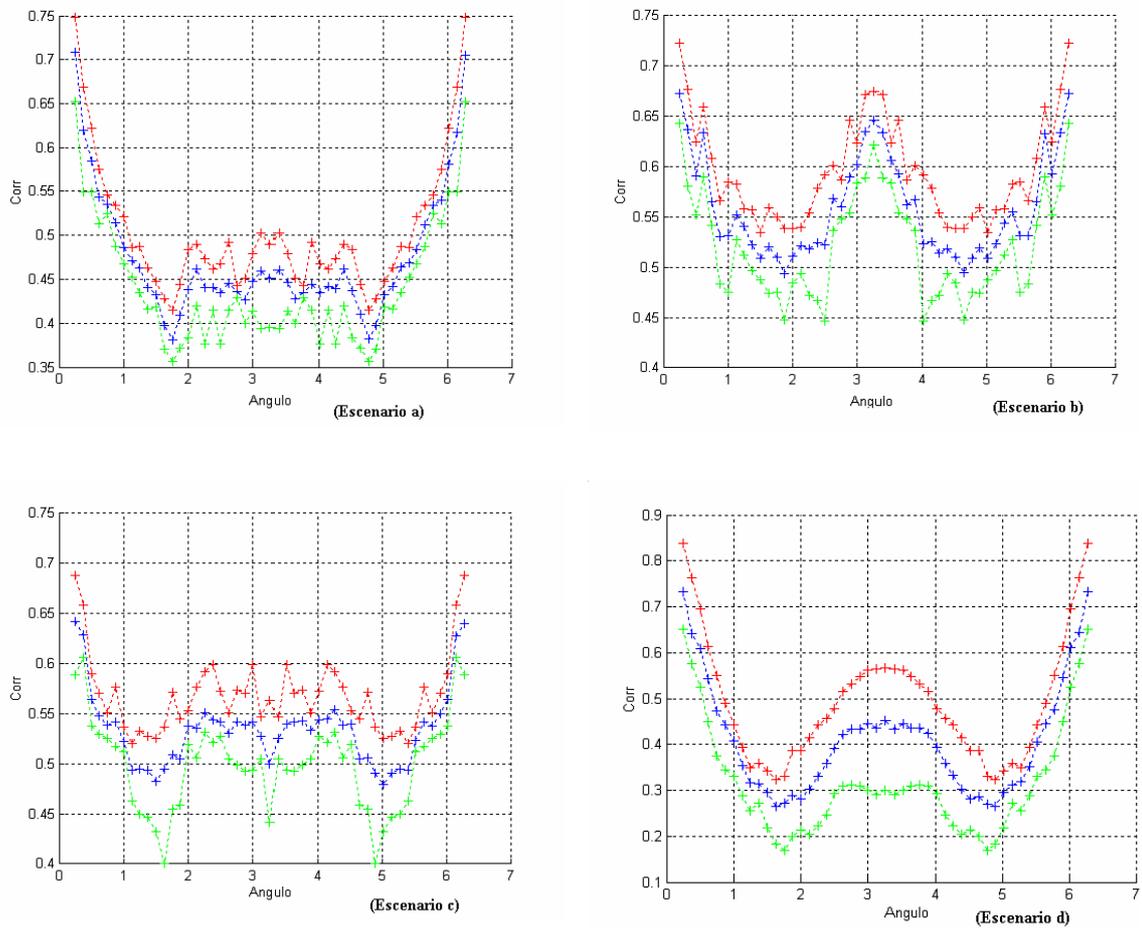


Figura 5.15: Muestras de la relación Correlación & Angulo en varios escenarios a, b, c, d en las ciudades de Valencia y Munich

Las simulaciones anteriores forman parte de unas 60 simulaciones hechas en varios escenarios de las ciudades de Valencia y Munich. La siguiente figura muestra la media total de la relación Correlación & Angulo para todas las simulaciones.

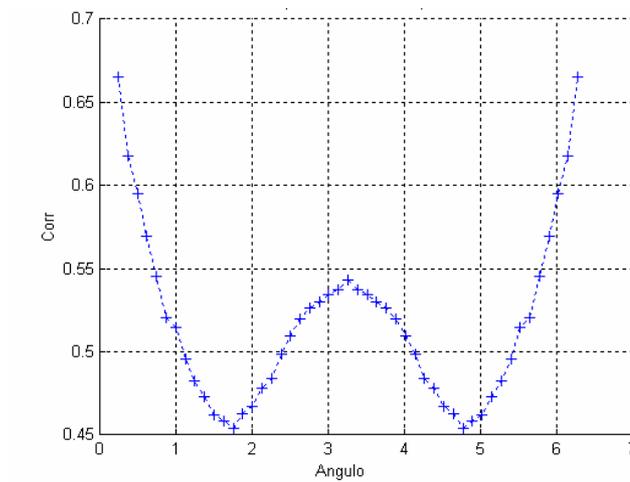


Figura 5.16: Media total de la relación Correlación & Angulo obtenida para varios escenarios en las ciudades de Valencia y Munich

Con esta última figura podemos destacar una fórmula común para la relación Correlación & Angulo como se ha visto en el capítulo anterior que es la siguiente ecuación:

$$\rho = 0.0057719\alpha^4 - 0.075433\alpha^3 + 0.33403\alpha^2 - 0.57224\alpha + 0.8035 \quad \{5.1\}$$

6

Conclusiones

En la planificación tradicional debido al excesivo uso de campañas de medidas, esto hace que el coste sea muy elevado. En esta tesis se ha realizado un modelo de planificación de sistemas UMTS mediante sistemas de información geográfica así como un estudio detallado sobre los factores más importantes que afectan a la capacidad.

Nuestro trabajo en esta tesis en planificación de sistemas de tercera generación UMTS, está basado en el GIS. El GIS (ver capítulo 3) es una herramienta potente que provee una base de datos geográfica adaptable y capaz de hacer todo tipo de tareas sobre esta información. Usando las posibilidades del GIS facilita la construcción de un sistema de información geográfica. Es capaz de mantener simultáneamente un conjunto de mapas para cada zona geográfica bajo estudio. Esto nos ofrece la posibilidad de manejar y planificar todo el entorno real disponible en formato digital sobre el ordenador con un interfaz gráfico amigable.

El hecho de elegir el ARC/INFO, un Sistema de Información Geográfica potente para nuestra aplicación de planificación de sistemas celulares, es por sus grandes ventajas y su sencillez de uso sobre sistemas operativos robustas como el Unix, la construcción de nuestro modelo de planificación que llevado a cabo en el capítulo 4 fue desarrollado mediante este *software*.

Hemos visto en el capítulo 2 que la predicción de las pérdidas de propagación, es un factor muy importante para tener buen resultados así al elegir el modelo adecuado de propagación da resultados más precisos a la hora de planificación; en

este sentido, todos los modelos de propagación usados en esta tesis fueron programados y instalados sobre nuestra herramienta con interfaz gráfico que permite al usuario elegir el modelo adecuado y ver los resultados sobre el mapa geográfico.

De las estimaciones de planificación hechas sobre las ciudades de Valencia y Munich podemos concluir lo siguiente:

- La clasificación zonal del tráfico estimado depende directamente del tipo de entorno. En este sentido, nuestro modelo está diseñado para que se adapte a cualquier mapa disponible en formato GIS. Por otro lado, a la hora de cambiar el entorno, podemos adaptar nuestro plano de nuevo actualizando la base de datos del sistema en una manera sencilla.
- En los sistemas UMTS, se plantea la posibilidad de definir el tamaño de las celdas según la intensidad de tráfico por unidad de área, de tal forma que las zonas con mayor tráfico sean atendidas por celdas más pequeñas o por micro celdas o pico celdas, de esta manera hemos creado una función en nuestro modelo de planificación que permite la creación automática de patrones irregulares con distintos radios.

De las simulaciones hechas para evaluar el efecto del coeficiente de correlación sobre la capacidad de los sistemas UMTS podemos destacar los siguientes puntos:

- La relación Correlación & ángulo no es fija, sino depende de la distancia y el ángulo entre el terminal móvil y la estación base:

$$\rho = f(r, \alpha) \quad (6.1)$$

- Pero las simulaciones hechas con radios prácticos de un rango entre 250 metros y 2000 metros, muestran que el efecto de la distancia es muy pequeño respectivamente y que se puede considerarse insignificante. Entonces la relación ρ se puede aproximar solo en función del ángulo:

$$\rho = f(\alpha) \quad (6.2)$$

- Así la relación final aproximada se queda como hemos visto en el capítulo 4 en la ecuación {5.1}, de esta fórmula y a partir de la correspondiente figura 5.16

podemos notar que cuando la diferencia entre los ángulos de llegada es pequeña, los dos perfiles de la trayectoria comparten muchos elementos comunes y se espera que tengan una alta correlación, también se puede observar la simetría de la curva a partir de los ángulos 180 grados.

- Comparando estos resultados con el estudio de [57], si aplicamos la ecuación {5.1} podemos ganar hasta 2 % del número de usuarios. Ver figura 6.1.
- En el caso del estudio de la optimización de la capacidad de sistemas WCDMA-UMTS mediante técnicas de SSDT (*Site Selection Diversity Transmission*) [58], si aplicamos nuestra ecuación a este estudio, se puede ganar hasta 10 % de los usuarios. Ver figura siguiente.

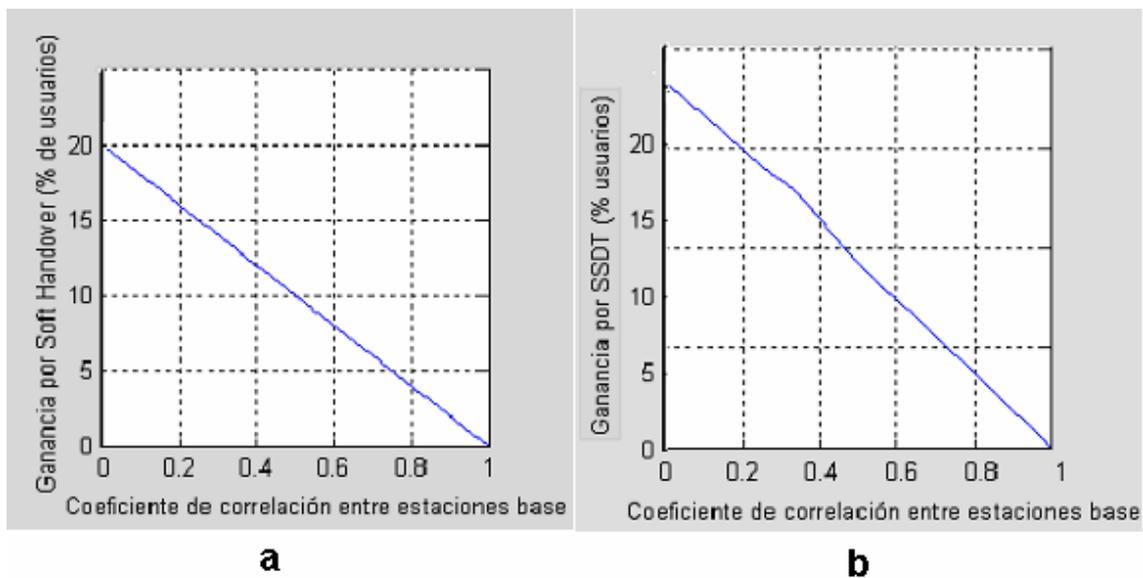


Figura 6.1: Ganancia en capacidad para distintos valores de ρ

a) por utilizar SHO b) por utilizar SSDT

Apéndice A

DC-CELL: Planificación de sistemas celulares

A.1 Introducción

DC-CELL es una herramienta de planificación de telefonía móvil celular para entornos urbanos desarrollada en el Departamento de Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia, esta herramienta es un conjunto de programas y subrutinas basadas en el sistema de información geográfica ARC/INFO.

El hecho de que DC-CELL esté basada en un GIS le confiere la flexibilidad suficiente como para gestionar prácticamente cualquier tipo de información cartográfica y desarrollar nuevas facilidades aplicadas a planificación y optimización de recursos en nuevos sistemas de radiocomunicaciones. En la pantalla principal de DC-Cell se distinguen cuatro zonas bien diferenciadas (ver figura A.1):

- Menú principal: Es una barra horizontal en la que aparecen varias opciones. Al pinchar con el ratón en cualquier opción aparecen submenús desplegables hacia abajo. La barra de menú y el conjunto de menús desplegables constituyen la interfaz de comunicación entre el usuario y el programa.
- Plano: Tanto esta zona de la pantalla como las tres siguientes forman parte de la ventana gráfica de DC-CELL. En la zona dedicada al plano aparece dibujado el plano de la mapoteca seleccionada por defecto. Cuando se realicen cálculos de planificación será en esta parte de la pantalla donde aparezcan los mapas de potencia recibida, interferencias, etc.
- Leyenda: En la parte superior derecha de la ventana gráfica aparece la leyenda asociada al mapa, es decir, el código de colores empleado para representar la información.

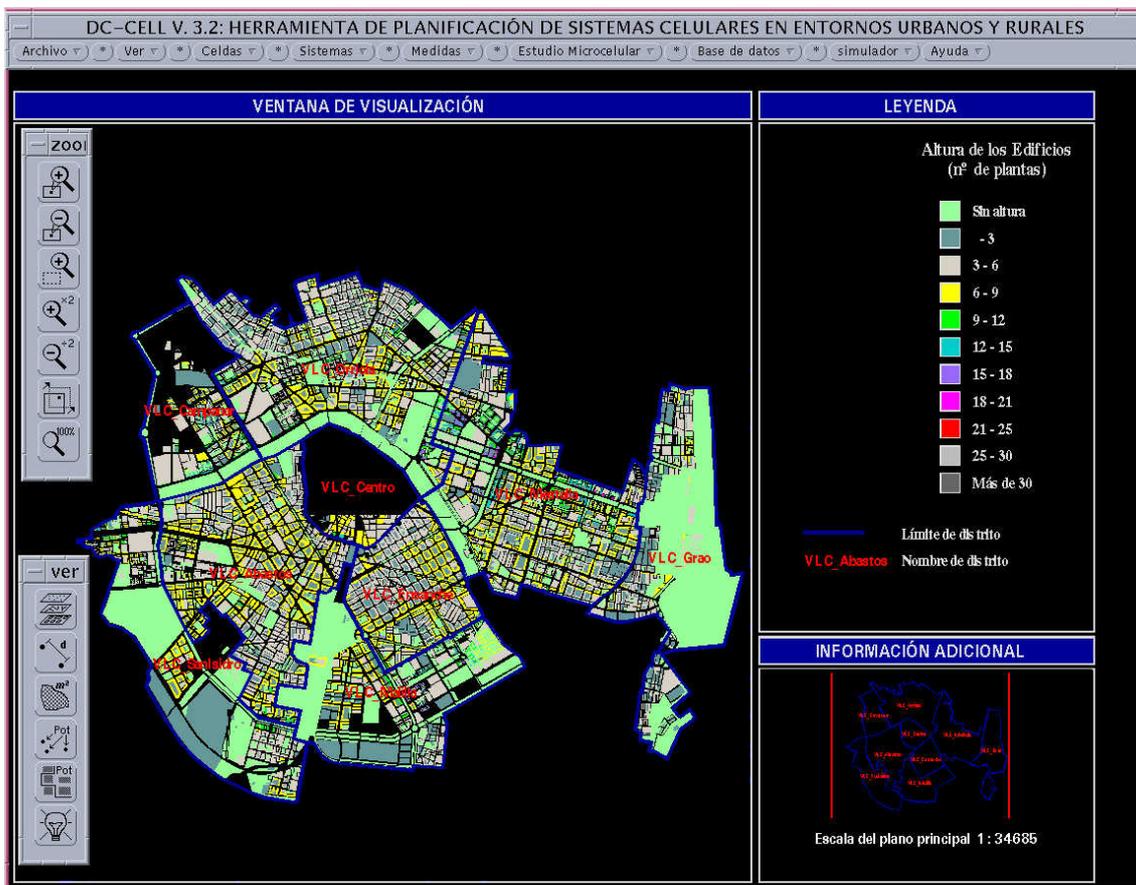


Figura A.1: Menu principal de DC-CELL

- Plano a escala: Es la parte inferior derecha de la ventana, se representa una versión reducida del plano de la mapoteca. Sobre ella se marca con un recuadro blanco cuál es la zona representada con mayor detalle en el área de plano. En un principio este cuadro blanco abarcará todo el mapa, pero conforme se vayan realizando ampliaciones, reducciones o cambios de escala irá modificándose convenientemente. Además el usuario dispone, en esta zona de la ventana, de información referida a la escala con que está representado el plano.

En DC-CELL se pueden clasificar tres tipos básicos de funciones:

- Funciones de análisis de la información geográfica
- Funciones de análisis de la información radioeléctrica
- Funciones de base de datos

A.2 Funciones de análisis de la información geográfica

La información geográfica en DC-Cell se encuentra organizada de cara al usuario en capas de información, constituyendo cada capa un tipo de elemento geográfico diferente o bien un tipo de mapa geográfico distinto. Las capas disponibles en esta versión del programa son las siguientes:

- **Mapa geográfico:** Es una imagen en formato TIFF que ofrece una descripción físico-política de la mapoteca correspondiente. Es una capa meramente ilustrativa, pues no lleva solidaria ningún tipo de información.
- **Modelo digital del terreno:** Es un mapa en formato matricial que contiene la información de la altura del terreno sobre el nivel del mar para cada celda. Realiza así una descripción continua de los valores de altura en la mapoteca seleccionada.
- **Ríos:** Mapa vectorial formado por arcos que representa los ríos de la mapoteca seleccionada
- **Picos:** Mapa vectorial formado por puntos que representa la ubicación de los picos más representativos de la mapoteca seleccionada.
- **Carreteras y ferrocarriles:** Mapa vectorial de arcos que muestra las principales carreteras y vías de ferrocarril de la mapoteca seleccionada. Esta capa viene además acompañada de información descriptiva acerca del tipo de carretera que constituye cada arco. Con esta información se dotará de una leyenda diferente a través del color a los distintos tipos de carreteras (autopista/autovía, nacional, comarcal, revestida, camino) para diferenciarlos entre sí.
- **Núcleos de población:** Mapa con información vectorial formado por polígonos, en el que cada polígono representa el contorno de una localidad significativa de la mapoteca seleccionada.
- **Municipios:** Esta capa está formada por polígonos, en la que cada uno representa un término municipal de la mapoteca seleccionada.

- Índice de la mapoteca: Ésta es una capa de información vectorial que divide la mapoteca en diferentes trozos o *tiles*. Esta formada por una serie de polígonos, cada uno de los cuales representa un *tile* de la mapoteca, de modo que ésta queda troceada en los diferentes polígonos indicados por esta capa.
- Edificios: Capa vectorial de polígonos que representa los edificios de la mapoteca. Las posibilidades de representación de esta capa vienen dadas por contornos, polígonos coloreados o número de plantas.

Existen varias funciones de análisis de la información geográfica, desde la simple visualización de determinados valores puntuales de los mapas hasta funciones de procesado complejo de la información. A continuación mostramos las funciones de análisis de la información geográfica más importantes de esta herramienta:

A.2.1 Ver valores de altura del terreno y/o de edificios

Con esta opción, se visualizarán los valores de altura del terreno y/o de los edificios en los puntos que se indiquen sobre el mapa. Dentro de estas opciones, se marcará con el ratón un punto del mapa, y tras ello la aplicación mostrará la altura del terreno en ese punto. En la figura A.2 se muestra un ejemplo.

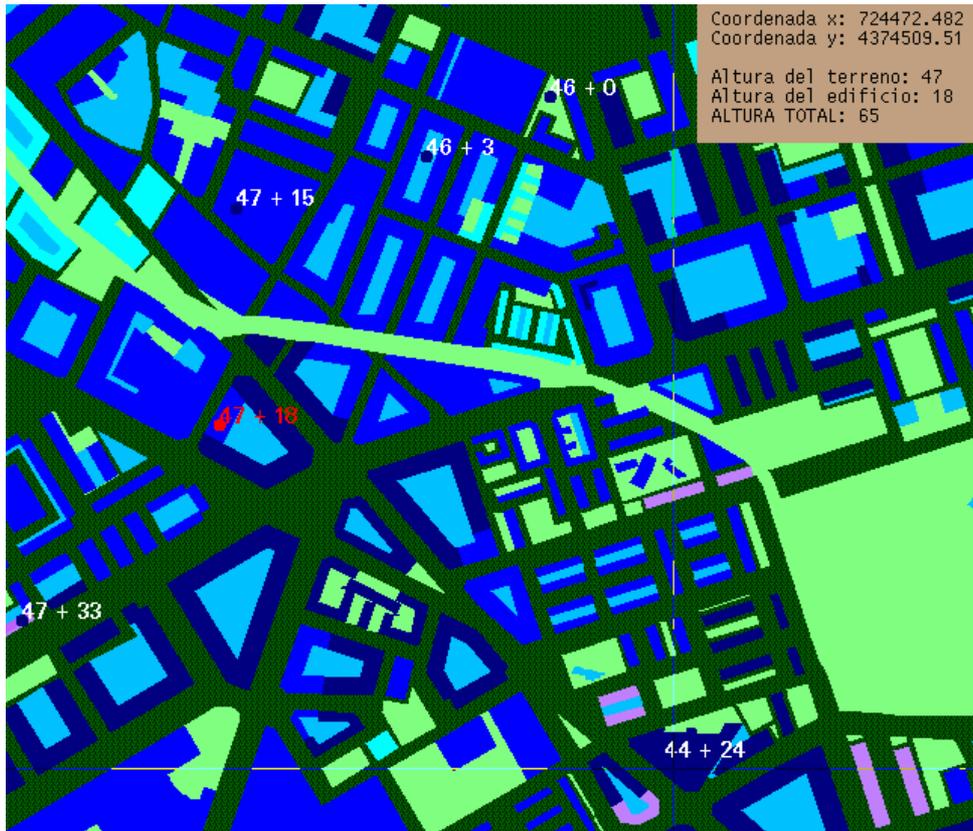


Figura A.2: Valores de altura terreno mas edificios

A.2.2 Ver valores de área

Con esta función podremos visualizar el área de los edificios seleccionados o la de las zonas delimitadas sobre el mapa. Se distinguen dos partes: una dedicada a la visualización de valores de áreas de edificios, y la otra, destinada al estudio de áreas de zonas delimitadas por el usuario.

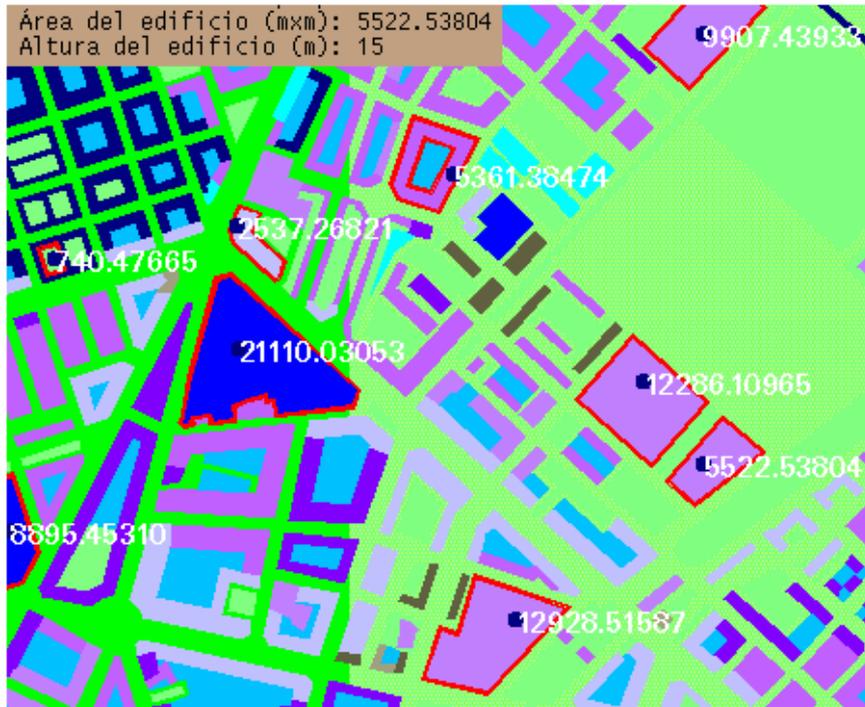


Figura A.3 : Área de edificios



Figura A.4 : Área de una zona urbana poligonal

A.2.3 Distancia entre dos puntos

El usuario, pulsando el icono de las barras de botones habilitado al efecto o entrando en esta opción, podrá en cualquier momento del desarrollo del programa, medir la distancia en planta que media entre dos puntos de cualquier mapa. Para ello, pulsará con el ratón sobre los dos puntos de interés y el programa le indicará los metros de separación entre ellos. En la figura A.5 se muestra un ejemplo de uso de esta función.



Figura A.5 : Distancia en planta entre dos puntos

A.2.4 Perfiles de altura

Mediante esta opción, se podrán levantar perfiles de altura del terreno, así como de los edificios atravesados. La sección de mapa cuyo perfil se calculará se indica marcando los puntos origen y destino de la misma. Estos, podrán ser puntos cualesquiera marcados por el usuario sobre el mapa, pero también podrán ser emplazamientos de la base de datos, elegidos desde listas desplazables que el usuario encuentra en el menú de lanzamiento de esta opción.

A.2.5 Visibilidad “line of sight”

Ésta es una función muy útil para calibrar la bondad de un emplazamiento dado en términos del grado de visión directa que tiene sobre los puntos de su entorno.

Fijado un punto de observación y una zona de análisis sobre un mapa, esta función determina para cada punto o celda de dicha zona si éste es visible o no directamente por el observador. Se generará así un mapa de salida en el que cada celda del mismo tendrá uno de los dos valores, visible o ‘no visible’, en función de si el camino directo (línea recta) entre el observador y la celda se encuentra totalmente libre o por contra existe obstrucción.

A.2.6 Vistas 3D

Con esta opción se pueden levantar vistas 3D de de los mapas implicados en la zona indicada por el usuario.

Los parámetros que hay que introducir para llevar a cabo la vista 3D son los siguientes:

- Zona de análisis: Se marca la zona rectangular sobre la que se levantará la vista.
- Posición del observador: Se indican las coordenadas UTM que determinan la posición del observador.
- Altura sobre el suelo: Se indican los metros sobre el suelo a los que se sitúa el observador.
- Dirección hacia la que mira el observador: Se indica marcando un punto de la trayectoria hacia la que mira el observador.
- Altura del punto hacia el que mira el observador: Esto indicará la dirección en la vertical hacia la que mira el observador.
- Ángulo izquierda: Indica el ángulo máximo en acimut por la izquierda desde la dirección a la que mira el observador que va a tomarse para el cálculo.

- Ángulo derecha: Indica el ángulo máximo en acimut por la derecha desde la dirección a la que mira el observador que va a tomarse para el cálculo.
- Distancia mínima: Distancia desde el observador a partir de la cual se va a representar la vista.
- Distancia máxima: Distancia desde el observador hasta la cual se va a representar la vista. Más allá de esta distancia no se realizará la vista 3D.
- Resolución de la representación: Indica el tamaño de celda para la información matricial manejada. Según el tamaño de la zona de estudio tomada y en función de la presencia o no de edificios será recomendable tomar un valor mayor o menor para este parámetro.

La figura A.6 muestra un ejemplo de vista 3D en entorno urbano con un mapa de cobertura de potencia representado en rampa de colores desde blanco hasta rojo sobre la información geográfica.

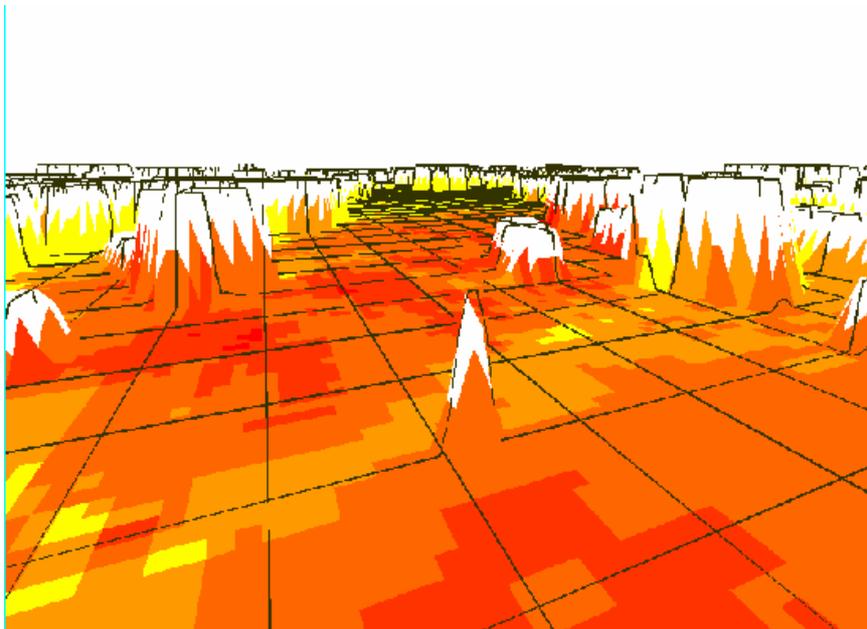


Figura A.6 : Vista 3D en entorno urbano con una cobertura de potencia

A.3 Funciones de análisis de la información radioeléctrica

La información radioeléctrica básica que gestiona DC-CELL se almacenan en formato matricial. Esta información consiste en mapas de cobertura (potencia recibida), mapas de tasas de error, mapas de mejor enlace mapas de interferencias, etc. Estos mapas pueden tener varias resoluciones, a elección del usuario. Para que DC-CELL pueda calcular estos mapas, el usuario debe introducir datos como la posición del transmisor, la potencia recibida, el tipo de antena, etc.

A.3.1 Cálculo de coberturas

El cálculo básico que realiza DC-CELL es el cálculo de mapas de cobertura para estaciones base dadas. Los resultados de este cálculo son mapas de potencia recibida que luego se pueden usar para realizar cálculos más avanzados: interferencias, tasas de error, planificación de sistemas celulares, ...etc. Los cálculos de celdas pueden realizarse bien a través de una serie de menús que sirven de interfaz y guía al usuario para que vaya realizando los pasos necesarios, o bien desde el menú central de la base de datos de celdas. En cualquier caso, se procederá a especificar todos los parámetros que definen a una celda y, tras ello, se procederá al cálculo del *grid* de cobertura de potencia.

En la entrada guiada de parámetros, se habilita un primer menú para la entrada de los datos geográficos de la celda. Este menú se representará junto con los mapas *raster* y vectoriales correspondientes, para que sobre ellos se puedan indicar posiciones geográficas.

El usuario seleccionará el *site* de la celda de entre los existentes a través de una lista desplazable, o bien creará un *site* nuevo para la celda, proceso para el cual se habilitará otro menú, sobre el que indicará todos los datos del nuevo *site*. La posición del *site* se podrá indicar tecleando sus coordenadas UTM. manualmente o marcándola sobre el mapa con el ratón.

Después de proporcionar al programa la ubicación del transmisor y su zona de cobertura, DC-CELL requiere información acerca de diversos parámetros radioeléctricos: EIRP, Frecuencia de la portadora en MHz, Altura de la antena transmisora, altura del receptor y el método de cálculo donde se estima las pérdidas

de propagación a partir de modelos de propagaciones incorporados en la herramienta como por ejemplo el modelo de Okumura-Hata, el modelo del COST 231, el modelo de Walfisch y Bertoni, etc.

A.3.2 Cálculo de mapas de interferencias

El estudio de la relación C/I proporciona al usuario la posibilidad de analizar cómo se comporta el nivel de interferencias cuando a varios sectores de las asigna el mismo radiocanal, o bien radiocanales adyacentes, para poder así estudiar la visibilidad de un plan de frecuencia dado. Los cálculos de interferencias se llevan a cabo a partir de mapas de cobertura ya calculados.

A.3.3 Cálculo de BER

La tasa de error binaria se calcula en esta opción a partir del *grid* de cobertura de potencia de una celda y una serie de parámetros proporcionados por el usuario: ganancia del receptor, velocidad binaria, factor de ruido del receptor y el tipo de modulación.

En la siguiente figura vemos un ejemplo de mapa de BER obtenido a partir de un *grid* de potencia recibida de una celda.

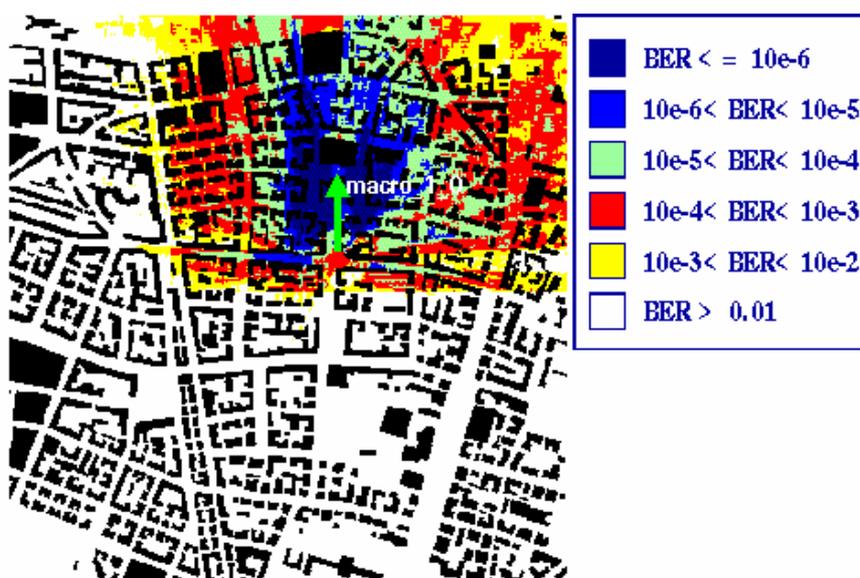
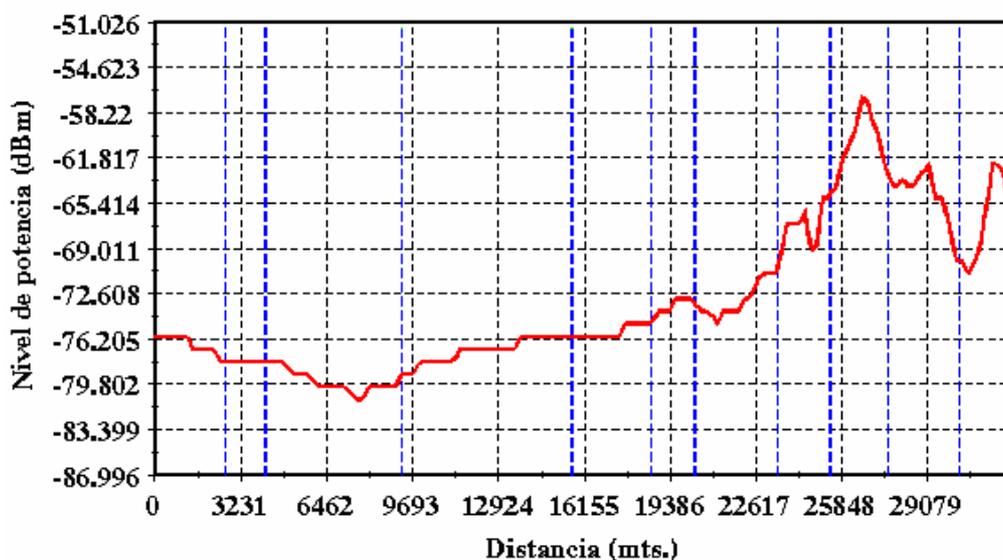


Figura A.7: Mapa de BER. asociado al grid de cobertura de una celda

A.3.4 Cálculo de Perfil de señal

Esta función permite trazar perfiles a lo largo de rutas definidas por el usuario sobre *grids* de cualquier tipo: mapas de BER, mapas de C/I, *grids* de cobertura de potencia, etc. El perfil mostrará la variación de los valores almacenados en el *grid* a lo largo de la ruta en función de la distancia recorrida.



Distancia del trayecto (mts.): 32305
 Valor máximo en el trayecto: -57.01517486572 dBm
 Valor mínimo en el trayecto: -81 dBm

Figura A.8: Perfil de señal de un *grid* de cobertura de potencia

A.3.5 Cálculo de Estadísticas

Esta función permite obtener valores estadísticos en una zona de análisis de un *grid*. Este *grid* puede ser una cobertura de potencia recibida, un mapa de BER o un mapa de C/I. Los valores estadísticos obtenidos son: la media, la desviación típica, el valor máximo y mínimo y el rango de valores. Además se proporciona el área de señal presente en la zona de análisis.

En la figura siguiente vemos un ejemplo de las estadísticas de un *grid* de potencia recibida. En este caso la zona de análisis es un polígono. A la izquierda se muestra el mapa geográfico con el *grid*, y a la derecha el menú con las estadísticas obtenidas.



Figura A.9: Estadísticas de un grid de cobertura de potencia. Zona de análisis poligonal

A.3.6 Cálculo de Mapa de Mejor Enlace

El Cálculo de este mapa indica la zona geográfica en la que cada celda del sistema es la mejor servidora. Esto quiere decir que en esa zona la potencia recibida desde esta celda es mayor que la del resto de celdas del sistema. El mapa permitirá distinguir la zona geográfica cubierta por cada celda del sistema.

En la creación de un sistema se especifica la sensibilidad, que representa el valor mínimo aceptable de potencia recibida para considerar que existe cobertura, es decir, que el receptor es capaz de captar la señal. Las zonas de este mapa donde no existe cobertura se denominan zonas de sombra, y se diferencian del resto de zonas porque no se asocian a ninguna celda del sistema.

Cada celda tiene un identificador numérico, que se utiliza en este mapa para diferenciar las zonas de mejor enlace de unas celdas asignando un color distinto a cada una de dichas zonas. La zona de sombra tendrá un identificador distinto, concretamente el número cero.

La siguiente figura muestra un mapa de mejor enlace de un sistema creado en la ciudad de Munich. Se pueden observar las diferentes zonas del mapa y las celdas a las que están asociadas. Además se puede observar la orientación de las antenas directivas de las celdas del sistema. Las antenas omnidireccionales se representan con un símbolo en forma de anillo.

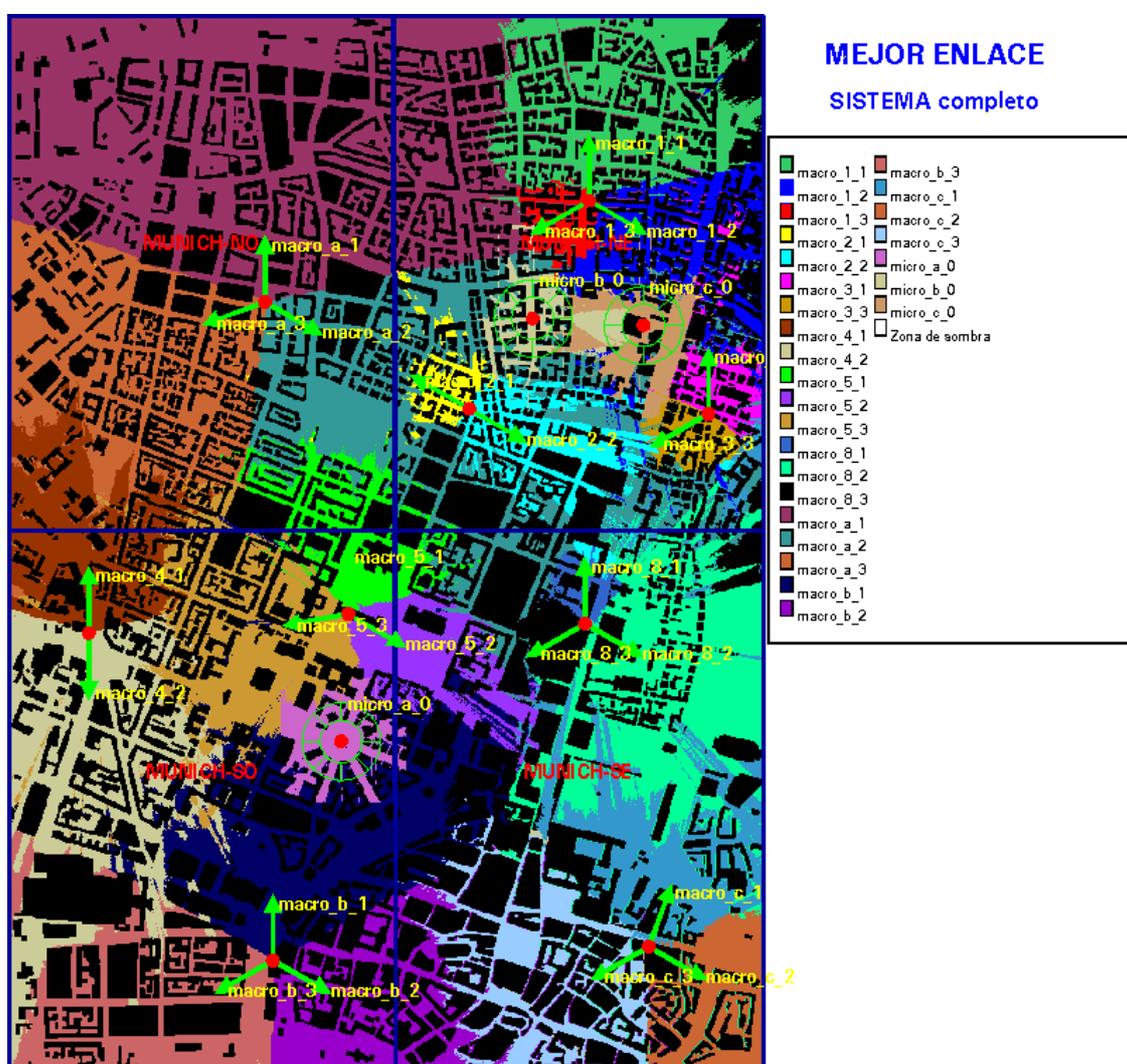


Figura A.10: Mapa de Mejor Enlace

A.4 Funciones de base de datos

DC-Cell incorpora una serie de bases de datos, relacionadas entre sí, para gestionar la información descriptiva o tabular relacionada con la planificación de sistemas móviles celulares que maneja la herramienta: datos asociados a las coberturas de potencia recibida correspondientes a las celdas, información de los emplazamientos, de los equipos transmisores, etc.

Estas bases de datos son, en general, tablas INFO con una serie de campos o *items*. Algunas de estas tablas están relacionadas entre sí, como por ejemplo la base de datos de antenas y la de celdas, puesto que cada celda tiene asociada una antena. Además, varias de las bases de datos tienen relacionado otro tipo de información, como por ejemplo la base de datos de emplazamientos, que tiene asociada una cobertura de puntos, así como la de antenas tiene un archivo con el diagrama de radiación de la misma.

A.4.1 Base de Datos de emplazamientos

Un *site* es la localización geográfica de una estación transmisora. En una localización podrá situarse una o varias celdas, como en el caso de la sectorización. Esta base de datos almacena información geográfica y tabular. En estas tablas se almacenan datos del emplazamiento, como las coordenadas UTM de su ubicación, su nombre, etc. Los emplazamientos forman una cobertura de puntos que está disponible para el usuario de DC-CELL.

A.4.2 Base de Datos de Antenas

Esta base de datos almacena todos los datos relacionados con las antenas que se van a emplear en la planificación del sistema, además de los parámetros propios de la antena, a cada antena se le asocia un diagrama de radiación, que se empleará en el cálculo de coberturas de potencia recibida realizado cuando se crea una nueva celda. Por este motivo, las bases de datos de celdas y de antenas están relacionadas entre sí. Cuando se definen los parámetros de una celda, es necesario indicar el nombre de la antena que se va a emplear en la misma. Este es el vínculo de unión entre la celda y el diagrama de radiación de la antena especificada.

El diagrama de radiación viene descrito en un archivo ASCII, que lleva el mismo nombre de la antena incluida en la base de datos, donde se indica el valor de la ganancia en dB respecto al máximo del diagrama para direcciones del espacio muestreadas a cada grado.

A.4.3 Base de Datos de Celdas

Esta base de datos es una de las que constituyen la columna vertebral de la herramienta de planificación DC-Cell, junto con la de sistemas. Se trata de una tabla INFO donde se almacenan todos los parámetros radioeléctricos necesarios para calcular la potencia recibida en la zona de cobertura de la celda, así como el emplazamiento donde se ubica, el transmisor y la antena empleados en la misma. Estos tres últimos parámetros que se incluyen en la celda son los que relacionan esta base de datos con las de emplazamientos, antenas, comentadas anteriormente. Cada celda incluida en la base de datos tiene asociada una cobertura de potencia (un *grid* con el valor de potencia recibida en cada punto)

Además, hay una serie de parámetros relacionados con el modelo de propagación escogido para calcular la cobertura de potencia de la celda. En este caso, todos los parámetros son necesarios para almacenar la celda en la base de datos, debido a que los modelos de propagación hacen uso de ellos para calcular el *grid* de potencia.

A.4.4 Base de datos de Sistemas.

Esta base de datos surge con la idea de manejar de forma eficiente y sencilla para el usuario, toda la información relativa a los sistemas de celdas. Un sistema celular almacena mucha información, en diferentes formatos: tablas Info, *grids*, coberturas vectoriales y archivos de texto en formato ASCII.

Un sistema se forma a partir de una serie de celdas de la base de datos, con la que se relaciona de forma directa. Los cálculos del sistema se basarán en los *grids* de las coberturas de potencia de las celdas seleccionadas para formar dicho sistema.

Bibliografía

- [1] H. Holma, A. Toskala: "*WCDMA for UMTS*". Wiley & Sons. 2000
- [2] Tero Ojanpera, Ramjee Prasad :"*Wideband Cdma for Third Generation Mobile Communications*" Universal Personal Communications Serie, Artech House Publishers 1998.
- [3] 3GPP TS-23.002 v. 3.1.0. Network Architecture, Release 99, 1999
- [4] 3GPP TS-22.100 v.3.4.0. UMTS Phase 1 Release 99. 1999
- [5] C.E. Shannon: "*Communication in the Presence of Noise*". Proceedings of the IRE, vol.37, nº1, Jan-1949.
- [6] B. Groe, E. Larson: "*CDMA Mobile Radio Design*". Artech House. 2000
- [7] Jhong Sam Lee, Leonard E. Miller: "*CDMA Systems Engineering Handbook*" Mobile Communications Series, Artech House Publishers 1998.
- [8] 3GPP TS-25.201v5.0.0. Physical Layer- General description (release 5). 2001
- [9] 3GPP proposals TS 25.213.V2.2.1 Spreading and modulation (FDD).
- [10] J. Montero, E. Alonso, "*Herramienta de planificación de la red UMTS*". Telefonica Móviles de España, Telefonica I+D, N. 21, Junio 2001
- [11] N. Cardona, L. Juan, R. Fraile: "*DC-CELL: Herramienta de planificación de sistemas de telefonía móvil celular en entorno urbano basado en el GIS ARC/INFO*" VI Conferencia Nacional de Usuarios de ESRI. Madrid 1997.
- [12] J. Cantalapiedra, I. Gonzales: "*DASC: Herramienta de ayoda al diseño y análisis de sistemas móviles celulares*" XIII Simposium Nacional de la USRI. pp 89-90. Pamplona. 1998

-
- [13] L. Francisco, F. Jiménez, S. Flores: "*DC-INDOOR: Simulador para la planificación de sistemas de comunicaciones móviles en entornos indoor*" XIII Simposium Nacional de la USRI. pp 89-90. Pamplona. 1998
- [14] N. Cardona, S. Flores, L. Juan, J. Reig: "*Sistemas de radio comunicaciones. Planificación mediante Sistemas de Información Geográfica*". Mundo Electrónico. N. 267. pp 47-51. 1996
- [15] Gilhousen, K., I. Jacobs, R. Padovani, A. Viterbi, C. Wheatley, III, 1991, "*On the capacity of a cellular CDMA system*", IEEE Trans. On Vehicular Technology, Vol.40, No. 2, 303-312
- [16] L. B. Milstein, T. S. Rappaport, and R. Barghouti, "*Performance evaluation for cellular CDMA*" IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 10, pp. 680–689, May 1992.
- [17] A. Jalali and P. Mermelstein, "*Effects of Diversity, Power Control and Bandwidth on the Capacity of Microcellular CDMA Systems*", IEEE J. Sel. Areas in Comm, JSAC-12, 952-961, 1994.
- [18] T. Kawahara and T. Matsumoto, "*Joint decorrelating multiuser detection and channel estimation in asynchronous CDMA mobile communications channels*". IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 44, no. 3, pp. 506–515, Aug. 1995.
- [19] A. J. Viterbi, A. M. Viterbi, and E. Zehavi, "*Performance of power-controlled wideband terrestrial digital communication*", IEEE Trans. Commun., vol. 41, pp. 559–569, Apr. 1993.
- [20] Joseph Liberti, Theodore S. Rappaport "*Smart Antennas for Wireless Communications: Is-95 & Third Generation Cdma Applications*", April, 1999
- [21] C. C. Lee, R. Steele, "*Effect of Soft and Softer Handoffs on CDMA System Capacity*", IEEE transactions on vehicular technology, vol. 47, N. 3, August 1998

-
- [22] H. Furukawa, K. Hamabe, A. Ushirokawa. "SSDT Site Selection Diversity Transmission Power Control for CDMA Forward Link", IEEE Journal on Selected Areas in Communications. Vol 18. N° 8. 2000
- [23] S. R. Saunders, "Antenas and Propagation for Wireless Communication Systems", Jhon Willy & son, Chichester, pp. 194-195, 1999
- [24] Yang X, Ghaheri-Niri S, Tafazolli R, "Downlink Soft Handover Gain in CDMA Cellular Networks with Cross-Correlated Shadowing", IEEE Vehicular Technology Fall Conference, Atlantic City, New Jersey, 7-11th October 2001
- [25] J.M. H. Rábanos, "Comunicaciones móviles". Centro de Estudios Ramón Areces, Madrid, 1997
- [26] J. Deygout, "Multiple Knife-Edge Diffraction of Microwaves", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol AP-14, n° 4, pp. 480-489, 1996.
- [27] G. Millington et al., "Double Knife Edge Diffraction in Field Strength Predictions", Proceedings of the IEE, n° 109C, pp. 419-429, 1962.
- [28] N.Cardona, "Sistemas de telefonía móvil digital G.S.M.", Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia 98.2071, 1998. Capítulo "Estructura celular".
- [29] M. Hata, "Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services", IEEE Trans. Veh. Tech., August 1980.
- [30] W. C. Lee, "Mobile Telecommunications Systems", McGraw-Hill, pp109-131, 1998
- [31] Okumura et al., "Field Strength variability in VHF and UHF land mobile service" , Rev. Elec. Comm. Lab., sep-oct 1968
- [32] M. Hata, "Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services", IEEE Trans. Veh. Tech., August 1980
- [33] J.M. Rábanos, M. Montero, F. Pérez, "Ingeniería de Sistemas Trunking", Ed. Síntesis, Madrid 1998, pp. 59-68

-
- [34] J. Walfisch and H. L. Bertoni, "*A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments*", IEEE Trans. Antennas Propagation, Vol. 36, No. 12, pp. 1788-1796, December 1988
- [35] N. Cardona, P. Möller and F. Navarro, "*Applicability of Walfisch-type urban propagation models*", COST 231. TD(94)134 Darmstadt
- [36] N. Cardona, P. Möller and F. Alonso, "*Applicability of Walfisch-type urban propagation models*", Electronic Letters, Vol. 31, No. 23, pp. 1971-1972, 9th November 1995
- [37] P. Möller, "*Urban area radio propagation measurements and comparison to a new semi-deterministic model*", Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 1994
- [38] "*Understanding GIS. The Arc/Info method*", ESRI, 1991
- [39] "*Arc/Info: Managing tabular data*", Guía de referencia de Arc/Info, ESRI, 1991
- [40] "*Arc/Info: Data Management*", Guía de referencia de Arc/Info, ESRI, 1994
- [41] "*Arc/Info: Data Model, Concepts & Key Terms*", Guía de referencia de Arc/Info, ESRI, 1991
- [42] "*Surface modelling with TIN*", Guía de referencia de Arc/Info, ESRI, 1991
- [43] "*Image integration*", Guía de referencia de Arc/Info, ESRI, 1991
- [44] "*Data Conversion*", Guía de referencia de Arc/Info, ESRI, 1991
- [45] "*Map Display & Query*", Guía de referencia de Arc/Info, ESRI, 1991
- [46] "*Arc/Info: Using Map Libraries*", Guía de referencia de Arc/Info, ESRI, 1991
- [47] "*ARC command references*", Guía de referencia de Arc/Info, ESRI, 1991
- [48] "*Cell-based modeling with Grid*", Guía de referencia de Arc/Info, ESRI, 1991

- [49] *"Editing coverages & tables with Arcedit"*, Guía de referencia de Arc/Info, ESRI, 1991
- [50] *"Info User's Guide"*, Guía de usuario de Info, Henco Software, 1991
- [51] *"AML user's guide"*, Guía de referencia de Arc/Info, ESRI, 1991.
- [52] *"AML user interface style guide"*, Guía de referencia de Arc/Info, ESRI., 1991.
- [53] H. Bühler, T. Neubauer *"RSSUS - Reference System Scenario for UMTS Simulations Based on a Real World Environment"*, COST 273 TD(02)162, Lisboa, Portugal, Septiembre 2002
- [54] 3GPP TS-30.03 v. 3.2.0. *"Selection procedures for the choice of radio transmission technologies of the UMTS"* April 1998.
- [55] UMTS Forum, Report n. 5: *"Minimum spectrum demand per public terrestrial UMTS operator in the initial phase"*, september 1998.
- [56] José María Hernando Rábanos: *"Comunicaciones móviles de tercera generación"*. Telefónica Móviles España, 2001, 2ª ed
- [57] Daniel Romero Corell *"Optimización de la capacidad de sistemas WCDMA mediante técnicas de Soft Handover"*. Departamento de Comunicaciones UPV, diciembre de 2001
- [58] Luís Ferran Bueno Pablo *"Optimización de la capacidad de sistemas WCDMA-UMTS mediante técnicas de Soft Handover y SSDT"*. Departamento de Comunicaciones UPV, diciembre de 2001

Glosario

2G	2nd Generation
3D	Three Dimensional
3G	3rd Generation
3GPP	Third Generation Partnership Project
ADRG	ARC Digitized Raster Graphics
AML	Arc Marco Language
AMPS	Advanced Mobile Phone System
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BC	Broadcast
BER	Bit Error Rate
BIL	Band Interleaved by Line by Line
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BS	Base station
BSC	Base station controller
BSQ	Band-Sequential
CAD	Computer-aided drafting
CDMA	Code Division Multiple Access
CN	Core Network
COST	European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research
CS	Circuit Switched
D-BPSK	Differential Binary Phase Shift Keying
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications
DL	Down Link

DS	Direct Sequence
DXF	Drawing Interchange Format
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
ERP	Effective Radiated Power
ESRI	Environmental Systems Research Institute
E-TACS	Extended Total Access Communication System
ETSI	European Telecommunication Standards Institute
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FER	Frame Error Rate
FH-CDMA	Frequency-Hopping spread spectrum
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GIS	Geographic Information System
GMSC	Gateway Mobile Services Switching Center
GoS	Grade of service
GPRS	General Packet Radio System
GRASS	Geographic Resources Analysis Support System
GSM	Global System for Mobile Communications
GTD	Geometric Theory of Diffraction
HIMM	High Interactive MultiMedia
HLR	Home Location Register
HMM	High MultiMedia
HSCSD	High-Speed Circuit Switched Data
IAC	Inter-application communications
IMT-2000	International Mobile Telecommunications 2000

IP	Internet Protocol
IS-136	Interim Standard 136
IS-54	Interim Standard 54
IS-95	Interim Standard 95
ISDN	Integrated Services Digital Network
ITU	International Telecommunication Union
ME	Mobile Equipment
MM	Multimedia
MSC	Mobile Switching Center
MSK	Minimum Shift Keying
NMT	Nordic (Scandinavian) Mobile Telephone system
OBQ	Offered Bit Quantity
OVSF	Orthogonal Variable Spreading Factor
PDC	Personal Digital Cellular
PS	Packet Switched
PSK	Phase Shift Keying
PSTN	Public Switched Telephone Network
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
RDB	Relational Data Base
RLC	Run-Length-Coding
RNC	Radio Network Controller
RNS	Radio Network Subsystem
SGSN	Serving GPRS Support Node
SMS	Short Message Service
SSDT	Site Selection Diversity Transmission

TDD	Time Division Duplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TIFF	Tag image file format
TIN	Triangulated irregular Network
UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UL	Up Link
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USIM	UMTS Subscriber Identity Module
UTD	Uniform Theory of Diffraction
UTM	Universal Transverse Mercator
UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Network
VAT	value attribute table
VHE	Virtual Home Environment
VLR	Visitor Location Register
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WWW	World-Wide Web