

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



Proyecto Fin de Carrera

***DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE
CÁLCULO DE MAPAS DE CAPACIDAD PARA
SISTEMAS MIMO BASADA EN EL SISTEMA DE
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA ArcView***



AUTOR: Antonio Martínez Gil
DIRECTOR: Leandro Juan Llácer
CODIRECTOR: Rubén Ibernón Fernández

Julio / 2007



Autor	Antonio Martínez Gil
E-mail del Autor	antonio.martinez.gil@gmail.com
Director	Leandro Juan Llácer
E-mail del Director	leandro.juan@upct.es
Codirector	Rubén Ibernón Fernández
E-mail del Codirector	rubenif@ono.com
Título del PFC	Desarrollo de una herramienta de cálculo de mapas de capacidad para sistemas MIMO basada en el Sistema de Información Geográfica ArcView.
<p>Resúmen</p> <p>Debido al constante aumento de la demanda de servicios móviles celulares y a la aparición de los sistemas de tercera generación, la disponibilidad de una gran capacidad de transmisión se convierte cada vez más en una necesidad vital.. Por tanto, resulta necesario analizar el canal de radiocomunicaciones no sólo para estimar las pérdidas por propagación sino para evaluar la dispersión de la señal en el tiempo y en el espacio.</p> <p>Puesto que recientemente se ha descubierto que mediante el uso de múltiples antenas en transmisión y múltiples antenas en recepción (MIMO) se pueden alcanzar grandes tasas de transferencia de información comparado con los sistemas tradicionales, resulta de gran interés el analizar el uso de estos novedosos sistemas en entornos micro-celulares y pico-celulares comunes.</p> <p>Una forma de conocer el canal de radiocomunicaciones es proponiendo modelos de propagación basados en trazado de rayos y teorías electromagnéticas de óptica geométrica, cuyos resultados deben ser validados con medidas experimentales.</p> <p>El objetivo del proyecto es la mejora y adición de nuevas funciones a un simulador de canales MIMO basado en la óptica geométrica (GO) y la Teoría Uniforme (UTD) de la Difracción, a través de su programación bajo el entorno ArcGis, de gran profusión hoy en día.</p>	
Titulación	Ingeniero de Telecomunicación
Intensificación	Sistemas y Redes de Telecomunicación
Departamento	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
Fecha de Presentación	Julio - 2007

Agradecimientos:

a mi director de proyecto por la oportunidad, a mi codirector por su constante ayuda y paciencia para resolver todo tipo de dudas, a Virginia por su apoyo en los buenos y en los malos momentos y a mi familia y amigos por estar siempre que les he necesitado.

Índice General

1. Introducción.

1.1. Introducción.

1.2. Objetivos.

1.3. Fases del Proyecto.

2. Canales Multiple-Input Multiple-Output (MIMO).

2.1. Introducción. Canal radio SISO.

2.2. Capacidad MIMO.

2.3. Definiciones.

2.3.1. *Ganancia de Array.*

2.3.2. *Ganancia de Diversidad.*

2.3.3. *Ganancia de Multiplexado Espacial.*

2.4. Técnicas MIMO.

2.5. Modelos de propagación : Trazado de rayos.

2.5.1. Trazado de rayos.

2.5.2. Óptica Geométrica y UTD.

2.5.2.1. *Óptica Geométrica.*

2.5.2.2. *Teoría Uniforma de la Difracción (UTD).*

2.5.3. Modelo Implementado.

3. Sistemas de Información Geográfica (SIG).

3.1. Introducción. Definición y fundamentos de los SIG.

3.2. Bases de datos geográficos. Modelos raster y vectorial.

3.2.1. Modelo raster.

3.2.2. Modelo vectorial.

3.3. ArcGIS. Introducción y funcionamiento.

3.3.1. Aplicaciones ArcGIS.

3.3.2. Formato 'ShapeFile' de datos geoespaciales en ArcGIS.

4. Herramienta MIMOGIS.

4.1. Modo de operación de la Herramienta. Visión Global.

4.2. Programa principal. Descripción de los menús de la barra de la herramienta.

4.2.1. Menú Cálculos MIMO.

4.2.2. Menú 'Base de Datos'.

4.2.3. Menú 'Pantalla'.

4.2.4. Comando 'Ubicación de...'

4.2.5. Menú 'Ayuda'.

4.3. Descripción de los formularios

4.3.1. Formularios de las simulaciones de cálculo de capacidad.

4.3.2. Formulario del cálculo de sistemas.

4.3.3. Formularios de Bases de datos.

4.3.4. Formulario del comando 'Ubicación de...'.

4.4. Trazador de rayos.

4.4.1. Características principales del trazador utilizado.

4.4.2. Entrada de datos.

4.4.2.1. Fichero de entrada *parametos.txt*.

4.4.2.2. Fichero de entrada *postx.txt*.

4.4.2.3. Fichero de entrada *posrx.txt*.

4.4.2.4. Fichero de entrada *matriz.txt*.

4.4.2.5. Fichero de entrada *puntos.txt*.

4.4.3. Salida de datos.

4.5. Cálculo de la capacidad MIMO.

4.5.1. Programa "MIMOCAP".

4.5.2. Programa "MIMOCAP2"

4.5.3. Programa "SISO2MIMOCAP".

4.6. Proceso de Simulación paso a paso.

4.6.1. Nueva Simulación en recorrido lineal.

4.6.2. Nueva simulación en zona.

4.6.3. Nueva Simulación siso2mimo.

4.6.4. Cálculo de sistema.

4.6.5. Crear Resultados de Simulación normal y Siso2mimo.

4.7. Directorios.

5. Resultados.

5.1. Simulación de un Recorrido Lineal.

5.2. Simulación de una Zona.

5.3. Simulación siso2mimo.

5.4. Sistema.

6. Conclusiones.

7. Referencias.

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN



1.1. Introducción.

El presente proyecto ha sido desarrollado en el departamento de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones para el grupo de investigación SiCoMo (Sistemas de Comunicaciones Móviles) perteneciente a la Universidad Politécnica de Cartagena. Las líneas de investigación de este grupo se centran en la modelización del canal radio para comunicaciones móviles.

Se sabe que en los últimos años ha aumentado considerablemente la demanda del espectro radioeléctrico, y más concretamente en la telefonía móvil. Los usuarios piden una mejor cobertura y servicios de alta capacidad. Esto ha impulsado el desarrollo de nuevos sistemas de telefonía móvil, como UMTS, así como aplicaciones de simulación del canal radio con el fin de poder realizar una planificación eficiente por los operadores.

Este aumento de usuarios ha provocado también técnicas de aumento de capacidad en sistemas celulares, apareciendo de esta forma el concepto de microceldas y picoceldas. Estas nuevas celdas consisten en pequeñas antenas de baja potencia situadas por debajo de la altura de los edificios, aumentando de esta forma la capacidad del sistema sin aumentar la interferencia co-canal. El análisis en estos entornos es más complejo que en entornos rurales y urbanos, ya que las señales se propagan por las calles con un efecto de guiado, sin tener en cuenta ahora la propagación sobre los edificios. En estos entornos no sólo es importante el análisis de las pérdidas sufridas por la señal, sino también su dispersión, ya que en estos escenarios el número de contribuciones es muy grande debido a que son importantes los fenómenos de difracción en esquinas y reflexiones en paredes.

El problema que surge en la nueva era de la comunicación es la saturación del espectro radioeléctrico. En estos últimos años, a partir de trabajos realizados por Foschini [4] y Telatar [5], se sabe que aumentando el número de antenas en recepción y en transmisión se puede aumentar la eficiencia espectral en términos de bps/Hz. Es así como surgen los sistemas MIMO (Multiple-Input Multiple-Output).

El análisis del canal radio en los sistemas MIMO es esencial para comprender y analizar el diseño de estos sistemas. Existen investigaciones que se centran en modelos estocásticos que reconstruyen la matriz MIMO estadísticamente, pero resulta conveniente analizar la dispersión que sufren las señales, ya que es en un entorno dispersivo donde la capacidad MIMO va a ser máxima, pudiendo demodular de forma correcta los datos enviados por el receptor.

Otros modelos alternativos son los deterministas, basados en la transmisión multicamino, que hacen uso de técnicas para la simplificación del cálculo de los campos electromagnéticos, donde la reconstrucción de la matriz es más exacta, pudiendo obtener también perfiles de retardo, con el fin de analizar la dispersión en el entorno microcelular, tan importante para los sistemas MIMO.

Por otro lado, es en entornos microcelulares donde existe una gran dispersión y donde es más difícil predecir la respuesta del canal, por lo que se usan teorías electromagnéticas como el trazado de rayos, que hace uso de la Óptica Geométrica y Teoría Uniforme de la Difracción. A pesar de estas simplificaciones, el coste computacional que lleva asociado el cálculo de una matriz de transmisión para canales MIMO es muy grande, multiplicándose por el número de elementos transmisores y receptores respecto a una simulación SISO. Esto ha provocado que surjan modelos que tratan de recomponer la matriz de transmisión MIMO a partir de los resultados de una simulación SISO, ahorrando así gran parte del coste computacional.

De esta manera, a partir de trabajos realizados anteriormente sobre estudios de técnicas de modelización del canal por medio de trazado de rayos basados en Óptica Geométrica y Teoría Uniforme de la Difracción, surge la idea que embarca a este proyecto, con el fin de poder analizar canales MIMO en entornos microcelulares de forma sencilla y con bajo coste computacional, siendo el principio de una posible herramienta de planificación para estos sistemas en investigación.



1.2. Objetivos.

Este proyecto ha tenido como objetivo la programación de una ampliación de la funcionalidad de la herramienta MIMOGIS que calcula la capacidad que existe en un lugar de un entorno microcelular y picocelular de forma determinista, basándose en una aplicación que realiza un lanzamiento de rayos según la Óptica Geométrica y la Teoría Uniforme de la Difracción.

En concreto, esta adición de funcionalidades consiste en dotar a la herramienta de un manejo más ágil y rápido de los datos de las simulaciones realizadas para facilitar la visualización de los resultados, para lo que se han implementado funciones que permiten abrir, cerrar, copiar y eliminar estos datos, así como un renovado sistema de directorios. Además se ha dotado a la herramienta de la capacidad de realizar cálculos de optimización de resultados a partir de simulaciones existentes, lo que resulta muy útil en la planificación de redes. Finalmente se ha refinado la interfaz de usuario para que sea más sencilla e intuitiva para el usuario no iniciado.

El entorno de programación escogido ha sido ArcGIS, dadas las ventajas de los Sistemas de Información Geográficos, como la rápida representación y la fácil georreferenciación.

La herramienta es capaz de calcular la variación de la capacidad en sobre un posible recorrido del receptor, e incluso sobre un área del entorno microcelular y picocelular, quedando representado por pantalla la capacidad en función de la posición del receptor en ese entorno concreto.

Es posible cargar cualquier entorno microcelular y pico celular, pudiendo tener una visión general del mismo por medio de ArcView, y de esta forma elegir la posición de los arrays transmisores y receptores de forma visual, o incluso introduciendo las coordenadas UTM del emplazamiento.

También es capaz de analizar la dispersión sufrida por la señal para un receptor en concreto, obteniendo el perfil de retardo y los ángulos de llegada de las distintas contribuciones.

Finalmente, es posible también realizar cálculos de optimización de resultados a partir de simulaciones existentes con el fin de obtener la mejor capacidad en un área determinada.

1.3. Fases del Proyecto.

Se ha desarrollado según el siguiente calendario:

- Noviembre: Documentación sobre GO y UTD. Toma de contacto con ArcGis.
- Diciembre-Marzo: Programación de la herramienta
- Abril-Mayo: Simulación de algunos entornos microcelulares.
- Junio-Julio: Documentación lectura del proyecto.

Capítulo 2. CANALES MÚLTIPLE-INPUT MÚLTIPLE-OUTPUT (MIMO)

2.1. Introducción. Canal radio SISO.

Desde principios de los años 90 las tecnologías de la información y las telecomunicaciones han experimentado un aumento exponencial de su uso y aplicaciones. Los nuevos sistemas que aparecen continuamente asociados a este crecimiento, requieren cada vez más una mayor capacidad de transmisión de datos a la par que una alta eficiencia espectral. Es por este motivo que se ha promovido el estudio de sistemas con múltiples antenas, ya que este aumento de capacidad es inasequible con los sistemas tradicionales de una sola antena, también conocidos como sistemas SISO (Single Input – Single Output). Para una sistema SISO sin memoria, la capacidad máxima alcanzable viene dada por la expresión :

$$C_{SISO} = \log_2 \left(1 + \rho |h|^2 \right) \text{ bps/Hz} \quad (2.1)$$

donde h es la respuesta compleja normalizada del canal y ρ es la relación señal a ruido (SNR) en el receptor.

Con el fin de dotar de diversidad en transmisión o recepción a esta configuración se puede aumentar el número de antenas transmisoras o receptoras respectivamente, aunque esta modificación no servirá para aumentar la capacidad del sistema.

Si se modifica, por ejemplo, el número de antenas transmisoras (sistema Múltiple-Input Single-Output), tendríamos una configuración como la de la figura 2.1 son una capacidad que vendría dada por la expresión (2.2) :

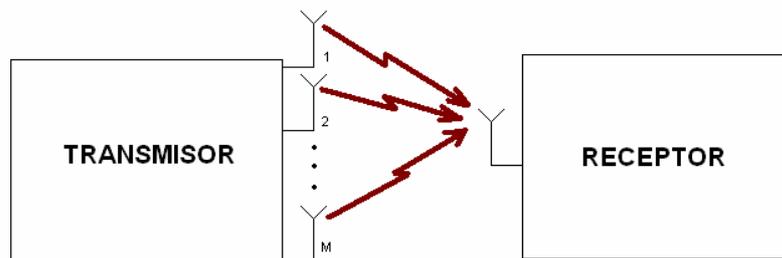


Figura 2.1.-Esquema simple de un sistema MISO(Multiple-Input Single-Output).

$$C_{MISO} = \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{M} \sum_{i=1}^M |h_i|^2 \right) \text{ bps/Hz.} \quad (2.2)$$

donde M es el número de antenas transmisoras y h_i es la respuesta normalizada del canal cuando se transmite por la antena i -ésima. La normalización de la relación señal a ruido con el número de antenas se debe a la restricción de que la potencia total transmitida debe ser constante para que todos los casos sean comparables, es decir, que la suma de las potencias de cada antenas transmisoras es constante y de valor P_T .

En el caso de que se aumente el número de antenas en recepción (Single-Input Multiple-Output (SIMO)), consiguiendo diversidad en recepción, cuya configuración se muestra en la figura 2.2, la capacidad máxima viene dada en este caso por [3]:

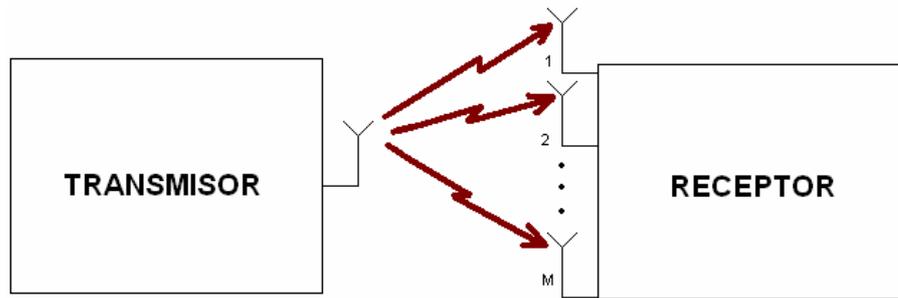


Figura 2.2.- Esquema simple de un sistema SIMO (Single-Input Multiple-Output).

$$C_{SIMO} = \log_2 \left(1 + \rho \sum_{i=1}^N |h_i|^2 \right) \text{ bps/Hz. (2.3)}$$

Donde N es el número de antenas receptoras y h_i es la respuesta compleja normalizada del canal cuando se recibe por la antena i -ésima. Se puede observar a partir de la expresión 2.2 que el aumento de la capacidad en sistemas SIMO tiene un aumento logarítmico con el número de antenas en recepción, similar a un aumento de ρ .

A partir de los trabajos realizados por Foschini [4] y Telatar [5], se sabe que aumentando el número de antenas, tanto en el transmisor como en el receptor, se puede aumentar la eficiencia espectral en términos de bps/Hz, y por tanto aumentar la capacidad de transmisión de datos sin aumentar el ancho de banda. Se hace uso de la diversidad espacial tanto en transmisión como en recepción, creándose varios canales paralelos (*spatial multiplexing*). El aumento de la capacidad espectral está asociado a la riqueza de la dispersión del entorno, permitiendo que la información se transmita por diferentes canales, con lo cual, un requisito para que se pueda procesar la información en el receptor y conseguir que se pueda aumentar enormemente la capacidad es que el canal tenga una alta dispersión. Suponiendo M antenas en el transmisor y N en el receptor, se puede llegar a capacidades del orden del mínimo entre M y N . Estos sistemas toman el nombre de Multiple-Input Multiple-Output (MIMO).

2.2.- Capacidad MIMO.

En un sistema MIMO con M antenas en transmisión y N en recepción la señal recibida se puede expresar de la forma:

$$r = G \cdot s + n \quad (2.4)$$

Donde r es un vector complejo de dimensiones $N \times 1$ que representa la señal recibida en cada una de las N antenas receptoras, G es una matriz de dimensiones $N \times M$, donde cada elemento G_{ij} es la respuesta del canal cuando transmite la antena j y recibe la antena i , s es un vector $M \times 1$ que representa las señales transmitidas por las M antenas transmisoras y n es un vector de ruido de las mismas dimensiones que r . La capacidad máxima viene dada por [4]:

$$C_{MIMO} = \log_2 \left(I_N + \frac{\rho}{M} H H^* \right) \text{ bps/Hz} \quad (2.5)$$

Donde H^* representa a la matriz transpuesto-conjugado de H (matriz G normalizada), I_N es la matriz identidad de dimensiones $N \times N$. La normalización de la matriz G se realiza de forma que el valor medio de $|H_{ij}|$ sea 1, es decir, $E \langle |H_{ij}| \rangle = 1$. Esta normalización también puede llevarse a cabo mediante la norma de Frobenius, definida de la siguiente manera:



$$H = \frac{G}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |G_{ij}|^2}{NM}}} \quad (2.6)$$

De forma que $E \left\langle \left\| H_{ij} \right\|_F^2 \right\rangle = NM$ [6]. Para que la demodulación se pueda llevar a cabo en el receptor es necesario que éste conozca la matriz H .

Se suele utilizar la descomposición en valores singulares de la matriz H para simplificar el sistema en m subcanales independientes, donde m es el mínimo de M y N , a los que se aplicará la capacidad de Shannon. La potencia de estos subcanales es dada por los valores propios de la matriz $H^H \cdot H$ (λ_i). De esta manera la expresión (2.6) para el cálculo de la capacidad se puede describir de la forma [5]:

$$C_{MIMO} = \sum_{i=1}^m \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{N} \lambda_i \right) \text{ bps/Hz.} \quad (2.7)$$

Para el cálculo de la capacidad máxima se ha utilizado, en este proyecto, la expresión 2.5, en la que se puede ver que es necesario conocer el número de elementos del transmisor y del receptor, la relación señal a ruido y la matriz de transferencia normalizada. Esta matriz se obtiene por medio de la expresión 2.6.

La matriz de transferencia G se puede obtener por medio del trazado de rayos, con lo que de esta forma se podría calcular la capacidad máxima en un punto.

Existen otras formas de normalizar las matrices de transferencia. Una de ellas es haciendo una normalización sobre todo el recorrido, en este caso la normalización se realizaría por medio de la siguiente expresión:

$$H = \frac{G}{\sqrt{\frac{\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |G_{ij}^l|^2}{NML}}} \quad (2.8)$$

Donde l representa el número de posición dentro del recorrido y L el número total de posiciones que toma el receptor.

Otra forma de normalización, que también se ha implementado para este proyecto, es mediante ventanas de matrices, es decir, la normalización se hace sobre tramos de recorrido de L posiciones. En este caso la expresión sería la siguiente:

$$H_K = \frac{G}{\sqrt{\frac{\sum_{l=K-\frac{L-1}{2}}^{K+\frac{L-1}{2}} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |G_{ij}^l|^2}{NML}}} \quad (2.9)$$

Donde L ahora sería el valor de la ventana, que tiene que tomar un valor impar, y K es el número de posición dentro del recorrido donde se quiere normalizar la matriz. En la normalización en los puntos próximos a los extremos del recorrido total se replicarán las matrices de transferencia con el fin de poder mantener el tamaño de ventana para la normalización.



2.3.- Definiciones.

2.3.1.- Ganancia de array.

La ganancia de array es el aumento de la SNR en el receptor gracias a un procesamiento de la señal en el transmisor o en el receptor, consistente en la combinación coherente de varias señales. Para poder realizar este procesamiento es necesario que el transmisor o el receptor conozcan la respuesta del canal, y dado que es más sencillo que el receptor tenga esta información, esta ganancia se suele implementar en el receptor.

2.3.2.- Ganancia de diversidad.

La diversidad consiste en obtener réplicas de la señal transmitida, de tal forma que se hayan propagado por canales independientes y sus desvanecimientos sean independientes. De esta forma se garantiza que, aunque una de ellas se desvanezca fuertemente, podamos recuperar la señal si las otras tienen un nivel suficientemente alto. Esta técnica puede emplearse en frecuencia, tiempo, espacio, polarización, etc. Se suele usar la diversidad espacial ya que no repercute en la eficiencia espectral del sistema.

2.3.3.- Ganancia de multiplexado espacial.

La ganancia de multiplexado espacial es el incremento lineal que se produce en un sistema MIMO cuando aumenta el número de antenas sin coste extra de potencia o de ancho de banda. Esta ganancia se consigue mediante la transmisión de flujos de datos independientes en cada uno de los autovalores significativos.

2.4.- Técnicas MIMO.

Las técnicas desarrolladas que aprovechan la diversidad espacial de los canales MIMO se dividen en dos grupos: *Space-Time Coding* y *Spatial-Multiplexing*.

En las técnicas *Space-Time Coding* (STC) aprovecha la diversidad espacial para disminuir la probabilidad de error manteniendo la tasa binaria [7] [8]. Las señales que se entregan a las antenas son tratadas como vectores de símbolos que representan un cierto código. El objetivo de estas técnicas es diseñar un código óptimo para que la señal sea remodulada de una forma eficiente en el receptor, y se pueda recuperar la señal con una SNR más baja. Estas técnicas se pueden dividir en dos tipos básicos :

- Space-Time Trellis Codes (STTC's). Distribuye un código convolucional^[1] entre varias antenas y varios "slots" o ventanas temporales lo que permite obtener tanto ganancia en codificación como ganancia por diversidad.
- Space-Time Block Codes (STBC's). Actúa sobre un solo bloque de datos cada vez (similar a la codificación en bloque[8]), proveyendo únicamente ganancia por diversidad, aunque su implementación es mucho menos compleja que los STTC's ya mencionados.

En la figura 2.3 se muestra el esquema de bloque de una codificación de este tipo. En la figura, cada $s(k)$ se codifica con un vector del tamaño igual al número de antenas, con el fin de que la detección en el receptor sea más eficiente.

[1] Los códigos convolucionales son un tipo de códigos de corrección de errores en los que una secuencia de información de 'm' bits se codifica como un símbolo de 'n' bits, siendo $n \geq m$, donde m/n es la tasa de codificación y la transformación se hace en función de los últimos k símbolos, donde k es la longitud media del código. Dado lo extenso de la explicación de estos códigos me remito a las referencias [7] y [8] para más información.

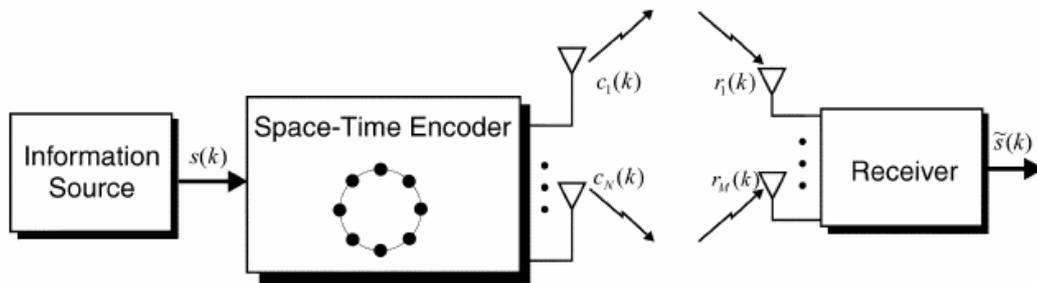


Figura 2.3. Esquema de codificación *Space-Time Coding* obtenido de [3].

Las técnicas *Spatial-Multiplexing* intentan aumentar la capacidad del canal para una SNR mediante la multiplexación espacial de la información a transmitir. El principio básico consiste en transmitir la información de forma independiente en cada antena. El receptor recupera la señal y la combina mediante procesamiento de señal. La figura 2.4 muestra como se realiza el proceso de ganancia de multiplexado mediante esta técnica.

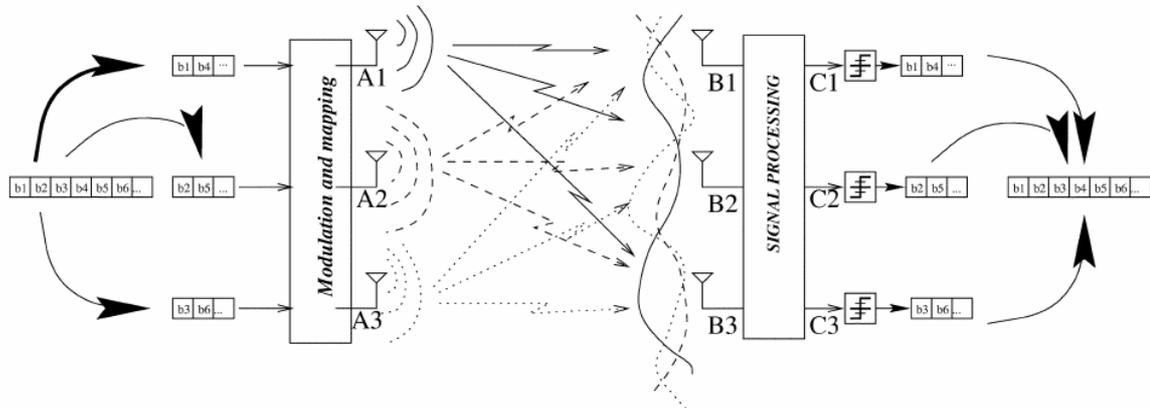


Figura 2.4. Esquema de codificación *Spatial Multiplexing* obtenido de [3].

2.5.- Modelos de propagación : Trazado de rayos.

2.5.1.-Trazado de rayos

Se trata de un modelo de propagación determinista empleado para la predicción de la respuesta del canal radio que, utilizando la Óptica Geométrica (GO) y la Teoría Uniforme de la Difracción (UTD), pretende ahorrar el gran coste computacional de la aplicación sin simplificaciones de las ecuaciones de Maxwell. Este método es válido en condiciones de frecuencia elevada y con obstáculos mayores que la longitud de onda, ya que estas circunstancias la primera zona de Fresnel, que concentra la mayor parte de la energía [9], se estrecha hasta el punto de poder ser aproximada por un rayo [10] [11]. De no ser bajo estos supuestos, los resultados de este método no serían válidos.

Los mecanismos de propagación que nos ocupan son :

- reflexión, que se da cuando una onda incide sobre superficies mayores que su longitud de onda. Este mecanismo se resuelve mediante Óptica Geométrica (GO) usando la ley de reflexión de Snell.
- difracción, que aparece cuando un rayo incide sobre una superficie con irregularidades abruptas (por ejemplo aristas), que actúan como focos de nuevos frentes de onda de acuerdo con la ley de Huygens. En nuestro caso los cálculos de difracción se realizan usando la UTD.
- difusión [12], fenómeno que ocurre cuando los obstáculos encontrados por la onda son de tamaño similar al de la longitud de onda, o cuando existe gran cantidad de obstáculos por unidad de volumen. Dado su bajo valor respecto a las otras



contribuciones, no se tiene en cuenta en comunicaciones móviles, por lo que no se ha implementado en el método de trazado de rayos.

El trazador de rayos usado en este proyecto realiza un trazado de rayos que consiste en el lanzamiento de rayos con una separación angular constante desde un transmisor, haciendo un seguimiento de cada rayo y teniendo en cuenta los mecanismos de propagación más importantes, la reflexión, la difracción y la transmisión de la onda al incidir sobre una superficie de separación de dos medios, quedando registradas las contribuciones que han impactado en el receptor, pudiendo calcular a partir de éstas el campo eléctrico total en dicho receptor.

2.5.2.- Óptica Geométrica y UTD

2.5.2.1.- Óptica Geométrica.

Como se ha mencionado en el apartado anterior, nos encontramos bajo el supuesto de altas frecuencias para poder hacer la aproximación de ondas esféricas [13] a rayos. Así pues, mediante la ley de reflexión de Snell y multiplicando por un factor dependiente de la polarización dependiente de la polarización (*soft* o *hard*) y de la orientación de las antenas, podremos calcular los rayos correspondientes a cada una de las contribuciones principales, a saber: rayo incidente, reflejado y transmitido (o refractado). El cálculo de los campos debidos a estas contribuciones se expone a continuación.

1. Rayo directo: sufren únicamente la atenuación con la distancia debida a su naturaleza de onda esférica. Se da en situaciones en las que existe visión directa entre el transmisor y el receptor, siendo la expresión del campo electromagnético:

$$E_d = E_0 \frac{e^{jkr_d}}{r_d} \quad (2.10)$$

donde E_0 es la amplitud de la onda esférica radiada, r es la distancia entre el transmisor y el receptor y k es el número de onda ($k=2\pi/\lambda$, donde λ es la longitud de onda). La expresión corresponde al campo producido por una onda esférica, en la que se puede observar que la amplitud se atenúa inversamente con la distancia recorrida y el exponente indica la fase de la onda, que también depende de la distancia. Para calcular la fase en el dominio del tiempo, en el caso de hablar de una variación sinusoidal, se añade a la expresión (2.10) el término $e^{-j\omega t}$ ($\omega=2\pi f$, donde f es la frecuencia) obteniendo así el campo instantáneo. Estas mismas consideraciones se pueden tener para el resto de contribuciones

2. Rayo reflejado: se calcula la contribución de un rayo reflejado de forma especular, por la incidencia de un rayo sobre la superficie de separación de dos medios con distintos coeficientes de refracción (n_1 y n_2), mediante la ley de reflexión de Snell:

$$n_1 \sin(\psi_i) = n_2 \sin(\psi_r) \quad (2.11)$$

donde ψ_i es el ángulo de incidencia que es igual al de reflexión ($\psi_r = \psi_i = \psi$) y ψ_t es el ángulo del rayo transmitido al medio 2.

El coeficiente de reflexión (R) relaciona la onda reflejada con la onda incidente, definido aquel a partir de las características eléctricas de la superficie de reflexión (permitividad y conductividad), la polarización de la onda incidente (*soft* o *hard*), el ángulo de incidencia y la frecuencia de la onda. Para su es necesario definir las propiedades



electromagnéticas de la superficie, caracterizadas por la constante dieléctrica compleja relativa:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j60\lambda\sigma \quad (2.12)$$

El coeficiente de reflexión se calcula de distintas maneras en función de la polarización de la onda incidente:

- Polarización Soft : es la polarización horizontal o TE (cuando el vector de campo eléctrico es paralelo al suelo y perpendicular al plano de incidencia). En este caso el coeficiente de reflexión toma el valor:

$$R_{\perp}(\psi) = \frac{\text{sen}(\psi) - \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2(\psi)}}{\text{sen}(\psi) + \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2(\psi)}} \quad (2.13)$$

- Polarización Hard : es la polarización vertical o TM (cuando el vector de campo eléctrico es perpendicular al suelo y está contenido en el plano de incidencia). En este caso el coeficiente de reflexión se calcula por medio de la relación:

$$R_{\parallel}(\psi) = \frac{\varepsilon_r \text{sen}(\psi) - \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2(\psi)}}{\varepsilon_r \text{sen}(\psi) + \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2(\psi)}} \quad (2.14)$$

- En el caso de la polarización mixta, se deberá descomponer el campo incidente en una componente soft y otra hard, pudiendo utilizar los coeficientes definidos para cada una de estas polarizaciones y sumarlas vectorialmente, obteniendo el coeficiente de reflexión para la polarización inicial.

A partir de este coeficiente, el campo eléctrico de una de estas contribuciones se calcula por medio de la expresión:

$$E_R = E_0 R \frac{e^{jk r_r}}{r_r} \quad (2.15)$$

En el caso de que hubieran múltiples reflexiones, el coeficiente total sería el producto de los coeficientes de cada una de las reflexiones calculados individualmente:

$$R = \prod_i R_i \quad (2.16)$$

3. Rayo transmitido : en este caso también es válida la ley de Snell. Bajo el supuesto de que el material antes y después de la superficie de separación (pared) sea el mismo y que el grosor de la pared sea nulo, podemos asumir que el ángulo de incidencia es igual al de transmisión ($\psi_i = \psi_T$).

Se mantienen, las mismas consideraciones sobre la permitividad del medio que se han comentado en el rayo reflejado. Así por tanto, según el tipo de polarización de la onda tenemos un valor de coeficiente de transmisión:

- Polarización *soft*:

$$T_{\perp} = \frac{2\text{sen}(\psi)}{\text{sen}(\psi) + \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2(\psi)}} \quad (2.17)$$

- Polarización *hard*:

$$T_{\parallel} = \frac{2\text{sen}(\psi)}{\varepsilon_r \text{sen}(\psi) + \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2(\psi)}} \quad (2.18)$$

- En el caso de que la polarización sea mixta se deberá descomponer el campo incidente en una componente *soft* y otra *hard*, pudiendo utilizar los coeficientes



definidos para cada una de estas polarizaciones y sumarlas vectorialmente, obteniendo el coeficiente de transmisión para la polarización inicial.

Una vez obtenido el coeficiente de transmisión, el campo eléctrico asociado a una de estas contribuciones se obtiene por medio de la siguiente expresión:

$$E_T = E_0 T \frac{e^{jkr_t}}{r_t} \quad (2.19)$$

En el caso de que se produjeran múltiples transmisiones de una onda, el coeficiente de transmisión total para esa onda se calcula como el producto de todos los coeficientes calculados individualmente en cada transmisión:

$$T = \prod_i T_i \quad (2.20)$$

2.5.2.2.-Teoría Uniforme de la Difracción (UTD).

Aplica el principio de Huygens, por el que cada cuña que se encuentra en su camino una onda electromagnética se comporta como un nuevo foco emisor, lo que es particularmente importante en las zonas de sombra, ya que este fenómeno de difracción crea campos importantes a tener en cuenta en entornos microcelulares.

Existen varias maneras de modelar la difracción. Si la onda que incide sobre la cuña es de una frecuencia elevada se puede usar un modelo similar al usado cuando se produce una reflexión, donde las nuevas ondas dependen sólo de la geometría del objeto, de la amplitud, fase, polarización y frecuencia de la onda incidente. En este hecho es en el que se basa la UTD [13].

Para expresar el campo difractado se definen dos sistemas de coordenadas, como se puede observar en la figura 2.4: (s', β_0', ϕ') respecto al rayo incidente desde la fuente en el punto de difracción Q_D y (s, β_0, ϕ) respecto al rayo difractado desde Q_D hasta el punto de observación.

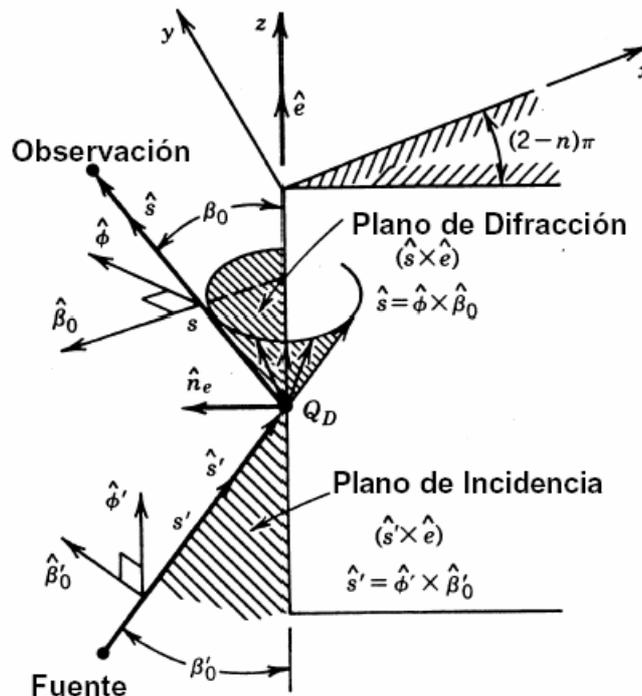


Figura 2.4: Incidencia oblicua sobre una cuña de paredes conductoras [13]



La contribución de un rayo difractado que llega al receptor y no se ve afectado por ningún otro mecanismo de propagación se puede expresar de la siguiente manera:

$$E_D = \frac{E_0}{s'} DA(s, s') e^{-jk(s+s')} \quad (2.21)$$

Donde s es la distancia que recorre el rayo antes de alcanzar el punto de difracción, s' es la distancia recorrida tras alcanzar el punto de difracción, $D = D(n, \beta_0', \varphi', \varphi, L)$ es el coeficiente diádico de difracción que además de los parámetros indicados (L es un parámetro de distancia; n, β_0', φ' y φ aparecen en la figura 2.4) también depende del tipo de polarización y es explicado más adelante en este mismo apartado. Finalmente, $A(s, s')$ es una función que toma una determinada forma dependiendo del tipo de onda (esférica, cilíndrica o plana) y representa la atenuación del campo difractado con la distancia, recibiendo el nombre de *Spread Factor*. Como nuestro caso es el de ondas esféricas, toma el siguiente valor:

$$A(s, s') = \sqrt{\frac{s'}{s(s'+s)}} \quad (2.22)$$

Cuando un rayo incide sobre una arista se producen múltiples rayos difractados (figura 2.4), cada uno de los cuales lleva asociado un campo, expresado por la Ec. 2.21. Según la *Ley de Séller* sobre la difracción, el ángulo con que son difractados estos rayos, β_0 , coincide con el ángulo de incidencia sobre la arista del rayo original, β_0' en la figura. Es decir, $\beta_0 = \beta_0'$, hecho que es similar al de la Ley de Snell de la reflexión, y es de gran importancia para prever la dirección en la que se propagarán los rayos difractados.

A la hora de calcular las contribuciones de los rayos difractados, existen tres regiones de transición cuyas fronteras dependen de la posición de fuente (ρ', ϕ'), del punto de observación (ρ, ϕ) y de la posición de la cuña (Fig. 3.2).

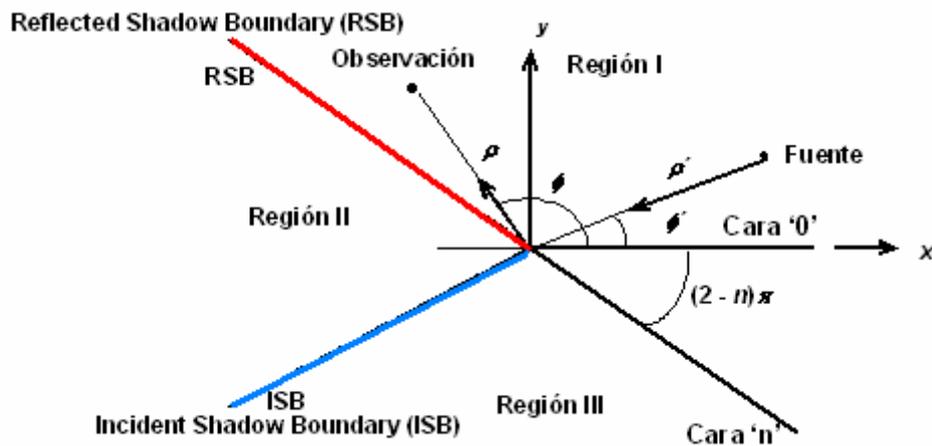


Figura 2.5: Regiones de transición y sistema de coordenadas para la cuña

Región I	Región II	Región III
$0 < \phi < \pi - \phi'$	$\pi - \phi' < \phi < \pi + \phi'$	$\pi + \phi' < \phi < n\pi$
directo reflejado difractado	Directo difractado	difractado

Tabla 2.1. Regiones frontera de la difracción y las contribuciones asociadas a cada una de ellas.



Finalmente, para terminar de explicar completamente la expresión 2.21, vamos a abordar la explicación del coeficiente Diádico de Difracción “ D ”. Siguiendo la geometría de la Fig. 2.4, $\hat{\beta}'_0$ y $\hat{\phi}'$ son dos vectores unitarios paralelo y perpendicular al plano de incidencia (definido por la fuente y la arista de la cuña) y $\hat{\beta}_0$ y $\hat{\phi}$ son dos vectores unitarios paralelo y perpendicular al plano de difracción (definido por el punto de observación y la arista de la cuña). Además, estos vectores junto con los vectores \hat{s}' y \hat{s} cumplen la siguiente relación:

$$\hat{s}' = \hat{\phi}' \times \hat{\beta}'_0 \quad (3.10)$$

$$\hat{s} = \hat{\phi} \times \hat{\beta}_0 \quad (3.11)$$

El coeficiente \bar{D} adopta la siguiente expresión:

$$\bar{D} = -\hat{\beta}'_0 \hat{\beta}_0 D_s - \hat{\phi}' \hat{\phi} D_h \quad (3.12)$$

Donde D_s y D_h son los coeficientes de difracción para el caso de polarización tipo *soft* o polarización tipo *hard* respectivamente que son definidos más adelante. Si se descomponen los campos en su componente paralela y perpendicular a los planos de difracción e incidencia queda

$$\left. \begin{aligned} \bar{E}^i &= E_{\beta'_0}^i \hat{\beta}'_0 + E_{\phi'}^i \hat{\phi}' \\ \bar{E}^d &= E_{\beta_0}^d \hat{\beta}_0 + E_{\phi}^d \hat{\phi} \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

Que permite escribir en forma matricial

$$\begin{bmatrix} E_{\beta'_0}^d(s) \\ E_{\phi}^d(s) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} D_s & 0 \\ 0 & D_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\beta'_0}^i(Q_D) \\ E_{\phi'}^i(Q_D) \end{bmatrix} A(s', s) \exp(-jks) \quad (3.14)$$

Los coeficientes de Difracción se definen de la siguiente forma:

$$\left. \begin{aligned} D_s &= D^i - D^r \\ D_h &= D^i + D^r \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

Donde D^i y D^r se obtienen imponiendo condiciones de continuidad para el campo total en la *ISB* y la *RSB* respectivamente. Las expresiones de estos coeficientes son las siguientes:

$$D^i = \frac{-\exp(-j\pi/4)}{2n\sqrt{2\pi k} \sin \beta_0} \left\{ \cot \left[\frac{\pi + (\phi - \phi')}{2n} \right] F[kLa^+(\phi - \phi')] + \cot \left[\frac{\pi - (\phi - \phi')}{2n} \right] F[kLa^-(\phi - \phi')] \right\} \quad (3.16)$$

$$D^r = \frac{-\exp(-j\pi/4)}{2n\sqrt{2\pi k} \sin \beta_0} \left\{ \cot \left[\frac{\pi + (\phi + \phi')}{2n} \right] F[kLa^+(\phi + \phi')] + \cot \left[\frac{\pi - (\phi + \phi')}{2n} \right] F[kLa^-(\phi + \phi')] \right\} \quad (3.17)$$

Donde L es un parámetro de distancia que puede encontrarse satisfaciendo la condición de que el campo total debe ser continuo a lo largo de la *ISB* y de la *RSB*. Para el caso de onda plana, cilíndrica o esférica incidente en una cuña de paredes planas y arista recta se tiene:



$$L = \begin{cases} \frac{s \operatorname{sen}^2 \beta_0}{s' + s} & \text{onda plana} \\ \frac{s' s \operatorname{sen} \beta_0}{s' + s} & \text{onda cilíndrica} \\ \frac{s' s \operatorname{sen}^2 \beta_0}{s' + s} & \text{onda esférica} \end{cases} \quad (3.18)$$

La función $F(x)$ recibe el nombre de Función de Transición de Fresnel y se define en términos de una integral de Fresnel

$$F(x) = 2j \sqrt{x} \exp(jx) \int_{\sqrt{x}}^{\infty} \exp(-j\tau^2) d\tau \quad (3.19)$$

La función $F(x)$ puede calcularse a partir de las integrales del seno y el coseno

$$S(x) = \int_0^x \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{2} \tau^2\right) d\tau \quad (3.20)$$

$$C(x) = \int_0^x \operatorname{cos}\left(\frac{\pi}{2} \tau^2\right) d\tau \quad (3.21)$$

Como sigue,

$$F(x) = j\sqrt{2\pi}\sqrt{x} \exp(jx) \left\{ \left[\frac{1}{2} - C\left(\sqrt{\frac{2}{\pi}}\sqrt{x}\right) \right] - j \left[\frac{1}{2} - S\left(\sqrt{\frac{2}{\pi}}\sqrt{x}\right) \right] \right\} \quad (3.22)$$

En las expresiones el argumento de $F(x)$ contiene a la función $a^\pm(\chi)$ que mide la separación angular entre el punto de observación y la *ISB* o la *RSB*. Su expresión es:

$$a^\pm(\chi) = 2 \cos^2\left(\frac{2n\pi N^\pm - \chi}{2}\right), \quad \chi = \phi \pm \phi' \quad (3.23)$$

Siendo N^+ y N^- los números enteros que más cerca satisfagan las ecuaciones

$$2\pi n N^+ - \chi = \pi \quad (3.24)$$

$$2\pi n N^- - \chi = -\pi \quad (3.25)$$

2.5.3.- Modelo implementado.

La implementación de la herramienta de análisis de canales MIMO de este proyecto se basa en un modelo determinista de trazado de rayos, cuya teoría ha sido explicada en los apartados anteriores de este mismo capítulo. La aplicación que realiza dicho trazado de rayos fue implementada por Jorge Luis Rodríguez en su proyecto final de carrera en la Universidad Politécnica de Valencia [14] y adaptada por Alberto Ruiz Moreno[16] para soportar efectos de transmisión en las paredes, en la que se han realizado modificaciones en proyectos posteriores



para la adaptación de canales SISO a MIMO y para la transmisión de ondas a través de paredes.

El trazado de rayos también puede utilizarse como modelo determinista para el análisis de canales MIMO. Si consideramos un sistema MIMO formado por M antenas transmisoras y N receptoras, el canal MIMO consiste en una matriz de dimensiones $M \times N$. Entre cada par de antenas se realiza un trazado de rayos para calcular el campo generado por la antena m transmisora en la antena n receptora, dando lugar a una matriz de transferencia $G_{N \times M}$. Los elementos de la matriz G se calculan por la suma coherente de las todas las contribuciones tenidas en cuenta que llegan a la antena receptora.

El rayo directo entre la antena m y n se obtiene con la expresión:

$$E_d(n, m) = E_0 \frac{e^{jkr_d(n, m)}}{r_d(n, m)} \quad (3.30)$$

Donde m representa al receptor que se está teniendo en cuenta y n a la antena que está transmitiendo en ese momento y $r(n, m)$ es la distancia entre las antenas.

Los rayos reflejados se obtienen por:

$$E_R(n, m) = \sum_i R_i E_0 \frac{e^{jkr_i}}{r_i} \quad (3.31)$$

Donde R es el coeficiente acumulado de reflexión, calculado como el producto de todos los coeficientes de reflexión, (expresión 3.7).

La expresión de los rayos difractados es:

$$E_D(n, m) = \sum_i \frac{E_0}{s_i'} D_i \sqrt{\frac{s_i'}{s_i(s_i' + s_i)}} e^{-jk(s_i + s_i')} \quad (3.32)$$

Donde D_i es el coeficiente de difracción, s_i es la distancia recorrida por el rayo antes de impacto en el punto de difracción y s_i' es la distancia recorrida después de la difracción.

Si existe una combinación de mecanismos de reflexión y difracción se puede usar la siguiente expresión:

$$E_{R-D}(n, m) = \sum_i \frac{E_0}{s_i'} D_i R_i \sqrt{\frac{s_i'}{s_i(s_i' + s_i)}} e^{-jk(s_i + s_i')} \quad (3.33)$$

Finalmente se puede calcular cada elemento $G(n, m)$ de la matriz G como suma coherente de todas estas contribuciones:

$$G(n, m) = \frac{\lambda}{4\pi} \sum_{i=1}^4 \left[\sum_{j=1}^{n_i} \frac{E_{ij}(n, m)}{E_0} \right] \quad (3.34)$$

Donde $E_{ij}(n, m)$ es el campo generado en la antena receptora m por la antena transmisora n por cada uno de los rayos, donde i representa el tipo de contribución y n_i el número de rayos de esa clase.

Capítulo 3: SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)



3.1 Introducción. Definición y fundamentos de los SIG.

Al igual que la propia geografía, es difícil definir el término Sistema de Información Geográfica (SIG) ya que engloba la integración de áreas muy diversas. Por esto no existe una única definición de SIG totalmente consensuada (deMers, 1997). Una definición de SIG bastante aceptada es la redactada por el NCGIA [20] (National Centre of Geographic Information and Analysis): un Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS, en su acrónimo inglés) es una integración organizada de hardware, software, datos geográficos y personal, diseñado para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión. También puede definirse como un modelo de una parte de la realidad referido a un sistema de coordenadas terrestre y construido para satisfacer unas necesidades concretas de información. Existen otras muchas definiciones de SIG, algunas de ellas acentúan su componente de base de datos, otras sus funcionalidades y otras enfatizan el hecho de ser una herramienta de apoyo en la toma de decisiones, pero todas coinciden en referirse a un SIG como un sistema integrado para trabajar con información espacial, herramienta esencial para el análisis y toma de decisiones en muchas áreas vitales para el desarrollo nacional, incluyendo la relacionada con la infraestructura de un municipio, estado o incluso a nivel nacional.

Como ya se ha mencionado al principio, un sistema de información geográfica se compone de varios elementos, a saber:

- **Hardware:** en general las aplicaciones SIG se pueden ejecutar sobre una amplia variedad de ordenadores, desde nodos centralizados hasta equipos individuales o en red. En algunas organizaciones es posible que sea necesario el uso de hardware más específico para satisfacer las necesidades de una aplicación concreta.
- **Software:** los programas SIG proveen las herramientas y funcionalidades necesarias para almacenar, analizar y mostrar información geográfica, los componentes principales del software SIG son:
 - Sistema de manejo de base de datos.
 - Una interfaz gráfica de usuarios (IGU) para el fácil acceso a las herramientas.
 - Herramientas para captura y manejo de información geográfica.
 - Herramientas para soporte de consultas, análisis y visualización de datos geográficos.

Actualmente la mayoría de los proveedores de software SIG distribuyen productos fáciles de usar y pueden reconocer información geográfica estructurada en muchos formatos distintos.

- **Datos geográficos:** es el componente más importante para un SIG. Se requiere de adecuados datos de soporte para que el SIG pueda resolver los problemas y contestar a preguntas de la forma mas acertada posible. La consecución de datos correctos generalmente absorbe entre un 60 y 80% del presupuesto de implementación del SIG, y la recolección de los datos es un proceso largo que frecuentemente demora el desarrollo de productos que son de utilidad. Los datos geográficos y alfanuméricos pueden obtenerse por recursos propios u obtenerse a través de proveedores de datos. Mantener, organizar y manejar los datos debe ser política de la organización.
- **Personal:** Las tecnologías SIG son de valor limitado si no se cuenta con los especialistas en manejar el sistema y desarrollar planes de implementación del mismo. Sin el personal experto en su desarrollo, la información se desactualiza y se maneja erróneamente, pues el hardware y el software no se manipulan en todo su potencial.

Es indiscutible que los datos son el principal activo de cualquier sistema de información. Por ello el éxito y la eficacia de un SIG se miden por el tipo, la calidad y vigencia de los datos con los que opera. Los esfuerzos y la inversión necesaria para crear las bases de

datos y tener un SIG eficiente y funcional no son pequeños, aunque tampoco significa una gran inversión. Es un esfuerzo permanente por ampliar y mejorar los datos almacenados, utilizando las herramientas más eficientes para tal propósito.

La información geográfica contiene una referencia territorial explícita como latitud y longitud o una referencia implícita como domicilio o código postal. Las referencias implícitas pueden ser derivadas de referencias explícitas mediante geocodificación. Los SIG funcionan con dos tipos diferentes de información geográfica: el modelo vectorial y el modelo raster:

- El modelo raster o de retícula se centra en las propiedades del espacio más que en la precisión de la localización. Divide el espacio en celdas regulares donde cada una de ellas representa un único valor. Cuanto mayores sean las dimensiones de las celdas (resolución) menor es la precisión o detalle en la representación del espacio geográfico.
- En el modelo vectorial, la información sobre puntos, líneas y polígonos se almacena como una colección de coordenadas (x,y). La ubicación de una característica puntual, pueden describirse con un sólo punto (x,y). Las características lineales, pueden almacenarse como un conjunto de puntos de coordenadas (x,y). Las características poligonales, pueden almacenarse como un circuito cerrado de coordenadas.



Figura 3.1. Representación de los modelados digitales raster y vectorial del entorno geográfico real.

Hoy en día el condicionante principal a la hora de afrontar cualquier proyecto basado en SIG lo constituye la disponibilidad de datos geográficos del territorio a estudiar, mientras que hace diez años lo era la disponibilidad de computadoras potentes que permitieran realizar los procesos de cálculo involucrados en el análisis de datos territoriales. Además de ser un factor limitante, la información geográfica es a su vez el elemento diferenciador de un Sistema de Información Geográfica frente a otro tipo de Sistemas de Información; así, la particular naturaleza de este tipo de información contiene dos vertientes diferentes: por un lado está la vertiente espacial y por otro la vertiente temática de los datos. Mientras otros Sistemas de Información contienen sólo datos alfanuméricos (nombres, direcciones, números de cuenta, etc.), las bases de datos de un SIG integran además la delimitación espacial de cada uno de los objetos geográficos. Un ejemplo podría ser el contar con un suelo definido en los planos de clasificación de un plan maestro de desarrollo. Este suelo urbanizable tiene una serie de atributos, tales como su uso, su sistema de gestión, su edificabilidad, sus características

mecánicas, etc. Pero además, tiene una delimitación espacial concreta correspondiente con su propia geometría definida en el plano.

Por tanto, el SIG tiene que trabajar a la vez con ambas partes de información: su topografía perfectamente definida en plano y sus atributos temáticos asociados. Es decir, tiene que trabajar con cartografía y con bases de datos a la vez, uniendo ambas partes y constituyendo con todo ello una sola base de datos geográfica.

De esta manera, se define a la topología como esta capacidad de asociación de bases de datos temáticas junto con la descripción espacial precisa de objetos geográficos y las relaciones entre ellos y es precisamente la topología lo que diferencia a un SIG de otros sistemas informáticos de gestión de información.

3.2. Bases de datos geográficos. Modelos raster y vectorial.

Como se ha mencionado en el apartado anterior, los SIG utilizan dos tipos de técnicas de almacenamiento de datos geográficos para la creación de modelos digitales del terreno (mdt): el modelo raster y el modelo vectorial. Estas técnicas permiten pues la transformación del entorno geográfico real a datos digitales a partir de determinadas referencias fundamentadas en nuestra base de datos geográficos. Es por tanto vital la creación y continua actualización de una base de datos geográficos (*geodatabase* es su término en inglés).

La construcción de una **base de datos geográfica** implica un proceso de abstracción para pasar de la complejidad del mundo real a una representación simplificada que pueda ser procesada por el lenguaje de las computadoras actuales. Este proceso de abstracción tiene diversos niveles y normalmente comienza con la concepción de la estructura de la base de datos, generalmente en capas; en esta fase, y dependiendo de la utilidad que se vaya a dar a la información a compilar, se seleccionan las capas temáticas a incluir. Dicha abstracción nos permitirá ver a posteriori en nuestro sistema cada una de las capas por separado, permitiendo una visualización en detalle de los datos de dicha capa; es por esto que los datos que se agruparán en cada capa dependerá mucho de la aplicación que se le vaya a dar a nuestro sistema de información geográfica. Un ejemplo de esto lo podemos ver en la figura 3.2 en la que se quiere representar en un SIG un entorno suburbano genérico:

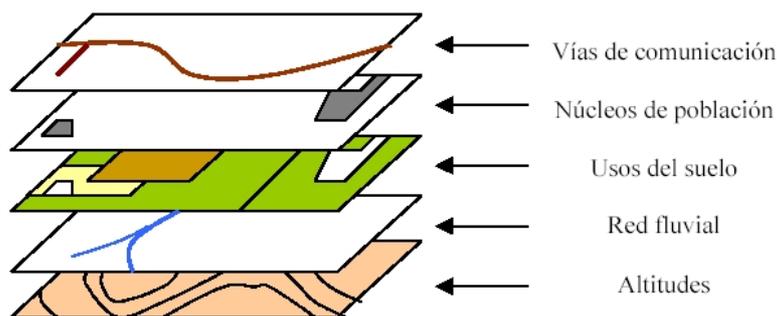


Figura 3.2. Niveles de abstracción de datos para la representación en un SIG de un entorno suburbano.

La estructuración de la información espacial procedente del mundo real en capas conlleva cierto nivel de dificultad. En primer lugar, la necesidad de abstracción que requieren las máquinas implica trabajar con primitivas básicas de dibujo, de tal forma que toda la complejidad de la realidad ha de ser reducida a puntos, líneas o polígonos. En segundo lugar, existen relaciones espaciales entre los objetos geográficos que el sistema no puede obviar; la topología, que en realidad es el método matemático-lógico usado para definir las relaciones espaciales entre los objetos geográficos puede llegar a ser muy compleja, ya que son muchos los elementos que interactúan sobre cada aspecto de la realidad.

La topología de un SIG reduce sus funciones a cuestiones mucho más sencillas, como por ejemplo conocer el polígono (o polígonos) a que pertenece una determinada línea, o bien saber qué agrupación de líneas forman una determinada carretera.

Existen diversas formas de modelar estas relaciones entre los objetos geográficos o topología. Dependiendo de la forma en que ello se lleve a cabo se tiene uno u otro tipo de Sistema de Información Geográfica dentro de una estructura de dos grupos principales: **SIG vectoriales** y **SIG Raster**. No existe un modelo de datos que sea superior a otro, sino que cada uno tiene una utilidad específica, como podemos ver ilustrado en la figura 3.3, en la que vemos diferentes usos de estos modelos para representar diferentes características:

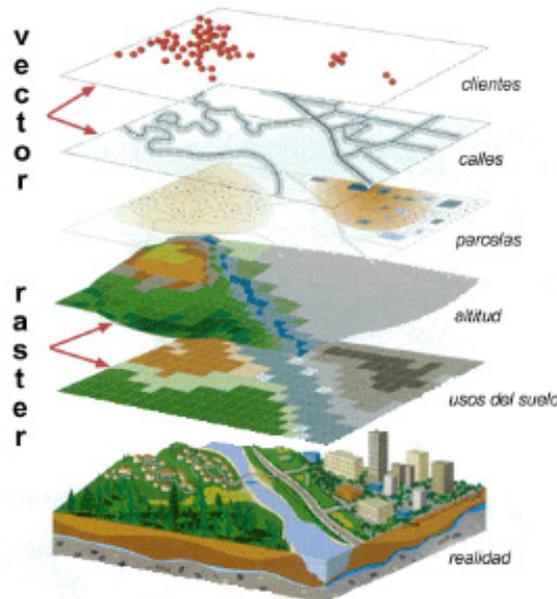


Figura 3.3. Diferentes niveles de abstracción para los modelos vectorial y raster.

3.2.1. Modelo raster.

Los modelos raster están fundamentados en una estructura basada en celdas (grid-cell) en la que una determinada área geográfica es dividida en celdas, cada una identificada por su posición en una fila y una columna dentro una **estructura matricial**. Esta estructura matricial es la que comúnmente se conoce como *raster*, siendo la más comúnmente usada en los SIG. Esta estructura se caracteriza principalmente por una división de los datos espaciales en **celdas regularmente espaciadas** y todas **con la misma forma**, siendo el cuadrado la forma más utilizada para las celdas.

Además de la estructura raster, que emplea un mayado con espaciado regular, existen sistemas de información geográfica que utilizan estructuras irregulares, coloquialmente denominadas “de mosaico” [21](*tessellated* en inglés). En particular, la estructura *quadtree* (o *Q-tree*), basada en regiones con forma poligonal arbitraria (generalmente rectangular o cuadrada), es una de las que más aceptación está encontrando como alternativa al raster.

En los modelos de terreno basados en la estructura raster no se requiere un codificado explícito de las coordenadas geográficas, ya que estas están implícitas en el layout de las celdas. De hecho, la naturaleza matricial de la estructura raster permite que se pueda calcular fácilmente cualquier coordenada si se conocen tanto el punto de origen, como el tamaño del mayado de celdas. Además dado que cada celda del mayado se puede considerar como parte

de un array bidimensional en términos de codificación informática, muchas operaciones analíticas serán fáciles de programar. Estas características hacen de las estructuras de datos 'en mosaico' una elección muy popular para los desarrolladores de software SIG, además, dado que la adyacencia y la conectividad están implícitas en la localización de una celda en particular de la matriz de datos, la topología [23] deja de ser un concepto a tener en cuenta.

El **tamaño de las celdas** en una estructura de mosaico se elige en función de la precisión de los datos y de la resolución necesitada por el usuario. Dado que los datos espaciales raramente se encuentran en zonas regularmente espaciadas, se hace necesaria una clasificación de cada celda, asignando cada una de ellas a la característica más común presente en dicha celda (por ejemplo, si en una celda el, digamos, 80% de los datos corresponden al tipo 'río', y el 20% restante al tipo 'bosque', la celda entera será clasificada como 'río'). Resulta por ello, un problema de vital importancia, elegir adecuadamente la resolución o tamaño de celda, ya que, si elegimos un tamaño demasiado grande tendremos demasiada generalización en los datos, y si, por el contrario, elegimos un tamaño demasiado pequeño, el gran número de celdas resultante puede ocupar un espacio de memoria excesivo además de que el gran volumen de datos resultante ralentizaría los tiempos de procesamiento. De la misma manera, una resolución muy grande podría exceder la de los datos originales capturados, pudiendo esto causar resultados erróneos durante el análisis.

En la siguiente figura (3.4) podemos observar cómo un sistema raster caracteriza un entorno geográfico con diversos atributos (cada uno en un color) limitados por las líneas en negro, clasificándolos en una matriz de celdas donde cada una sólo corresponde al atributo mayoritario en ella. Como se puede ver, se pierde fidelidad con el modelo real, pero esto es generalmente subsanable con la elección de una resolución adecuada, tal y como se ha explicado anteriormente:

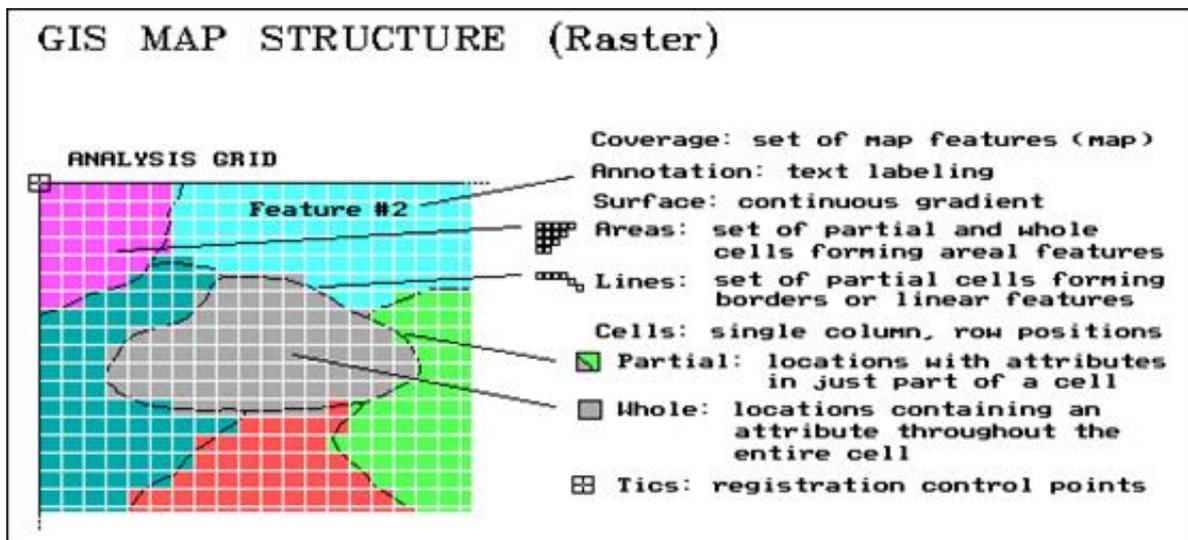


Figura 3.4. Codificación de un entorno real en un sistema de celdas raster

La mayoría de datos geográficos se capturan en formato de vector, por tanto estos deben pasar un proceso de conversión a la estructura raster (*vector-raster conversion*). La mayoría del software SIG permite al usuario elegir el tamaño del mayado raster para la conversión vector-raster, siendo imperativo para realizar adecuadamente la conversión que la escala original en que se encuentran los datos, es decir la resolución o precisión, sea perfectamente conocida. Dicha resolución determinará el tamaño del mapa raster que resulte de la conversión.

La mayoría del software de sistemas de información geográfica basados en el **modelo raster**, requieren que cada celda tenga un único valor discreto. De acuerdo con esto, una capa



de datos, por ejemplo tomemos el conjunto de características de un bosque, en un parque nacional podría ser dividida en una serie de mapas raster cada uno representando un tipo de atributo, que en nuestro ejemplo podrían ser un mapa de especies de árboles, otro de elevaciones del terreno, otro de densidad arbórea, etc. Estos mapas se conocen como **mapas de atributo único** (*one attribute maps*). Por el contrario, los más convencionales modelos de datos basados en **vectores**, que mantienen los datos en **mapas de múltiples atributos**, que en el ejemplo anterior podría verse como el citado inventario del bosque en polígonos asociado a una tabla con todos los atributos en sus columnas. Esta diferencia básica en el almacenamiento de datos proporciona el punto de partida para las técnicas de análisis cuantitativas, a las que a menudo se refieren como *álgebra raster* o *álgebra de mapas* (*raster or map algebra*).

En definitiva, las estructuras de datos raster permiten el uso de sofisticados procesos de modelado matemático, mientras que los sistemas basados en estructuras de datos vectoriales se ven a menudo limitados por las capacidades y lenguaje de un DBMS (*Data Base Management System*-Sistema de Gestión de Base de Datos-) relacional. Esta diferencia es el mayor factor de distinción entre los software SIG que usan estructuras de datos raster, y estructuras vectoriales.

Dado que resulta de vital importancia para el usuario entender las ventajas y desventajas derivadas de elegir un tipo concreto de estructura de datos [23], a continuación se exponen las **principales ventajas** que se pueden destacar para el **modelo raster** :

- La posición geográfica de cada celda está ligada a su posición en a matriz de celdas, por lo que, aparte de excepciones como el punto de origen, no se necesita guardar ningún tipo de coordenada geográfica.
- Debido a la naturaleza de la técnica de almacenamiento de datos, el análisis de estos es más fácil de llevar a cabo.
- La naturaleza inherente de los mapas raster (mapas de atributo único) los hacen ideales para el análisis matemático y cuantitativo.
- Tanto los datos discretos (p.ej. el posicionamiento de árboles) como los continuos (p.ej. la elevación del terreno) se acomodan perfectamente a este sistema de almacenamiento de datos, facilitando así la integración de ambos tipos.
- Alta compatibilidad con dispositivos de salida basados en sistema raster, como *plotters* electrostáticos y terminales gráficas.

Entre los principales **inconvenientes** caben destacar:

- El tamaño de las celdas determinará la resolución en que los datos pueden ser representados.
- Dependiendo de la resolución de las celdas puede resultar difícil representar adecuadamente características lineales (por ejemplo un camino), así como conectividades de sistemas en red (por ejemplo, un sistema de carreteras).
- El procesamiento de datos adicionales puede resultar molesto en caso de que exista una gran cantidad de estos datos, ya que los mapas raster, de manera inherente, solo representan un atributo o característica en una misma área.
- Dado que la mayoría de datos se recopilan en formato de vector, es necesario hacer una conversión vector-raster, lo que, además de aumentar los requisitos de procesamiento, añade incertidumbre sobre la integridad de los datos debido a problemas derivados de generalización y de mala elección de la resolución de las celdas.
- No suele haber conformidad entre la mayoría de mapas resultados de sistemas de mado de celdas y mapas cartográficos de alta resolución.

3.2.2. Modelo vectorial.

El modelo de almacenamiento de datos geográficos con formato de vectores se caracteriza por que, como su nombre indica, usa estas líneas direccionales para representar los elementos o características geográficas. Un dato en formato vector se caracteriza por el uso de puntos consecutivos o *vértices* que definen un segmento lineal, cada uno de los cuales consiste en un par de coordenadas (x,y).

A las líneas formadas por vectores se las suele denominar *arcos* y consisten básicamente en una cadena de vectores terminada en un *nodo* que vienen a ser los vértices del arco. Las características geográficas con forma de punto se definen por un par de coordenadas (x,y), o sea, por un vértice. Por su parte las características poligonales se definen por un conjunto cerrado de pares de coordenadas. En la representación de datos vectoriales, el almacenamiento de los vértices para cada uno de los elementos geográficos es tan importante como la conectividad entre elementos, como puede ser la existencia de vértices comunes a dos elementos donde estos se conectan. Podemos entender este estilo de representación de manera más intuitiva observando la figura 3.5. :

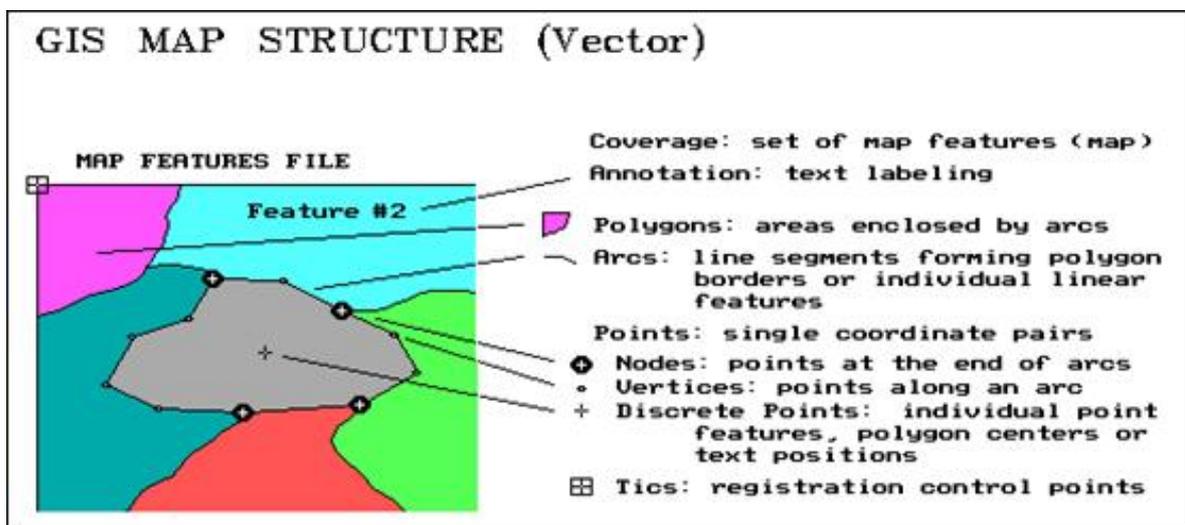


Figura 3.5. Representación de un entorno geográfico mediante el modelo de datos vectorial.

Aunque hay que señalar que, al igual que en el modelo raster, existen **varios métodos de modelado y almacenamiento de datos con vectores**, solamente dos de ellos son comúnmente usados para el almacenamiento de datos geográficos en software SIG: la **estructura de datos topológica** y la de **dibujo asistido por ordenador** [23](CAD- *computer-aided drafting*). A continuación se explica brevemente en qué consisten ambos:

- La **estructura de datos topológica** es el mejor método para retener las relaciones existentes entre los diferentes elementos geográficos de nuestro mapa, ya que almacena de manera explícita la información referente a la adyacencia existente entre dichos elementos. Debido a esto se suele clasificar a esta estructura como una estructura de datos inteligente, siendo además el modelo de datos vectorial más usado en tecnologías SIG, pues existen muchas funciones complejas de análisis de datos que no se pueden llevar a cabo sin este tipo de modelos. Entender el establecimiento de estas relaciones y los cálculos a llevar a cabo competen a la ciencia topológica, no compitiendo esto a la finalidad de este proyecto.
- En cuanto a la estructura de datos de **dibujo asistido por ordenador o CAD** (*computer-aided drafting*), esta consiste en un listado de elementos discretos, no de elementos o características continuas, almacenados mediante cadenas de vértices para definir así las características geográficas como puntos, líneas o áreas. Este modelo presenta una considerable redundancia de datos, ya que cada segmento que delimite dos polígonos puede ser almacenado dos veces, una por cada elemento o característica geográfica que delimite. Esta estructura



surgió a partir del desarrollo de sistemas gráficos para ordenador sin ningún tipo de consideraciones específicas para el procesado de electos geográficos. De esta manera, dado que elementos como los polígonos se tratan de manera autocontenida e independiente, resulta difícil establecer criterios de adyacencia, por lo que este modelo carece de la definición de relaciones espaciales entre elementos que sí definía el modelo topológico.

Finalmente, como resumen, hagamos un recuento de las principales ventajas y desventajas de esta estructura de almacenamiento de datos a través de vectores. Entre las principales **ventajas** se encuentran las siguientes:

- Los datos pueden representar los elementos geográficos en su resolución y forma original sin caer en generalizaciones.
- Los resultados gráficos suelen ser estéticamente más agradables, semejantes a la cartografía tradicional.
- Como la mayoría de mapas se encuentran en formato vectorial, no es necesaria ninguna conversión de datos.
- Se mantiene una localización geográfica de los datos precisa.
- Permite un codificado eficiente de la topología, y como resultado de ello, las operaciones que requieren información topológica se realizan de manera más eficiente.

Para terminar, los principales **inconvenientes** de la estructura de datos vectorial se enumeran aquí:

- La localización de cada vértice debe ser almacenada de manera explícita.
- Para un análisis más eficiente, los datos vectoriales deben ser convertidos a una estructura topológica, lo que, a menudo, requiere un intensivo procesamiento y depuración de datos. Además, dado que la topología es estática, cualquier actualización de los datos vectoriales requeriría una completa reestructuración de la estructura topológica.
- Los algoritmos de las funciones de análisis y manipulación de datos suelen ser bastante complejos, lo que implica una gran carga computacional que, a menudo, limita de manera inherente el manejo de grandes conjuntos de datos (por ejemplo, mapas con gran cantidad de características y elementos geográficos).
- Las capas de datos continuos, como por ejemplo, la elevación del terreno, no se pueden representar de manera eficiente con datos vectoriales, lo que suele requerir una cantidad sustancial de interpolación y generalización de datos para representar estas capas.
- Imposible llevar a cabo análisis espacial y filtrado con polígonos.

3.3. ArcGIS. Introducción y funcionamiento.

ArcGIS es el nombre de un grupo de líneas de productos software de sistemas de información geográfica creados por ESRI [24], que proporciona una estructura escalable para la implementación de sistemas de información geográfica, tanto para un usuario individual como para varios usuarios en escritorios, en servidores, en web y en el campo. Este sistema consiste en una colección integrada de software [25] de aplicaciones geográficas para construir así un sistema SIG completo. Existen pues varias subestructuras o niveles que deben ser tratados individualmente, y que podemos ver representados en la figura 3.6..

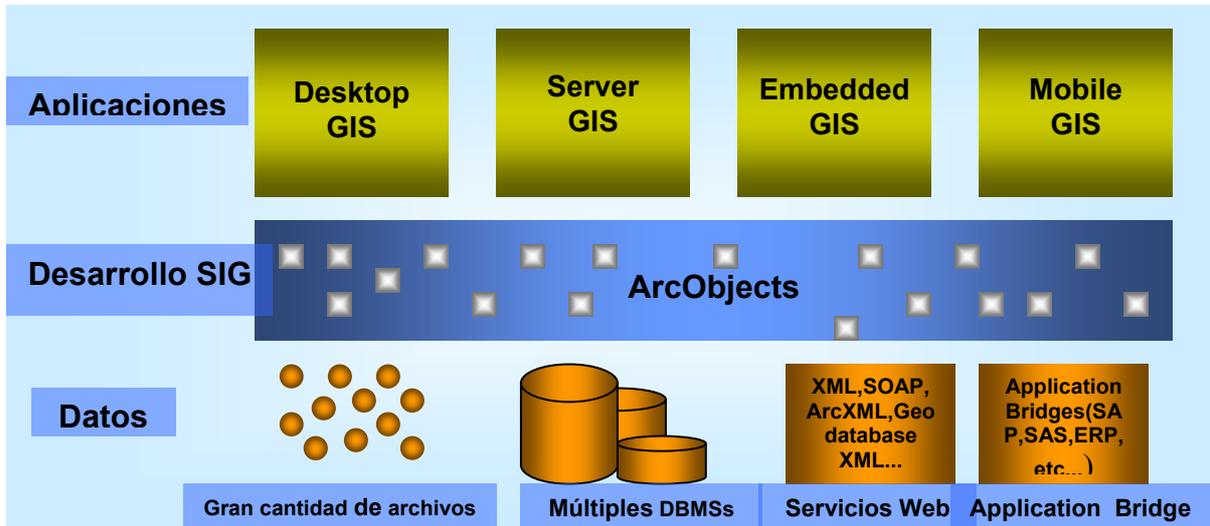


Figura 3.6. Estructura de ArcGIS como un SIG completo.

3.3.1. Aplicaciones ArcGIS.

El nivel más importante, pues es el más perceptible para el usuario es el de los productos finales de ArcGIS, enumerados en el nivel de “Aplicaciones” en la figura 3.6.. A continuación explicaremos brevemente cada uno de ellos, señalando su funcionalidad así como componentes y características principales.

1.- El **Desktop GIS**(-escritorio SIG-) es el nivel primario desde el que los profesionales compilan, crean y utilizan la información geográfica, e incluye las siguientes aplicaciones :

- **ArcReader**, que permite visualizar, explorar e imprimir mapas y globos de manera sencilla. ArcReader ofrece funcionalidad interactiva para acceder a una gran variedad de información geográfica dinámica. Con ArcReader, cualquiera puede visualizar mapas de alta calidad creados con ArcMap y posteriormente publicados con la extensión ArcGIS Publisher.

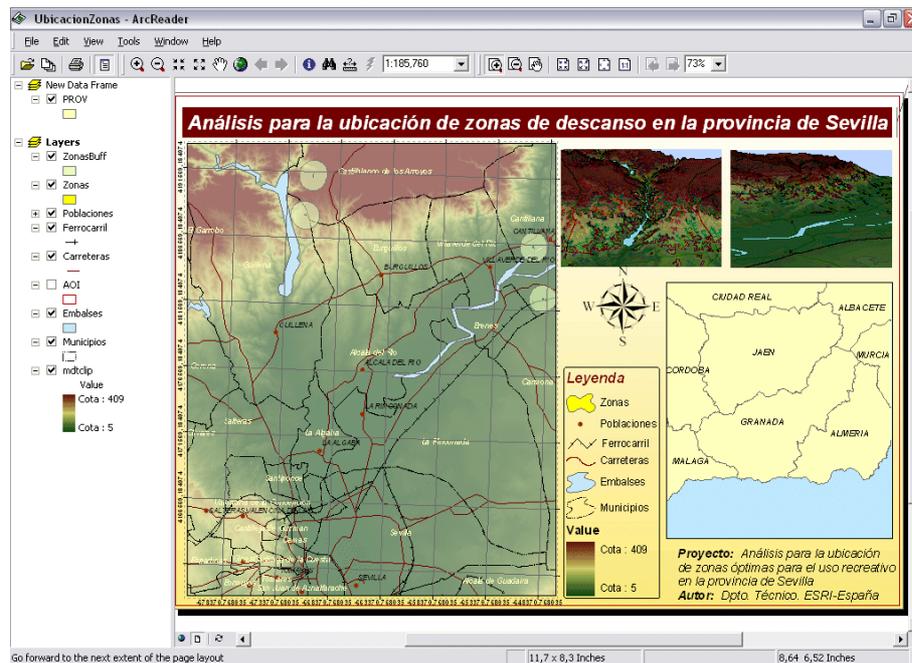


Figura 3.7. Visualización de mapas con ArcReader.

Con ArcReader se puede:

- Permitir a cualquier usuario ver mapas publicados con ArcGIS Publisher.
 - Aprovechar la inversión en datos espaciales publicando contenido para un amplio público.
 - Proporcionar capacidad de visualización (pero sólo de lectura) y de consulta a información corporativa.
 - Permitir a usuarios profanos en GIS trabajar con mapas y globos.
 - Compartir recursos con independencia del sistema operativo.
 - Publicar datos y mapas en CD-ROM.
- **ArcView**, que permite visualizar, analizar, crear y gestionar información geográfica. La mayoría de la información posee una componente que puede relacionarse con un lugar geográfico: direcciones, códigos postales, posiciones de GPS, secciones censales, ciudades, regiones, países u otro tipo de localizaciones. ArcView permite visualizar, explorar y analizar estos datos, revelando patrones, relaciones y tendencias que no se aprecian bien en bases de datos, hojas de cálculo o conjuntos estadísticos.

Mención especial requiere una aplicación específica dentro de ArcView. Esta aplicación es **ArcMap**. Es la aplicación central para todas las tareas que requieran trabajar sobre mapas, desde cartografía hasta análisis y editado de mapas. ArcMap ofrece dos tipos diferentes de vista de un mapa: una vista de datos geográficos, y otra de la página del layout del mapa (el layout contiene todas las capas del mapa así como los elementos presentes en cada una de ellas).

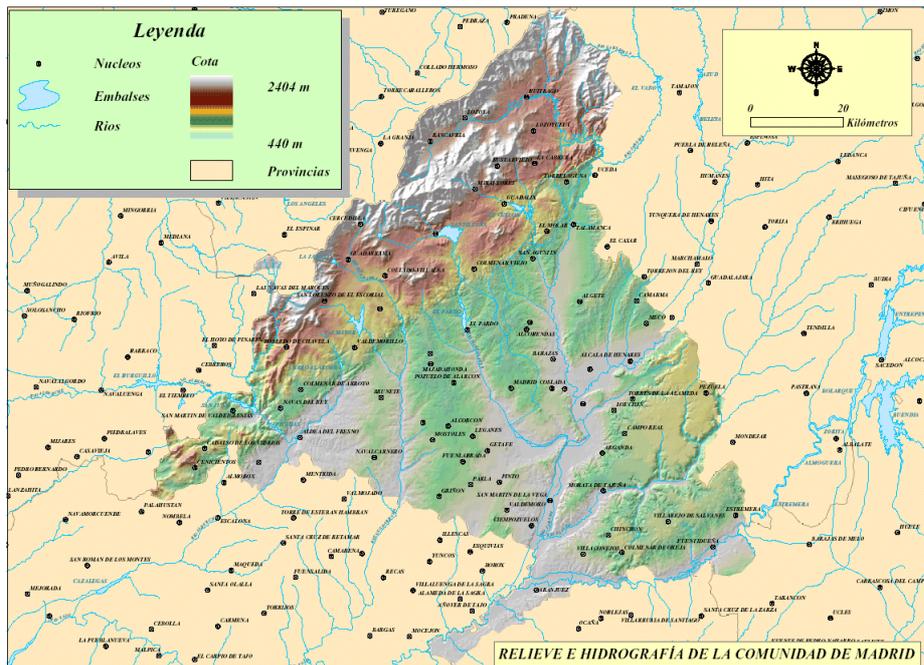


Figura3.8. Vista de layout de un mapa en ArcMap.

La vista geográfica de los datos es un entorno donde las capas geográficas se simbolizan, analizan y se agrupan en datasets. Una interfaz en tabla de contenidos organiza y controla las propiedades de dibujo de las capas en el marco de la vista. La vista de datos visualiza un dataset en un área determinada.

La vista de layout: un entorno donde las páginas de mapa contienen las vistas geográficas así como otros elementos cartográficos como barras de escala, leyendas, flechas de norte y mapas de referencia. Esta vista de layout se utiliza para componer mapas en hojas para su impresión y publicación.

- **ArcEditor** es un potente cliente GIS con el que editar y gestionar información geográfica. Es parte de la familia de productos de ArcGIS, e incluye toda la funcionalidad de ArcView añadiendo una serie de herramientas para crear, editar y asegurar la calidad de los datos. ArcEditor soporta tanto la edición de un usuario como los procesos colaborativos entre numerosos editores. Se incluye un amplio conjunto de herramientas para introducir y depurar datos pero también para realizar sofisticados dibujos y ediciones con versiones. Con ArcEditor, es posible :
 - Automatizar el control de calidad construyendo reglas de validación directamente en los datos.
 - Generar y editar entidades geográficas mediante edición visual y herramientas de productividad.
 - Diseñar bases de datos geográficas de calidad.
 - Modelizar flujos de trabajo multiusuario complejos.
 - Establecer y mantener la integridad espacial mediante relaciones topológicas entre entidades geográficas.
 - Diseñar nuevos planes de trabajo y procedimientos comunes dentro de la empresa, así como guardar diferentes fases de procesos de trabajo.



- Administrar y explorar redes geométricas.
- Incrementar la productividad durante la edición.
- Administrar un entorno de edición multiusuario con versiones.
- Desconectar de la base de datos y realizar edición en trabajos de campo.

ArcEditor se utiliza para trabajar con información compleja. El amplio número de herramientas y los diferentes procesos de trabajo con que cuenta permiten generar y mantener la información geográfica de manera sencilla y eficiente. ArcEditor incluye herramientas de edición COGO, herramientas avanzadas de creación, y de detección y resolución de conflictos.

- **Arclnfo** constituye la más avanzada versión de ArcGIS, que incluye capacidades adicionales para manipulación, edición y análisis de datos. Posee toda la funcionalidad de ArcView y ArcEditor además de incluir herramientas avanzadas de análisis espacial, tratamiento de datos y cartografía de calidad. Los usuarios profesionales de SIG utilizan Arclnfo para cualquier aspecto relacionado con la generación de información, modelización, análisis y representación de mapas. Arclnfo proporciona toda la funcionalidad necesaria para crear y administrar un SIG inteligente, incluyendo mapas y globos, datos, metadatos y modelos de flujos de trabajo. Esta funcionalidad está accesible a través de una interfaz fácil de usar, personalizable y extensible mediante modelos, scripts y aplicaciones. Con Arclnfo es posible:
 - Automatizar complejos flujos de trabajo y modelos de análisis.
 - Realizar análisis vectoriales como solapamientos, proximidad y análisis estadísticos.
 - Utilizar herramientas tanto para trabajar con shapefiles como con coberturas (más adelante se explican en detalle los shapefiles).
 - Generar eventos a lo largo de entidades lineales así como solapar eventos con otras entidades.
 - Automatizar la conversión de datos.
 - Producir mapas personalizados, precisos y con calidad para ser publicados.

2.- Pasemos ahora al nivel **Server GIS**(Servidor SIG). Las aplicaciones de este nivel de aplicación permiten servir datos y funcionalidad SIG desde un entorno centralizado. Los servidores GIS se emplean cada vez más frecuentemente en multitud de tareas dentro de un Sistema de Información Geográfica centralizado. El software SIG se centraliza en servidores de aplicaciones para distribuir funcionalidad SIG a un gran número de usuarios a través de la red (WAN, LAN o Internet).

Los usuarios de un Sistema de Información Geográfica corporativo acceden a servidores SIG a través de clientes desktop, clientes ligeros como navegadores Web, o a través de dispositivos móviles. Un servidor GIS permite entre otras las siguientes funciones:

- Gestión de Bases de datos GIS extensas.
- Distribución de información geográfica a través de Internet.
- Alojamiento de portales GIS que permitan búsqueda y empleo de información geográfica.
- Alojamiento de funcionalidad GIS a la que acceden multitud de usuarios de una organización.

El software servidor de ESRI, cumple con los estándares empleados en tecnologías de la información lo que permite que la integración de aplicaciones GIS con otro software

empresarial (SGBD, servidores Web, ERPs, CRMs) sea no solo posible sino cada vez más frecuente.

Los principales productos del servidor SIG se enumeran a continuación, junto con una pequeña explicación del funcionamiento de cada uno de ellos:

- **ArcGIS Server** es una plataforma completa capaz de crear aplicaciones y servicios GIS profesionales que, gracias a su tecnología de servidor, son capaces de gestionar, visualizar y analizar información geográfica de manera centralizada. ArcGIS Server ofrece las siguientes ventajas:
 - Herramientas que permiten llevar una administración centralizada y crear aplicaciones Web y servicios desde los que acceder a toda la funcionalidad GIS disponible.
 - Integración con otros sistemas corporativos como CRMs, ERPs, etc. ArcGIS Server proporciona las herramientas necesarias para diseñar una Arquitectura Orientada a Servicios (SOA).
 - Soporte de estándares tanto del sector de los GIS (OGC) como del resto de Tecnologías de la Información (W3C).
 - Capacidad para crear aplicaciones personalizadas en .NET o Java.

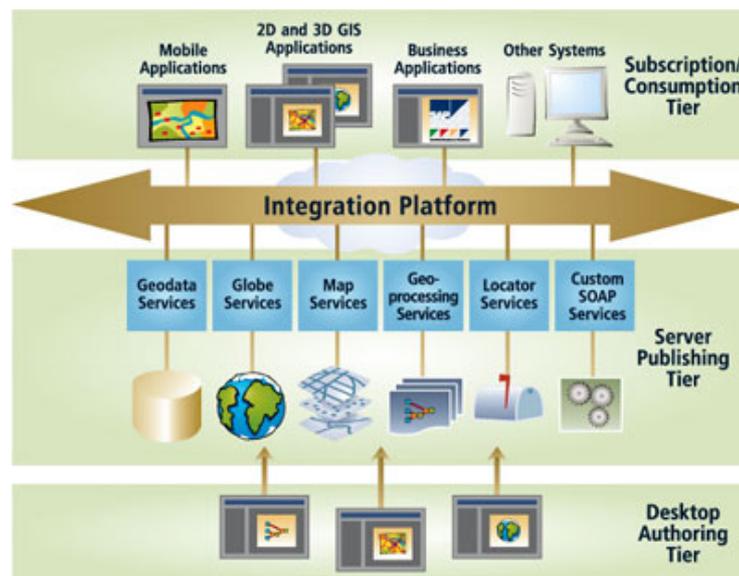


Figura 3.9. Integración de ArcGIS Server en el sistema global.

ArcGIS Server complementa a ArcGIS Desktop: con este cliente los analistas GIS pueden crear mapas, globos y tareas de geoprocésamiento y luego publicarlos con ArcGIS Server. De esta manera es posible ofrecer funcionalidad GIS mediante servicios.

- **ArcGIS Explorer** es un cliente ligero incluido en ArcGIS Server. Es una aplicación desktop que ofrece acceso, integración y consumo de servicios SIG, contenido geográfico (2D y 3D) y otros servicios Web. ArcGIS Explorer puede acceder a una gran variedad de servicios no sólo ofrecidos por ArcGIS Server, sino también los publicados por ArcIMS, ArcWeb Services y Servidores WMS, entre otros. Además, ArcGIS Explorer permite combinar datos procedentes de los servidores con datos locales, entre éstos, ficheros shape, geodatabases basadas en fichero, KML e información raster en formato JPEG 2000, GeoTIFF, MrSID e IMG.



ArcGIS Explorer integra la riqueza de la información geográfica y la potencia del geoprocésamiento en servidor, gracias al acceso directo vía web que ofrece a las funcionalidades GIS de ArcGIS Server. En definitiva, ArcGIS Explorer permite:

- Responder a preguntas teniendo en cuenta la variable espacial con sus mapas y compartir fácilmente los resultados obtenidos.
 - Utilizar servicios, mapas e información procedentes de sus propios servidores corporativos.
 - Explorar información de todo el globo de manera continua
 - Combinar sus datos locales con los servicios ofrecidos por ArcGIS Server, ArcIMS, servidores OGC WMS, y servicios ArcWeb Services publicados por ESRI Inc.
 - Realizar análisis SIG utilizando tareas (por ejemplo, visibilidad, modelización de áreas idóneas, búsquedas por proximidad).
- **ArcGIS Image Server** es una plataforma para la gestión, procesamiento y distribución de imágenes geográficas(fotografías aéreas escaneadas, cámaras digitales, imágenes de satélite, mapas escaneados y modelos digitales del terreno,etc). Ofrece acceso rápido y abierto a las imágenes permitiendo a las organizaciones maximizar el rendimiento de sus inversiones en información raster, lo que cada vez cobra mayor importancia, ya que la información raster es la base de la mayoría de sistemas de información geográfica. En concreto, el Image Server ofrece :
 - Acceso rápido y abierto a las imágenes, permitiendo a las organizaciones maximizar el rendimiento de sus inversiones en información raster.
 - Visualización casi instantánea de las imágenes, incluso con muchos usuarios trabajando simultáneamente, sin necesidad de reprocesar la información y luego cargarla en una base de datos.

ArcGIS Image Server también es capaz de realizar procesamiento avanzado de imágenes al vuelo, como por ejemplo ortorrectificación, pan sharpening o creación de mosaicos complejos. Las imágenes generadas por el servidor pueden usarse en páginas Web o aplicaciones cliente como ArcGIS y otros productos comerciales de GIS y CAD.

Con esta gran cantidad de imágenes 2D y 3D a la que antes hacíamos referencia, aparece el problema de cómo manejarlas, procesarlas y distribuirlas. El valor de las imágenes es más alto cuanto menor es el tiempo que transcurre entre su captura y su puesta en explotación por parte de los usuarios. Cuanto mayor es la comunidad de usuarios para quienes las imágenes están disponibles más partido se obtiene de ellas.

El procesamiento dinámico (al vuelo) de imágenes es una de las características fundamentales de ArcGIS Image Server. El servidor está preparado para publicar servicios que difundan imágenes en diferentes estados de procesamiento: desde imágenes en bruto como pueden ser fotografía aérea o imágenes de satélite sin tratar hasta productos completamente terminados como pueden ser un mosaico de ortofotos ya balanceado y corregido. De una misma fuente de imágenes se pueden obtener múltiples productos listos para usar, lo que elimina los problemas de gestión que supone tener que manejar numerosos productos preprocesados. También se reducen considerablemente las necesidades de almacenamiento.

- **ArcIMS** es el servidor de aplicaciones integrado dentro de la arquitectura ArcGIS que ha sido diseñado para la distribución y difusión de información geográfica, mapas y servicios GIS en entornos Internet / intranet.



Tanto si se opera en un entorno limitado, como la intranet de una organización, como si se hace a través del entorno universal de Internet, es posible el empleo de ArcIMS para distribución de datos y funcionalidad GIS a múltiples usuarios.

3.- La tecnología de **GIS Móvil** permite desplegar sistemas de información en PDAs, portátiles y Tablet PCs. Un GIS móvil es la expansión de un sistema de información geográfica (GIS) desde la oficina al campo. Permite a los trabajadores que realizan tareas de campo capturar, almacenar, actualizar, manipular, analizar, y representar información geográfica. Un GIS Móvil puede integrar una o más de las siguientes tecnologías:

- Dispositivos móviles .
- Sistemas de Posicionamiento Global (GPS).
- Tecnología Wireless de acceso a Internet.

Tradicionalmente, el proceso de recolección y edición de información era lento y propenso a los errores. La información geográfica se trasladaba al campo en forma de mapas de papel, en los que se realizaban las ediciones mediante trazos y anotaciones en formularios. De nuevo en la oficina, era necesario descifrar estas ediciones e introducirlas manualmente en la base de datos. Esto resultaba en un sistema que no siempre se encontraba tan actualizado como debiera o no era muy preciso, por lo que el desarrollo de los sistemas y dispositivos de esta rama persiguen la actualización en tiempo real de las bases de datos geográficas, lo que permite un aceleración del análisis, representación y toma de decisiones en base a la información geográfica.

Estas prestaciones hacen que los GIS móviles tengan aplicaciones en gran variedad de tareas, desde bomberos o policías, hasta ingenieros, topógrafos o biólogos de campo entre otros, pudiendo realizar tareas como:

- Creación de mapas
- Inventarios
- Mantenimiento de recursos
- Inspecciones
- Reporte de Incidentes
- Análisis GIS y Toma de Decisiones

Dentro del nivel GIS móvil, una de las principales aplicaciones es ArcGIS Mobile, que permite a los desarrolladores crear aplicaciones geográficas para clientes móviles. ArcGIS Mobile incluye un kit de desarrollo (SDK) que se instala como parte de ArcGIS Server, lo que permite a los desarrolladores construir aplicaciones que posean funcionalidad geográfica básica como representación de mapas y navegación, soporte para GPS y edición GIS. También puede usarse para mejorar aplicaciones no espaciales integrando en ellas funcionalidad geográfica.

Con ArcGIS Mobile es posible realizar las siguientes funciones:

- Utilizar herramientas de desarrollo sencillas para crear aplicaciones móviles personalizadas que se ajusten a las necesidades del usuario.
- Operar en un entorno conectado o desconectado, permitiendo actualizaciones en el servidor casi en tiempo real.
- Desplegar aplicaciones en dispositivos móviles como smartphones, Pocket PCs y Tablet PCs.

4.- Finalmente, tenemos el nivel **Embedded GIS**(-SIG embebido o empotrado-). Este nivel está compuesto por aquellas aplicaciones que proporcionan a los usuarios acceso a SIG, tanto a través de medios intermediarios como a través de estaciones de trabajo SIG de altas prestaciones. Algunos ejemplos característicos de usos de SIGa través de intermediarios:

- Con aplicaciones de ayuda en Web browsers (exploradores de Internet).
- A través de funciones SIG implementadas o embebidas en documentos de procesadores de texto u hojas de cálculo.
- Con aplicaciones SIG específicas al estilo de ArcView pero que soportan un grupo limitado de funciones avanzadas (como una especie de versión personalida de Arcview).

Este tipo de aplicaciones requieren interfaces simple orientadas al usuario, sin embargo, son capaces de acceder a funciones lógicas SIG avanzadas, capaces de realizar unas cuantas tareas específicas, lo que permite que muchas organizaciones puedan funcionar con simples editores de datos sin necesidad de tener una estación de trabajo SIG (GIS desktop) completa.

Todo este uso limitado de lógica SIG requiere, como ya hemos dicho, el uso de herramientas SIG altamente personalizadas, que utilicen sólo las funciones que nos interesan para una tarea determinada y cuyas interfaces sean lo bastante simples para que puedan ser manejadas por usuarios no muy familiarizados con sistemas de información geográfica. Por lo tanto, para su desarrollo es necesaria la existencia de un kit de herramientas SIG programable, que permita acceder e implementar funciones SIG comunes para la creación de dichas aplicaciones. Es aquí donde entra en juego la principal herramienta de embebido o empotrado de funciones SIG de ESRI, **ArcGIS Engine**.

El kit de desarrollo **ArcGIS Engine Developer Kit** constituye un conjunto de componentes y herramientas para el desarrollo de aplicaciones con ArcGIS Engine, que permite crear aplicaciones GIS a todos los niveles de la arquitectura ArcGIS (desde *desktop* hasta *server*). Esto hace posible que se pueda distribuir funcionalidad GIS en base a las necesidades de cada usuario o grupo de usuarios concretos.

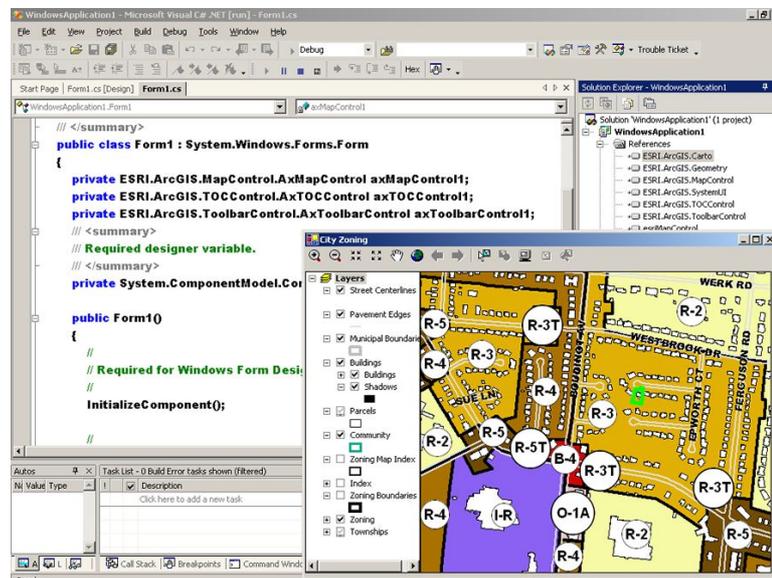


Figura 3.10. Ventana de desarrollo de ArEngine.

ArcGIS Engine permite desarrollar, desde una nueva herramienta de visualización de cartografía integrada con otra aplicación, hasta una completa aplicación independiente con funcionalidad GIS avanzada (edición, análisis espacial o geocodificación por ejemplo). Para ello se dispone de los siguientes elementos :

- ArcObjects (objetos y controles visuales).
- Controles que, dependiendo de la plataforma sobre la que se opere, serán controles ActiveX, Visual JavaBeans, controles .NET Windows o Motif Widgets.
- Documentación.



- Ayuda y tutoriales muy descriptivos de la potencia de ArcGIS Engine.
- Addins para actualización de código procedente de versiones de ArcGIS anteriores.

Finalmente, **ArcGIS Engine Runtime** constituye la plataforma para la distribución de aplicaciones desarrolladas con ArcGIS Engine, y contiene un conjunto de librerías con los objetos necesarios para ejecutar aplicaciones construidas con ArcGIS Engine (Kit de desarrollo).

Existe una runtime estándar que se extiende con los objetos necesarios para satisfacer las funciones que se incorporan, al ampliar las posibilidades de ArcGIS Engine con las extensiones *Geodatabase Write*, *Spatial Analyst* y *3D Analyst*.

Todas las aplicaciones necesitan una runtime sobre la que ejecutarse, y ésta es posible distribuirla junto con las aplicaciones desarrolladas.

3.3.2. Formato ShapeFile de datos geospaciales en ArcGIS.

Como colofón a este capítulo dedicado a los sistemas de información geográfica, y más concretamente a ArcGIS, ya que ha sido este el entorno software en el que se ha desarrollado el presente proyecto, resulta necesario hacer un breve hincapié en el formato de que da, a los archivos de datos, este entorno SIG, pues resulta vital a la hora de comprender el funcionamiento de la herramienta MIMOGIS que explicaremos en el siguiente capítulo.

ESRI Shapefile es un formato de datos geospaciales muy popular para sistemas de información geográfica, que permite almacenar **datos vectoriales** de localizaciones geográficas, así como información adicional de ellas, aunque carece de la capacidad de almacenar información topográfica. Este formato fue desarrollado por la empresa ESRI con una especificación muy abierta para conseguir una buena interoperabilidad entre los productos de ESRI y otros software GIS. Un "shapefile" normalmente se refiere a un conjunto de archivos con extensiones ".shp", ".shx" y ".dbf" entre otras, con todas con el mismo prefijo para un conjunto determinado (por ejemplo "carreteras.*"). El verdadero "shapefile" se refiere específicamente a los ficheros de extensión ".shp", aunque este archivo por sí solo resulta incompleto para su distribución compatible con otros sistemas, requiriéndose así los otros archivos de complemento.

Los shapefiles pueden describir, en términos espaciales, puntos, polígonos y polilíneas. Estos sirven para representar cualquier tipo de objeto, independientemente o combinándose, por ejemplo, un punto podría representar un pozo, un polígono podría ser un lago y una polilínea un río o carretera. Cada uno de ellos podrá también tener sus propios atributos como, por ejemplo, el nombre o la temperatura. Hay que señalar que estas formas primitivas no son muy útiles de por sí, si carecen de atributos que indiquen qué es lo que representan, por lo que cada una de las primitivas tendrá una tabla asociada con todos sus atributos/propiedades.

Veamos a continuación los componentes que forman un shapefile. Dado, que un shapefile es en realidad un conjunto de archivos, cuando nos referimos al shapefile, debe ser considerado como un todo, no sólo el archivo de extensión ".shp". En cada shapefile existen al menos tres archivos que están siempre presentes, pues son obligatorios al contener los datos principales, y aparte, pueden haber hasta ocho tipos distintos de archivos opcionales, que almacenan los índices de los datos principales para mejorar el funcionamiento. Dado que lo que interesa de un shapefile es que pueda ser manejado por gran cantidad de sistemas, incluso los que tienen cierta antigüedad, los nombres de los archivos deben ajustarse al formato MSDOS 8.3 (8 caracteres máximo de nombre de archivo más 3 caracteres de sufijo o extensión del archivo, separados ambos por un punto). Veamos pues los tipos de archivos posibles y para qué sirve cada uno:

- Archivos obligatorios:
 - .shp - almacena el elemento geométrico.



- .shx - almacena el índice del elemento geométrico.
- .dbf - contiene la tabla de atributos (database).
- Archivos opcionales:
 - .sbn y sbx -> almacenan el índice espacial de los objetos.
 - .fbn y fbx - almacenan el índice espacial de los objetos para los shapefiles que son de sólo lectura.
 - .ain y .aih - almacenan el índice de atributos de los campos activos en una tabla o en una tabla de atributos por temas.
 - .prj - almacena la información del sistema de coordenadas usando *well-known text* que es un formato similar al XML y aporta interoperabilidad.
 - .shp.xml - metadatos del shapefile.
 - .atx - índice de atributos para el archivo .dbf con la forma <shapefile>.<columnname>.atx

Como ya hemos señalado, el archivo más importante del shapefile es el de extensión .shp. El archivo está formado por una única cabecera de longitud fija, seguida por una o más grabaciones de datos de longitud variable, cada una de las cuales, está compuesta a su vez por una componente de cabecera y por otra de contenidos[ESRI shapeFile technical description].

La cabecera principal del archivo tiene una longitud fija de 100 bytes y consta de 17 campos (nueve de 4 bytes y ocho de 8 bytes), a saber:

- Bytes 0-3 : código del fichero (siempre con el valor hexadecimal 0000270A).
- Bytes 4-23 : sin uso.
- Bytes 24-27 : longitud del archivo.
- Bytes 28-31 : versión.
- Bytes 32-35 : tipo de forma ó primitiva geométrica. A cada tipo se le asigna un número (ver tabla 3.1).
- Bytes 36-99 : bounding box (caja de contorno) con los valores máximos de cada dimensión (X,Y,Z,M).

La cabecera de los datos grabados de longitud variable tiene una longitud fija de 8 bytes, conteniendo simplemente dos campos, uno con el número de datos a grabar y otro con la longitud de los datos. El tamaño de los datos grabados depende directamente del tipo de forma geométrica (Shape Type), que viene incluido en la cabecera principal del fichero. A continuación mostramos la tabla en la que se resumen todos los tipos de formas (Shape Type) posibles que se pueden grabar, el valor que se le asigna a cada tipo en la cabecera (Value), y los campos (Fields), tanto obligatorios como opcionales, en que se agrupan los datos grabados para cada tipo de forma:

Shape Type	Value	Fields
Null Shape	0	Shape Type
Point	1	Shape Type, X, Y
Polyline	3	Shape Type, Box, NumParts, NumPoints, Parts, Points
Polygon	5	Shape Type, Box, NumParts, NumPoints, Parts, Points
MultiPoint	8	Shape Type, Box, NumPoints, Points
PointZM	11	Shape Type, X, Y, Z, M
PolylineZ	13	<i>Obligatorios : Mandatory:</i> Shape Type, Box, NumParts, NumPoints, Parts, Points, Z range , Z array. <i>Opcionales:</i> M range, M array
PolygonZ	15	<i>Obligatorios:</i> Shape Type, Box, NumParts, NumPoints, Parts, Points, Z



		range, Z array <i>Opcionales:</i> M range, M array
MultiPointZ	18	<i>Obligatorios:</i> Shape Type, Box, NumPoints, Points, Z range, Z array <i>Opcionales:</i> M range, M array
PointM	21	Shape Type, X, Y, M
PolylineM	23	<i>Obligatorios:</i> Shape Type, Box, NumParts, NumPoints, Parts, Points <i>Opcionales:</i> M range, M array
PolygonM	25	<i>Obligatorios:</i> Shape Type, Box, NumParts, NumPoints, Parts, Points <i>Opcionales:</i> M range, M array
MultiPointM	28	<i>Obligatorios:</i> Shape Type, Box, NumPoints, Points <i>Opcionales:</i> M range, M array
MultiPatch	31	<i>Obligatorios:</i> Shape Type, Box, NumParts, NumPoints, Parts, PartTypes, Points, Z range, Z array <i>Optional:</i> M range, M array

Tabla 3.1. Tipos de shape que se pueden guardar, su valor y los campos posibles para cada una.

En cuanto al archivo .dbf que guarda los atributos de cada shape, decir que se trata de un archivo con el formato genérico xBASE (derivado del dBASE), usado por gran cantidad de lenguajes de programación y sistemas de gestión de bases de datos, siendo el formato estándar para bases de datos, desde que se desarrolló según la especificación IEEE 1192 (que pretendía crear un lenguaje estándar para bases de datos a partir del dBASE original, que era privado).

Finalmente, aunque hemos visto que el sistema de almacenamiento de datos vectoriales con shapefile es altamente versátil, lo que lo ha convertido en un método ampliamente usado y estandarizado, hay que decir que también tiene varias limitaciones, de las cuales se señalan a continuación algunas de las más importantes:

- No se pueden almacenar datos topológicos en shapefiles. Para ello será necesario el uso de ArcInfo o de geodatabases de desarrollo personalizado.
- Dado que los límites de las polilíneas y los polígonos se definen usando puntos, cuanto más complejas sean las formas, más puntos se requerirán, lo que implica mayor uso de memoria. Una alternativa a esto son las llamadas *curvas de bezier*, que actualmente, no son implementables en shapefile.
- Al contrario que muchas bases de datos, el formato xBASE no puede almacenar valores NULL en sus campos, lo que resta flexibilidad al almacenamiento de datos. Los valores NULL se guardan en ArGIS como 0, lo que puede llevar a errores y malas interpretaciones de los datos. Este problema se soluciona en ArcGIS usando geodatabases basadas en Microsoft Access.

Capítulo 4 .HERRAMIENTA MIMOGIS

4.1.- Modo de operación de la Herramienta. Visión Global.

La herramienta ha sido desarrollada bajo un entorno SIG, en concreto bajo el programa *ArcMAP 9.0* de *ArcGIS*. En primer lugar hay que señalar que esta herramienta no constituye de por sí un sistema de información geográfico completo, ya que, como se ha comentado en el capítulo anterior, los SIG están formados por gran variedad de elementos, aparte de las aplicaciones software, sino que se trata de una aplicación específica para el cálculo de capacidades de canales MIMO dentro del entorno *ArcGIS*. Este programa permite la visualización de todo tipo de ficheros gráficos, entre los que se encuentran ficheros del tipo *DXF*, *Raster* o *Shapefile*. De esta forma se puede obtener una visualización del entorno de propagación a simular, pudiendo situar el transmisor y todas las posiciones del receptor directamente sobre el entorno. La herramienta comenzó a ser programada por el codirector de este proyecto Rubén Ibernón Fernández, siendo la finalidad de este proyecto la de ampliar las funcionalidades de la herramienta, como el cálculo de sistemas y gestión de datos.

El fin de la herramienta es conocer la capacidad máxima en un determinado lugar, para lo que es necesario conocer la respuesta del canal. La matriz de transferencia se calcula por medio de un modelo determinista basado en el trazado de rayos (Punto 2.5.3).

En la figura 4.1 se muestran los pasos seguidos en una simulación nueva realizada bajo la herramienta desarrollada.

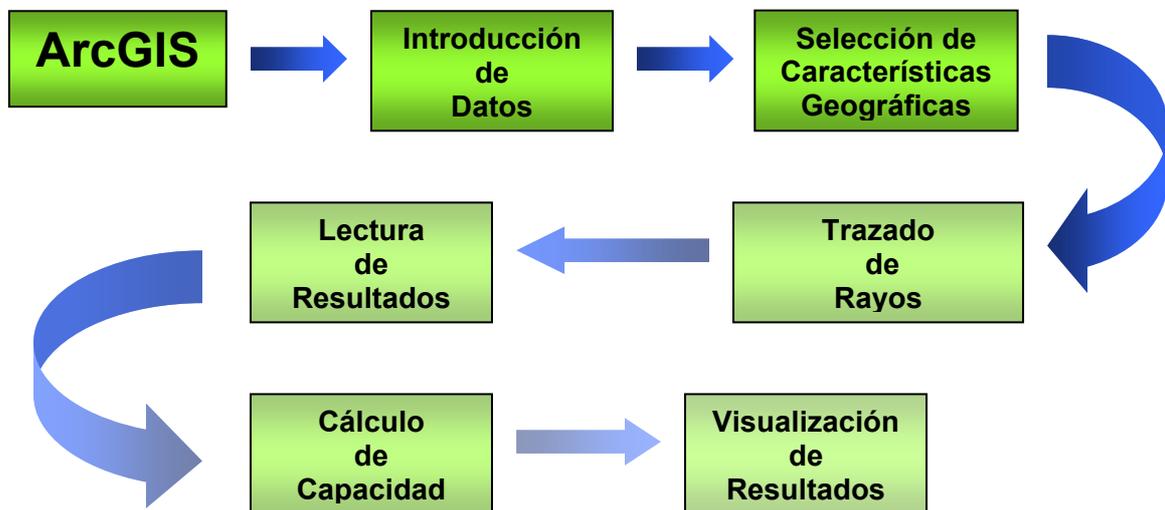


Figura 4.1. Pasos de una simulación

Como se puede observar, una vez cargada la herramienta bajo el programa *ArcMAP 9.0*, el primer paso para la realización de la simulación es la introducción de datos. Esta fase se ha programado bajo *Visual Basic*, en la que se han de rellenar distintos formularios para la recopilación de la información necesaria para realizar la simulación. Los programas en los que se apoya la herramienta necesitan de estos datos para poder realizar su función. En concreto, el trazador de rayos necesita parámetros radioeléctricos, condiciones del entorno, como puede ser la conductividad de las paredes, polarización, frecuencia, etc.; también necesita parámetros físicos, es decir, una descripción del entorno, situación del transmisor y receptor; y opciones como el número de rayos lanzados, activación de la difracción, etc. Todas estas opciones se describen en el punto 4.5 del presente proyecto, en el que se explica también en funcionamiento de este programa. El programa que calcula la capacidad también necesita el conocimiento de la relación señal a ruido, siendo el resto de datos utilizado por éste los resultados dados por el trazador de rayos.

A partir de los datos y opciones seleccionadas por el usuario en el proceso de rellenar los parámetros de simulación en los formularios, se puede controlar también el coste computacional de la simulación, quedando a elección del usuario encontrar el compromiso entre la exactitud en el cálculo y el tiempo de simulación.

Una vez introducidos los datos, estos son guardados en archivos de parámetros en un formato específico, de manera que puedan ser interpretados correctamente por el programa



trazador de rayos que se ejecutaría a continuación y los programas de cálculo de capacidades que se ejecutarían en último lugar. La programación del trazador fue realizada bajo lenguaje C, confiriéndole gran rapidez y potencia de cálculo, así como una mayor capacidad de comprensión y facilidad para ser modificado. Por su parte los programas

Realizados por fin los cálculos del trazador de rayos, se usan sus resultados, es decir, la matriz de transferencia, para calcular la capacidad en cada uno de los puntos. Los programas que realizan los cálculos de capacidad para cada uno de los tipos de simulaciones que se pueden llevar a cabo están programados en *MatLab*, ya que es la herramienta más cómoda para realizar cálculos matriciales. El cálculo de la capacidad, al igual que el trazado de rayos, se hace por llamadas a otros programas desde *Visual Basic*, los cuales se describen en el punto 4.6.

Para poder crear archivos ejecutables a partir de funciones de *MATLAB* se utiliza la función *mcc*. Para la correcta creación de los ejecutables, en primer lugar es necesario situarse desde el entorno de trabajo de *MATLAB* en el directorio donde esté el archivo con extensión *.m*, y después llamar desde la línea de comando a la función *mcc* con la opción *-m*. Una vez situado en el directorio, la línea de comando a introducir sería la siguiente:

```
mcc -m archivo.m
```

De esta forma se crea automáticamente en el mismo directorio el archivo ejecutable y el código en lenguaje C++.

La simulación finalizaría con la visualización de los resultados bajo *ArcMAP 9.0*, obteniendo así una visión de los resultados de forma sencilla. Al igual que la introducción de datos, este paso se realiza también bajo *Visual Basic*, dada su capacidad para trabajar con objetos de *ArcView*.

Finalmente, tanto los parámetros de la simulación como los resultados, quedan almacenados en una subcarpeta con el nombre de la simulación, dentro del directorio elegido por el usuario para el tipo de simulación realizada. Por lo tanto, cada simulación podrá volver a ser consultada cada vez que sea preciso para comparar resultados y llevar a cabo estudios y tareas de optimización de redes, además de ser posible cambiar algún parámetro de una simulación realizada para comprobar los cambios en el resultado debido a los nuevos datos.

Por último hay que dejar constancia de que, parte de poder calcular **sistemas** formados por varios cálculos independientes de capacidad realizados en varias simulaciones, esta herramienta es capaz a su vez de llevar a cabo tres tipos diferentes de simulación para el cálculo de capacidad, a saber: **cálculo de capacidad en recorrido lineal**, **cálculo de capacidad en una zona** determinada por el usuario y finalmente cálculo de capacidad empleando el método **SISO-to-MIMO**.

4.2.- Programa principal. Descripción de los menús de la barra de la herramienta.

El programa principal se ha de cargar con *ArcMap 9.0*, siendo el archivo principal un *“template”* bajo el nombre de **mimo.mxt**. Dentro de este archivo se encuentra programada toda la secuencia a seguir para el desarrollo de los distintos tipos de simulaciones, apareciendo el programa como una barra de herramientas en la pantalla principal de *ArcMap*, que contendrá todos los menús que nos permitirán acceder a todas las funcionalidades de la herramienta, desde simulaciones nuevas hasta consulta de datos y la Ayuda. En la siguiente figura (4.2), podemos ver el aspecto de esta barra:

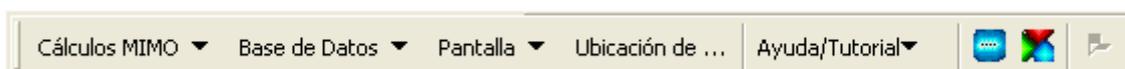


Figura 4.2. Barra principal de tareas de la herramienta MIMOGIS.

En primer lugar nos encontraremos con el menú principal de los cálculos, mostrado en la figura 4.2., donde aparecen todos los menús principales. Dentro de cada menú se agrupan las diferentes utilidades de la herramienta, organizadas en base a su funcionalidad. A



continuación veremos el contenido de cada uno de los menús y la explicación de cada una de sus funcionalidades.

4.2.1. Menú Cálculos MIMO.

Este es el menú principal de la herramienta, pues en él se encuentran todas las utilidades y opciones para realizar todos los tipos de simulación que abarca la herramienta, así como capacidad de abrir o cerrar simulaciones existentes. Haciendo “click” sobre este menú podemos ver los distintos submenús y utilidades que contiene, presentando el siguiente aspecto:

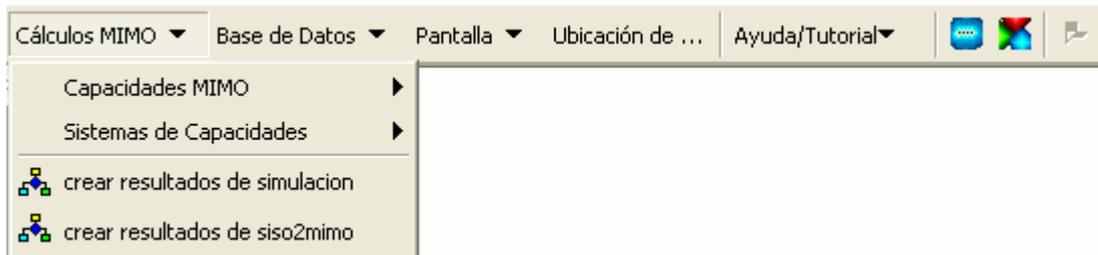


Figura 4.3. Menú Cálculos MIMO desplegado.

En primer lugar nos fijamos en los dos submenús principales, “Capacidades MIMO” y “Sistemas de Capacidades”. Estos submenús contienen los botones que activan los procesos de comienzo de una nueva simulación (de cualquiera de los tres tipos antes citados) o del cálculo de un nuevo sistema, respectivamente, teniendo también la capacidad ambos de abrir una simulación ya calculada o cerrar una abierta. En primer lugar observamos el contenido del submenú “**Capacidades MIMO**”, que tiene el siguiente aspecto una vez desplegado:



Figura 4.4. Submenú Capacidades MIMO desplegado.

Dentro de este submenú encontramos varias opciones así como otros submenús. En primer lugar nos encontramos con el submenú “**Cálculos de Capacidades**”, en el que se encuentran las opciones de comenzar una nueva simulación de cualquiera de los tres tipos citados anteriormente (y que serán explicados con más profundidad en el punto 4.6), para lo que tenemos el submenú desplegable “**Nueva Simulación**”. Así mismo, el menú desplegable “**Abrir**” nos proporciona la posibilidad de abrir una simulación ya realizada, del tipo que seleccionemos, como podemos ver en la figura 4.5:



Figura 4.5. Submenú Abrir desplegado.

Tras seleccionar el tipo de la simulación que queremos abrir, el programa nos abre inmediatamente una ventana del explorador de archivos y carpetas de Windows, apareciendo



por defecto en el directorio que está indicado en el menú “**Ubicación de...**” para ese tipo de simulación. Para abrirla simplemente deberemos seleccionar el **archivo con extensión .shp** que tenga el nombre de la simulación que deseamos ver:

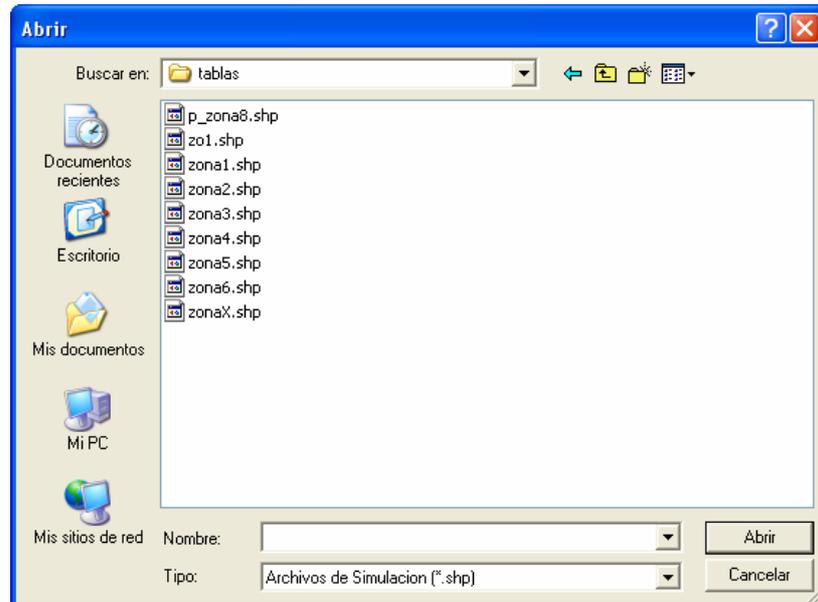


Figura 4.6. Ventana del explorador para abrir una simulación de zona.

Tras seleccionar la simulación aparecerán en la ventana principal de ArcMap todas las capas de esta simulación. Por último, la opción “**Cerrar**” borrará de pantalla las capas de la última simulación calculada o abierta.

Los botones **Parámetros de Antena Transmisora**, **Parámetros de Antena Receptora**, **Parámetros Radioeléctricos**, **Opciones del Trazador** y **Opciones de Simulación** abren los formularios que aparecen a lo largo del proceso de una nueva simulación, en los que se introducen los parámetros bajo los que se realizará y que serán explicados en el punto 4.5. Estos formularios son accesibles directamente desde el submenú ‘Capacidades MIMO’ para que el usuario sea capaz de cambiar alguno de los datos introducidos durante el proceso previo al inicio de la simulación.

Finalmente el botón ‘**Simular**’, que aparece también en la barra principal de la herramienta con el símbolo , comienza el proceso de simulación una vez introducidos todos los parámetros en los formularios y seleccionados los elementos geográficos del mapa a tener en cuenta en el cálculo, para lo que se usa el comando ‘*Select feature*’ que aparece en la barra Tools de ArcView con el icono . Hasta aquí hemos visto todo lo referido al submenú ‘*Capacidades MIMO*’, pasando a continuación a ocuparnos del submenú ‘*Sistemas de Capacidades*’.

El submenú ‘**Sistemas de Capacidades**’ incluye los comandos que llaman a todas las funciones relacionadas con el cálculo y manipulación de sistemas de capacidad. Como adelanto a lo que se explicará más adelante en el punto INSERT POINT acerca de las simulaciones de sistemas, hay que señalar que los sistemas se calculan a partir de varias simulaciones de capacidad en zona, con la idea de obtener una optimización del resultado de estas con el objetivo de ayudar a la planificación de redes MIMO.

Si pinchamos sobre el submenú, aparecerán desplegadas las funciones que podemos realizar sobre sistemas, que como podemos observar en la figura 4.7, son muy parecidas a las opciones que teníamos disponibles para las simulaciones de cálculo de capacidad.

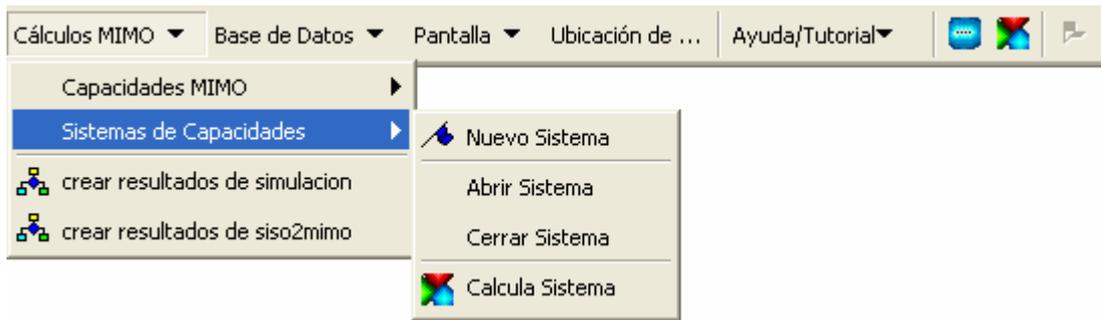


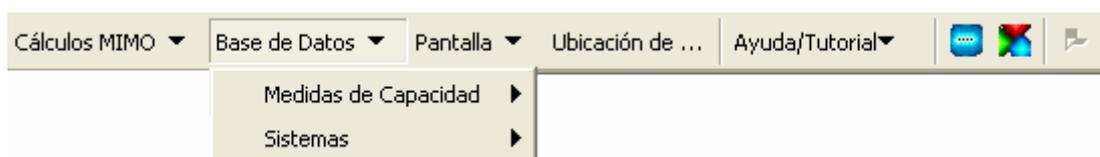
Figura 4.7. Submenú 'Sistemas de Capacidades' desplegado.

De la misma manera que ocurría para las simulaciones de capacidad MIMO, la opción de '**Nuevo Sistema**' comienza el proceso para el cálculo de un sistema de capacidades nuevo a partir de simulaciones de capacidades zona seleccionadas por el usuario, mientras que las opciones '**Abrir Sistema**' y '**Cerrar Sistema**' sirven para abrir un sistema ya calculado y para borrar las capas del último sistema abierto respectivamente. Finalmente el botón '**Calcula Sistema**' comienza el proceso de cálculo de un nuevo sistema una vez introducidos los parámetros necesarios (este proceso será explicado más en detalle en el punto 4.6). Este botón también es accesible desde la barra principal de la herramienta con el símbolo

Para terminar con el menú '*Cálculos MIMO*', observamos los botones '**crear resultado de simulación**' y '**crear resultados de siso2 mimo**' que sirven para cambiar los resultados de una simulación ya realizada de tipo recorrido lineal y Siso-to-MIMO respectivamente, de manera que para ello, se vuelve a repetir todo el proceso de simulación (que como se ha indicado será explicado en el punto 4.6), cambiando en los formularios los parámetros originales por los que se quieran introducir ahora. Al final, los resultados obtenidos serán almacenados en la simulación seleccionada, perdiéndose así los resultados originales.

4.2.2. Menú '*Base de Datos*'.

Desde este menú es donde se manejan los datos obtenidos a partir de las simulaciones realizadas, permitiéndonos acceder a estos datos de una manera más fácil y rápida para observar los resultados obtenidos y realizar estudios comparativos. Las funcionalidades de este menú se pueden observar en la figura :

Figura 4.8. Menú '*Base de Datos*' desplegado.

Los submenús que observamos en la figura 4.8. tienen las mismas funcionalidades pero mientras que el submenú '**Medidas de Capacidades**' se encarga del manejo y presentación de los datos de las simulaciones de capacidad de los tres tipos (recorrido lineal, SISO-to-MIMO y zona), el submenú '**Sistemas**', hace lo mismo para los datos de los sistemas calculados. Cada uno de estos submenús cuenta con tres tipos de funcionalidades básicas, a saber: **Consultar**, **Eliminar** y **Copiar**.

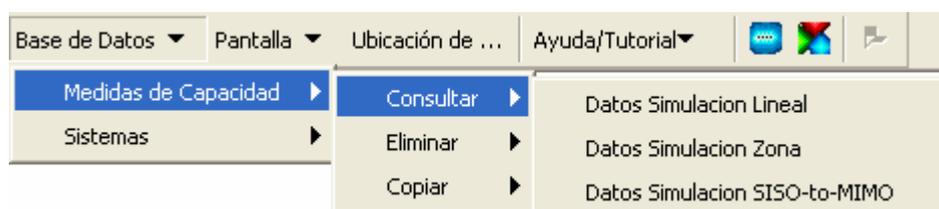


Figura 4.9. Funcionalidades del submenú 'Medidas de Capacidad'.

La opción '**Consultar**' nos permite abrir una simulación de cálculo de capacidad o un sistema que ya hayamos calculado previamente, mostrándonos tanto los parámetros de simulación como mostrando las capas correspondientes por pantalla. Los formularios empleados para esta función serán explicados más adelante en el punto 4.5.

La opción '**Copiar**' nos permite copiar una simulación de capacidad o un sistema ya existente a otro directorio y con nombre distinto, lo que permite, por ejemplo, hacer copias de seguridad de manera rápida y sencilla, ya que se copian a la nueva dirección todos los archivos relacionados con la simulación, haciendo este proceso más transparente para el usuario.

Finalmente la opción '**Eliminar**' nos permitirá borrar del disco duro cualquier simulación de capacidad o sistema existente, incluyendo esto todos los archivos relacionados con dicha simulación, facilitando también esta tarea al usuario inexperto.

4.2.3. Menú 'Pantalla'.

EL menú pantalla contiene las funcionalidades que nos permiten eliminar elementos de la pantalla principal del ArcMap que no sean necesarios o sean molestos a la hora de interpretar algún resultado. El menú tendrá el siguiente aspecto:

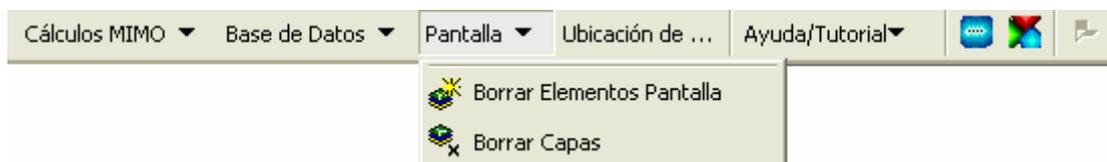


Figura 4.10. Menú pantalla desplegado.

Como podemos observar en la figura 4.10. tenemos dos funcionalidades básicas. '**Borrar Elementos de Pantalla**' nos permite borrar los dibujos presentes en la pantalla principal de ArcMap, y que en las simulaciones que puede realizar esta herramienta, dichos dibujos pueden representar desde las posiciones de transmisor y receptor, así como la posición final del receptor, hasta la zona donde se realiza un cálculo de capacidad.

Por su parte, '**Borrar Capas**', como su nombre indica, elimina todas las capas pertenecientes a alguna simulación de la herramienta que estén presentes en la pantalla principal de ArcMap, dejando de esta manera, únicamente las capas que pertenezcan a los elementos geográficos.

4.2.4. Comando 'Ubicación de...'

Este comando es el gestor de directorios de la herramienta. A partir del formulario que aparece tras pinchar sobre el botón, y que se verá en detalle en el punto 4.5, podremos seleccionar el directorio en el que queremos que se guarden los resultados de cada tipo de simulación (incluidos los sistemas). Estos directorios no tendrán por qué existir previamente, pudiendo ser creados desde el mismo formulario, agilizando así la operación.

4.2.5. Menú 'Ayuda'.

Finalmente este menú nos proporciona el comando que abre el fichero de ayuda de la herramienta, que se encuentra en el formato estándar de ficheros de ayuda html, extensión del archivo '.chm', y que proporciona al usuario una referencia rápida del funcionamiento de la herramienta y los formularios a usar en las simulaciones.

4.3.- Descripción de los formularios

En el proceso normal de una simulación nueva, lo primero que la herramienta pedirá al usuario, será la introducción de los parámetros que caractericen dicha simulación y sean necesarios para realizar los cálculos. Estos parámetros se introducirán rellenando los campos de una serie de formularios que irán apareciendo en pantalla conforme el usuario vaya avanzando en el proceso de simulación. Dichos formularios serán prácticamente los mismos para los tres tipos de simulación existentes (simulación en *recorrido lineal*, *siso2mimo* y en



zona), difiriendo de un tipo a otro, en que algunos campos estarán habilitados y otros no, según convenga al tipo de simulación. Todas las casillas de los formularios están preparadas para que sólo se puedan rellenar con el tipo y número de caracteres adecuados a cada una de ellas, de manera que si se introdujeran datos erróneos se notificaría con un mensaje de error al intentar seguir con el proceso.

Además de los formularios del proceso principal de simulación, en este apartado se explicarán los formularios de del resto de funcionalidades de la herramienta, en concreto, los relacionados con el cálculo de **sistemas**, las **bases de datos** y el gestor de directorios (menú 'Ubicación de...').

4.3.1. Formularios de las simulaciones de cálculo de capacidad.

1. **Simulación MIMO:** en este formulario se introduce el nombre de la simulación. En la parte inferior se muestra una lista con las simulaciones existentes en el directorio especificado en el menú 'Ubicación de...' para cada tipo de simulación. Si el nombre de simulación introducido ya existe se notificará con un mensaje de error. Una vez introducidos estos datos pulsar en 'Aceptar' para continuar.

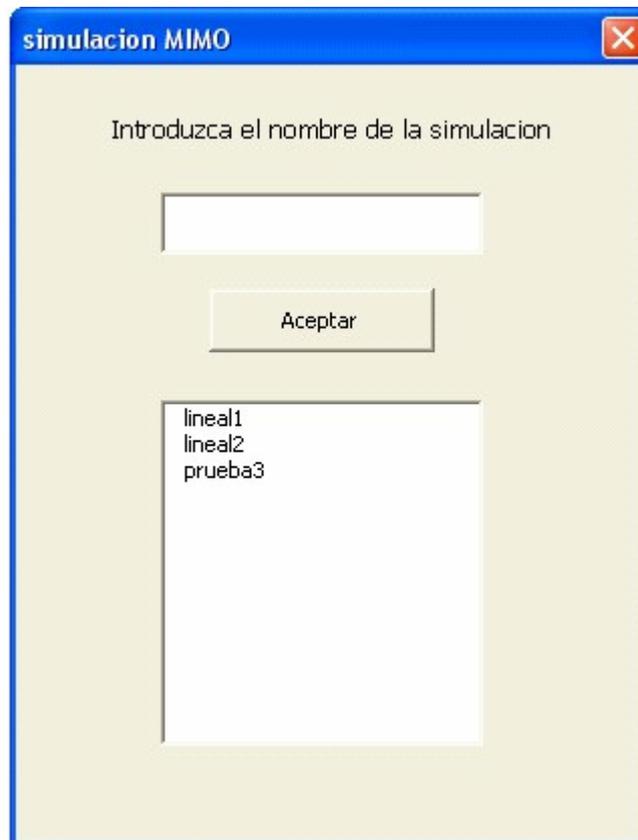


Figura 4.11. Simulación MIMO.

2. **Transmisor:** se introducen los datos geométricos de la agrupación de antenas transmisoras (coordenadas , altura, disposición de la agrupación , etc.). Pulsando el botón 'ratón' podremos situar el transmisor usando el puntero del ratón sobre la pantalla principal de ArcMap, para lo que tendremos q activar en la barra de herramientas el botón . A partir de esta posición y dependiendo de la configuración de array elegida, se dibujará en pantalla la agrupación transmisora.

Transmisor ✕

Transmisor

Coordenada x: Coordenada y:

configuración del Antenas Número de antenas Transmisoras

Altura Tx m Frecuencia MHz

Lineal

Espaciado (lambda/metros):

orientación (grados):

Circular

Radio

angulo primer elemento

Planar

Espaciado en x:

Espaciado en y:

elementos en x:

elementos en y:

Figura 4.12. Parámetros del Transmisor.

Notar que la frecuencia aquí se refiere a la frecuencia de trabajo de la señal para calcular la separación entre las antenas de la agrupación cuando esta se expresa en términos de la longitud de onda.

Se puede elegir la configuración del transmisor entre lineal, circular o planar; según esta elección se activarán las casillas correspondientes donde se introducirán los datos



necesarios para la creación de la antena. El número de antenas está limitado al rango 1 a 16. También se puede elegir la altura de los elementos y la frecuencia de trabajo.

Si se elige una configuración lineal se ha de introducir el espaciado entre elementos y la orientación del array, si se elige una configuración circular se tendrá que especificar el radio y el ángulo del primer elemento, si se elige una configuración planar se tendrá que indicar el número de elementos y el espaciado en cada dirección.

En el caso de seleccionar las distancias en metros, la antena se creará teniendo en cuenta que los datos introducidos son en metros, en caso contrario se crearán en función de la longitud de onda.

Al pinchar en el botón 'Crea Transmisor' se calculan las coordenadas de cada elemento y se muestran por medio de una tabla en el programa "Microsoft Excel". Mediante este programa podemos cambiar las coordenadas de cualquier elemento de la antena.

Si algún campo no ha sido rellenado no se creará la antena, notificándose con un mensaje.

3. **Receptor:** al igual que con el transmisor, se eligen los parámetros geométricos de la agrupación de antenas receptora. Pulsando el botón 'ratón' podremos situar el transmisor usando el puntero del ratón, para lo que tendremos que activar en la barra de herramientas el botón .

Receptor ✕

Receptor

Coordenada x: Coordenada y:

configuración del receptor Número de antenas receptoras

Lineal
Circular
Planar

Altura Rx m Frecuencia MHz

Lineal

Espaciado (lambda/metros):

orientación (grados):

Circular

Radio

angulo primer elemento

Planar

Espaciado en x:

Espaciado en y:

elementos en x:

elementos en y:

Diagram illustrating antenna array configurations:

- Linear array: Shows two antennas with a distance labeled "espaciado" and an angle labeled "orientación".
- Circular array: Shows a circular arrangement of antennas with a radius labeled "radio" and an angle labeled "angulo".
- Planar array: Shows a grid of antennas with horizontal spacing labeled "espaciado x" and vertical spacing labeled "espaciado y".

Figura 4.13. Parámetros del Receptor.

Hay que tener en cuenta que en este formulario, el cuadro donde se introducen las coordenadas del receptor sólo aparece en las simulaciones de *recorrido lineal* y *siso2mimo*, ya que para la simulación de *zona*, solo nos interesa la posición del



transmisor. Por lo demás, el formulario funciona igual que el de *Parámetros del Transmisor*.

4. **Parámetros Radioeléctricos:** en este formulario se eligen los parámetros radioeléctricos bajo los que se va a realizar la simulación. En concreto, se introduce el tipo de antena para cada elemento, la frecuencia de trabajo, la conductividad de las paredes, la permitividad relativa, si la polarización es “soft” y la relación señal a ruido.

The image shows a software dialog box titled "Parametros Radioelectricos". It has a blue title bar with a close button (X) in the top right corner. The main area is light beige and contains the following controls:

- "Tipo de antena": A dropdown menu with "Omnidireccional" selected.
- "Conductividad": A text input field containing "0.1" followed by the unit "S/m".
- "Permitividad relativa": A text input field containing "5".
- "Soft": A checkbox that is currently unchecked.
- "SNR": A text input field containing "20".
- At the bottom, there are two buttons: "<--- Atrás" on the left and "Siguiete --->" on the right.

Figura 4.14. Parámetros radioeléctricos.

Si alguno de los campos no ha sido rellenado no se podrá acceder al siguiente formulario.

5. **Opciones del trazador:** se introducen aquí los parámetros que se van pasar al programa trazador de rayos con los que creará los archivos necesarios para el cálculo de capacidades. También se indica el fichero .dxf que se tendrá en cuenta al seleccionar los elementos en pantalla, es decir, indicará la capa sobre la que podremos elegir determinados elementos geográficos a tener en cuenta para realizar los cálculos.

Opciones del trazador

Archivo DXF : casita.dxf Polyline

Rayo directo

Numero de rayos 3600

Numero maximo de reflexiones 3

Reflexion en el suelo

Transmision

Numero de maximo de transmisiones 1

Atenuación/pared (dB) 0

Difraccion

Numero de reflexiones del rayo difractado 1

Numero de transmisiones del rayo difractado 1

Separacion angular de los rayos difractados 1

Knife edge

Paredes conductoras

Doble difraccion

<--- Atrás Siguiete--->

Figura 4.15. Opciones del Trazador.

En concreto, en este formulario se le indica al trazador de rayos si debe tener en cuenta las contribuciones de rayo directo, el número de rayos lanzados desde cada elemento, el número máximo de reflexiones de cada rayo, si debe tener en cuenta la reflexión en el suelo y si se quiere activar la difracción. En el caso de activar la difracción en las esquinas se tendrá que indicar el número máximo de reflexiones de los rayos difractados y la separación angular entre ellos. También se puede indicar si se quiere que las aristas se tomen como “filo de cuchillo”, si se debe tomar las paredes como conductoras perfectas y si también debe tener en cuenta la doble difracción.

Si algún campo queda en blanco se notificará y no se podrá acceder al siguiente formulario.

6. **Opciones de simulación:** finalmente aquí se introducen los parámetros opcionales bajo los que se va a realizar la simulación, como número de posiciones en que se va a medir la capacidad, la posición final del receptor, tipo de normalización, etc. En concreto, tenemos dos opciones principales a la hora de simular: podemos elegir entre simulación de perfil de retardo, y perfil de potencia :
- a. **Perfil de Retardo :** en este tipo de simulación se estudian los cálculos de los perfiles de retardo de las diferentes contribuciones, pudiéndose elegir el número de reflexiones que deseamos.

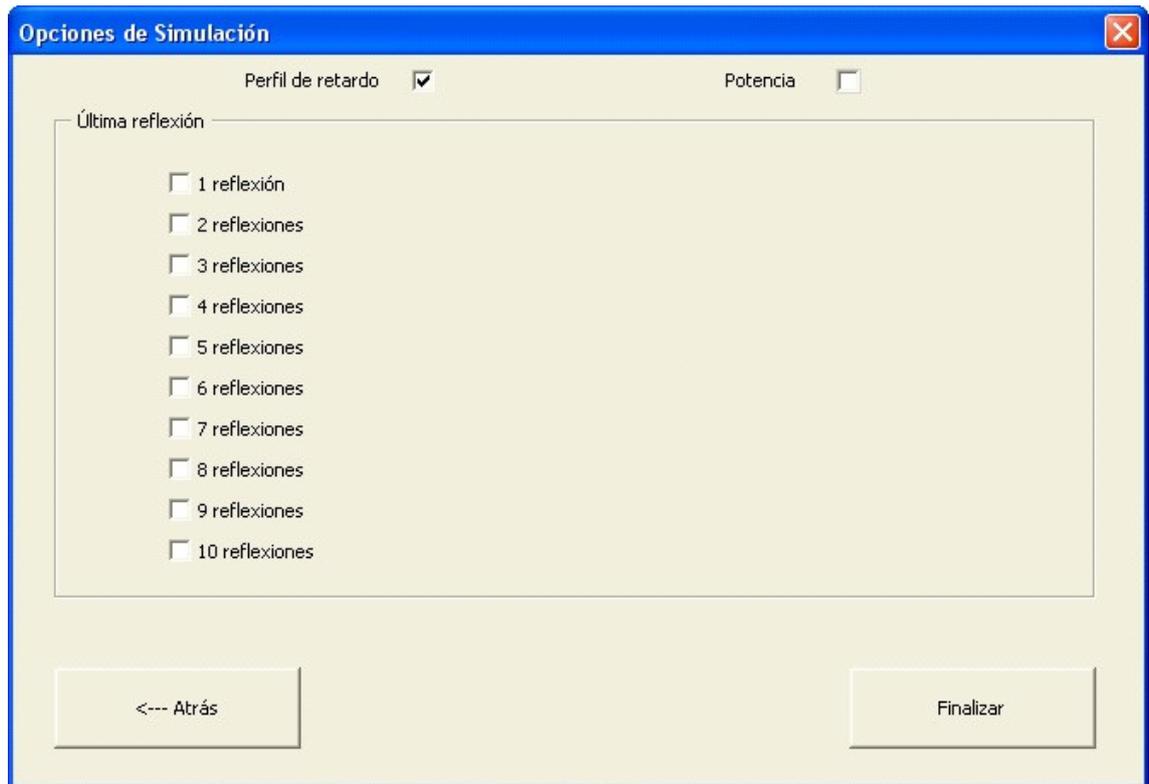
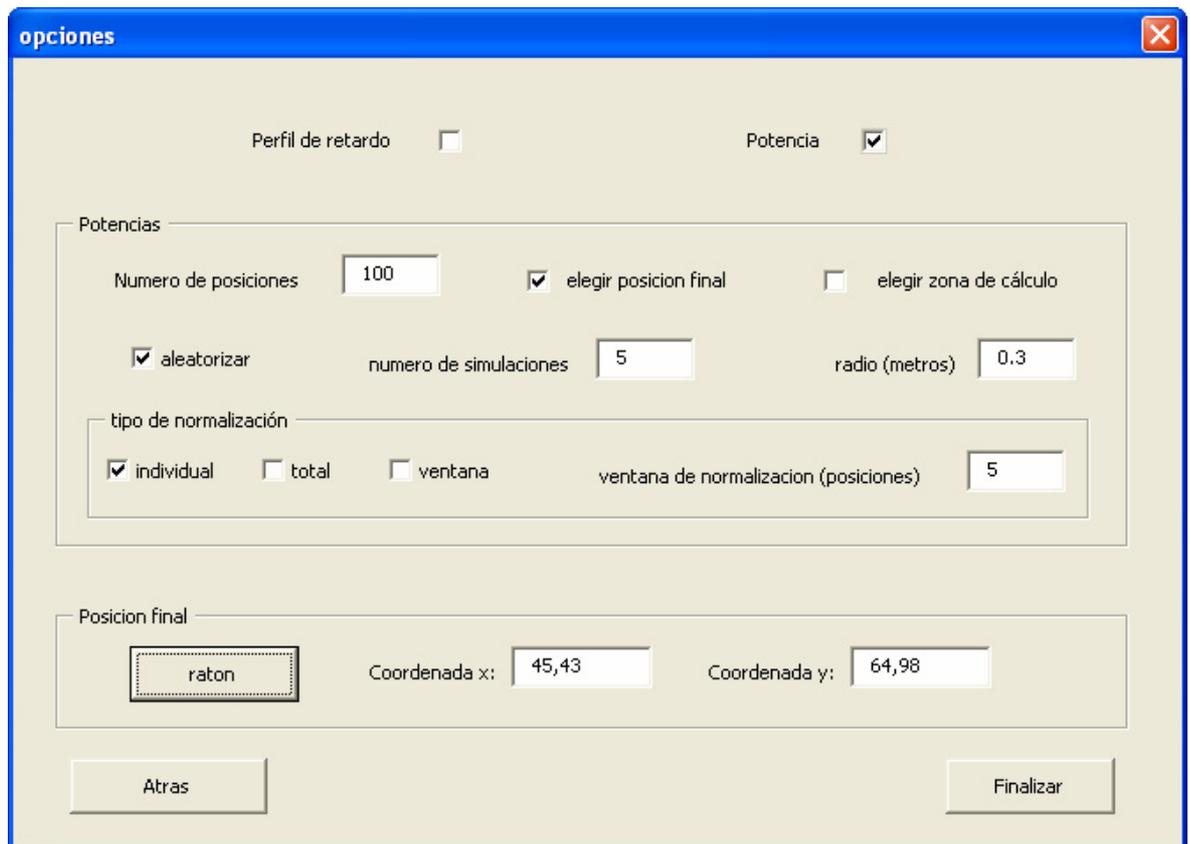


Figura 4.16. Opciones de simulación. Perfil de Retardo.

En este caso no será necesario introducir ningún dato, y el resultado de la simulación será la capacidad MIMO en el punto elegido, una gráfica en la que se representan las pérdidas en función del tiempo y otra con los ángulos de llegada de los distintos rayos.

Este tipo de simulación no se puede realizar para simulaciones tipo **zona**, por lo que esta opción no estará disponible en ese caso.

- b. **Perfil de Potencia :** en este tipo de simulación se deberá indicar, en el caso de una simulación sobre un recorrido lineal, el número de posiciones del receptor y la separación en metros entre ellos. Otra opción es elegir la posición final, para ello se debe activar la casilla 'elegir posición final', con lo que aparecerá el siguiente formulario:



opciones

Perfil de retardo Potencia

Potencias

Numero de posiciones elegir posicion final elegir zona de cálculo

aleatorizar numero de simulaciones radio (metros)

tipo de normalización

individual total ventana ventana de normalizacion (posiciones)

Posicion final

Coordenada x: Coordenada y:

4.17.Opciones de Simulación. Recorrido Lineal/Siso2mimo.

En este caso se podrá introducir de forma manual o, al igual que en el caso del transmisor y del receptor, por medio del botón 'ratón', las coordenadas del punto del último receptor, formando así una línea entre la coordenada introducida en el receptor del formulario 'Parámetros físicos' y esta coordenada.

Si se elige la opción de realizar una simulación sobre un recorrido lineal, como resultado se obtiene una gráfica en la que se representa la variación de la capacidad en función de la posición sobre la línea.

La última opción es hacer el cálculo de la capacidad sobre un área. Para ello se activará la casilla 'elegir zona de cálculo', apareciendo el siguiente formulario:

Figura 4.18. Opciones del Trazador. Zona de Cálculo.

En este caso se debe introducir en la casilla ‘*resolución*’ la distancia entre receptores consecutivos, y en las otras casillas las coordenadas del rectángulo sobre el que se calculará la capacidad. Si pinchamos sobre el botón ‘*Zona de cálculo*’ se podrá elegir este rectángulo sobre el plano, actualizándose automáticamente las casillas con las coordenadas del rectángulo elegido. En este caso el resultado será un fichero tipo “Raster” que contendrá la capacidad en cada coordenada del rectángulo elegido.

Si la simulación se va a realizar sobre una línea se puede elegir el tipo de normalización a mostrar, pudiendo elegir varias simultáneamente, teniendo que introducir el tamaño de la ventana de normalización en todo caso.

Por último, en el caso de que se elija un recorrido y que se realice una simulación *normal* (no *siso2mimo*), se puede hacer una aleatorización de la línea sobre la que se calculará la capacidad, de forma que el resultado será la media las capacidades calculadas en ese punto. Si se activa esta opción será necesario indicar el número de simulaciones y el radio donde se encontrarán los receptores calculados aleatoriamente.

Una vez introducidos todos los datos se crean los ficheros necesarios para el cálculo de la matriz de transferencia y el posterior cálculo de la capacidad. Dependiendo de las opciones introducidas, estos ficheros serán diferentes, tal y como se explica en siguiente apartado 4.4.

4.3.2. Formulario del cálculo de sistemas.

Cuando seleccionamos la opción ‘Nuevo Sistema’, aparece automáticamente el formulario de la figura 4.19.. En este formulario se introduce el nombre del nuevo sistema, así como los comentarios que el usuario quiera incluir sobre el mismo. En la parte izquierda se muestra una lista con todos los sistemas calculados anteriormente. A continuación se han de seleccionar las simulaciones de capacidad en zona ya existentes que formarán parte del sistema. Para ello se seleccionan en la lista de la parte central (‘*Medidas de capacidad existentes*’) las medidas de zona que forman parte del sistema y se pasan de una en una por medio del botón con forma de flecha a la lista de la derecha (‘*Medidas de capacidad del sistema*’). Una vez que la lista de la derecha esté completa con todas las simulaciones de zona



que queramos que formen el sistema y se haya dado nombre al nuevo sistema, se pulsará el botón 'Aceptar'.

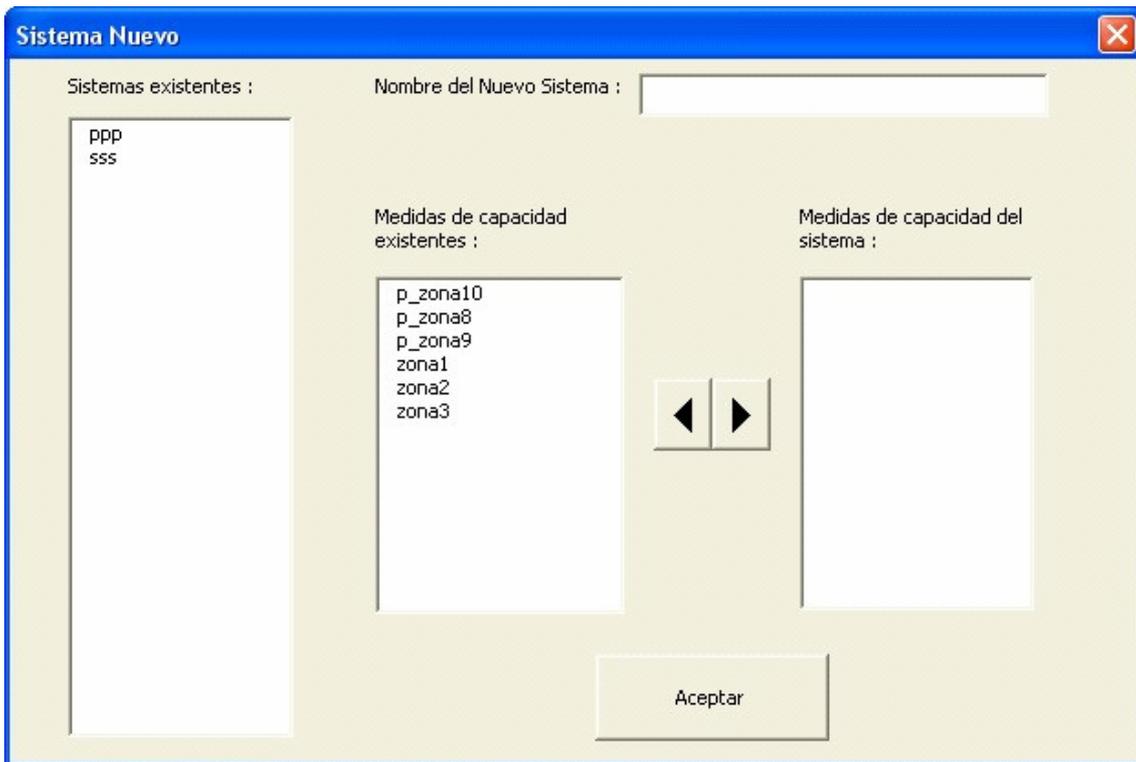


Figura 4.19.Sistema Nuevo.

Tras introducir los datos del sistema se ha de pulsar en la opción '*Calcula sistema*' dentro del menú (Cálculos MIMO → Sistemas de capacidad) o sobre el botón . Una vez realizados los cálculos, se mostrarán por pantalla los resultados: raster de pérdidas y raster de capacidad del sistema, así como los de cada una de las simulaciones integrantes.

4.3.3. Formularios de Bases de datos.

En los formularios de la opción 'Consultar' podemos observar, para cualquiera de los tres tipos de simulación, todos los datos referentes a la simulación seleccionada.

Datos capacidad MIMO -zona4 ✖

medida capacidad | transmisor | receptor | **parámetros** | opciones

Parámetros radioeléctricos

Tipo de antena: Permitividad relativa:

frecuencia: MHz Ruido Soft:

Conductividad: S/m SNR:

Parámetros del trazador de rayos

Archivo DXF :

Rayo directo: Reflexion en el suelo:

Numero de rayos: Numero maximo de reflexiones:

Transmision:

Numero de maximo de transmisiones

Atenuación/pared (dB):

Tipo pared :

Difraccion

Numero de reflexiones del rayo difractado

Numero de transmisiones del rayo difractado

Separacion angular de los rayos difractados

Knife edge Paredes conductoras Doble difraccion

Figura 4.20. Consulta de simulación den Base de Datos.

Como vemos, en el formulario se muestran todos los parámetros de simulación que se introdujeron desde los formularios para la medida de capacidad del tipo seleccionado que ya



había sido calculada anteriormente. Para ello se debe seleccionar el archivo .shp que contiene todos los datos de la simulación que queremos consultar, y que tendrá el nombre de dicha simulación. Por defecto, el explorador nos muestra la carpeta '**tablas**' de la ruta seleccionada en el menú '*Ubicación de...*' para el tipo de simulación especificada (por ejemplo, si queremos consultar una simulación de recorrido lineal, la ruta de inicio podría ser : 'C:\arcgis2\herramienta_mimo\resultados_lin\tablas').

Por su parte, si lo que queremos consultar es un **sistema**, el procedimiento será el mismo, aunque esta vez, el formulario será más sencillo, pues como vemos en la figura 4.21, esta vez solo se nos muestra el nombre del sistema, y las simulaciones de zona que lo forman:

Nombre del sistema:

Medidas de capacidad del sistema:

- zona4
- zona3

Cerrar

Figura 4.21. Consultar Sistema.

Como ya se explicaba en el apartado 4.2.2, el menú '*Base de Datos*', además de permitir consultar simulaciones y sistemas, permite también copiar y eliminar estos elementos. La funcionalidad de **copiar** una simulación o sistema en otro directorio y con nombre distinto, nos permite guardar una copia de seguridad del resultado original, en caso de que queramos crear resultados diferentes para una simulación dada (con el comando '*crear resultados de simulación*') o si quisiéramos reorganizar nuestros directorios o simplemente liberar espacio de memoria. Para este fin, el formulario que aparece tanto para sistemas como para simulaciones es el siguiente:

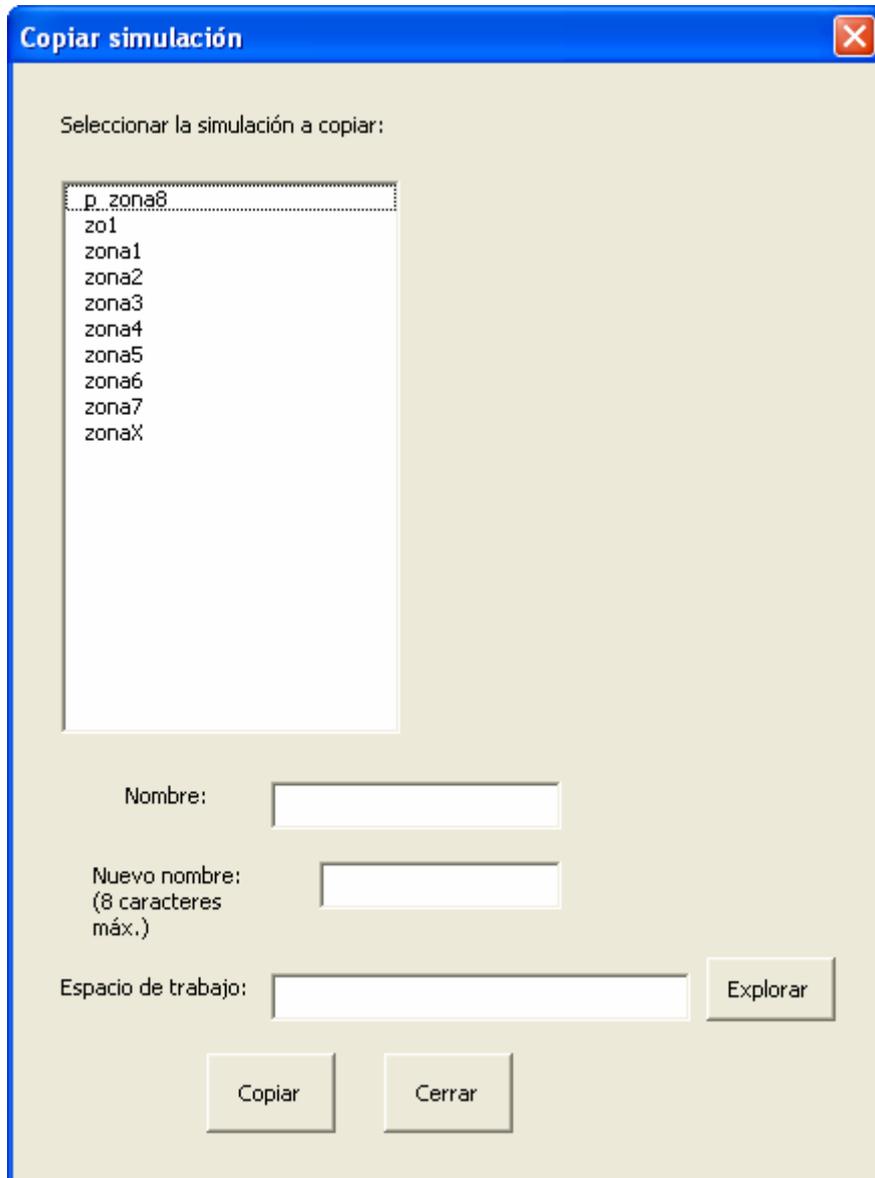


Figura 4.22. Copiar simulación / sistema.

Para hacer la copia, simplemente habrá que seleccionar de la lista la capacidad o sistema a copiar, y en la casilla 'Nuevo Nombre' escribir el nombre con que queremos guardar la copia. La capacidad o sistema seleccionado se copiará en el directorio especificado en la casilla 'Espacio de Trabajo'.

Finalmente para **eliminar** una simulación o sistema, simplemente habrá que seleccionar bien el tipo de simulación a eliminar en el submenú de la barra de la herramienta o directamente seleccionar eliminar del submenú de sistemas si lo que queremos eliminar es un sistema, apareciéndonos el formulario 4.23, en el que tenemos una lista con las simulaciones o sistemas que haya en la ruta especificada en 'Ubicación de...' para el tipo correspondiente. Para eliminar, simplemente tendremos que seleccionar la simulación o sistema que nos parezca en la lista y pulsar 'Eliminar'

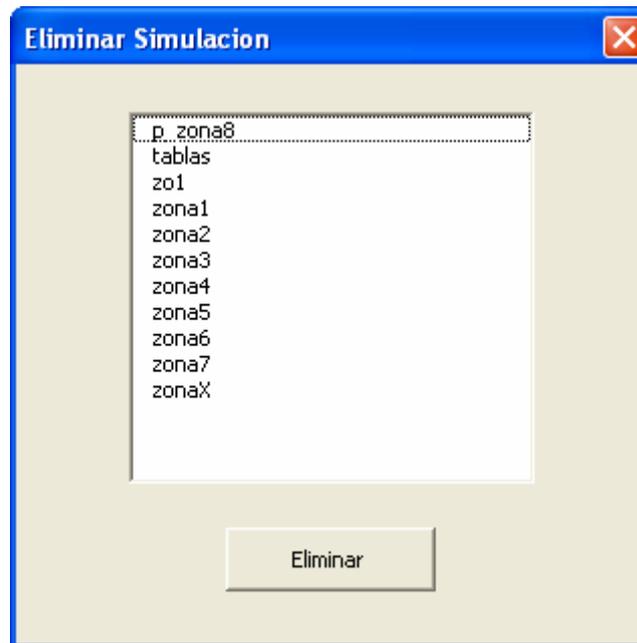


Figura 4.23. Eliminar Simulación / Sistema.

4.3.4. Formulario del comando 'Ubicación de...'

Al pulsar el comando 'Ubicación de...' de la barra principal de la herramienta, aparece automáticamente este formulario:

Figura 4.24. Formulario 'Ubicación de...'

En este formulario se introducen los directorios en los que los resultados de cada tipo de cálculo serán guardados. Cuando se desea realizar una consulta de algún cálculo, el directorio introducido en el formulario debe ser la ruta donde está ubicado dicho cálculo. Es posible cambiar cualquiera de estos directorios en cualquier momento, pero hay que tener en



cuenta que a partir del cambio, el nuevo directorio será el de referencia para el tipo de simulación que se haya hecho, lo que es muy importante, por ejemplo, a la hora de consultar datos antiguos.

4.4.- Trazador de rayos.

La aplicación utilizada realiza un trazado de rayos basado en Óptica Geométrica y Teoría Uniforme de la Difracción. Gracias a estos métodos se simplifica bastante el problema electromagnético, puesto que estos métodos suponen la utilización de teoría de rayos, con el consiguiente ahorro en el coste computacional. El uso de GO y UTD solo es posible si se usan frecuencias altas.

El trazador de rayos utilizado se basa en el realizado por Jorge Luis Rodríguez [14], y se ha modificado de forma que los resultados obtenidos corresponden a la matriz de transferencia] y modificado posteriormente por Alberto Ruiz Moreno [17] para tener en cuenta la transmisión de un rayo al impactar con un obstáculo. La forma de operar es realizando un trazado de rayos desde cada antena transmisora a cada antena receptora, pudiendo calcular de esta forma cada elemento de la matriz de transferencia. Inicialmente el trazador estaba pensado para canales Simple-Input Simple-Output (SISO) y gracias a esta modificación se pueden analizar canales en los que se empleen múltiples antenas (MIMO).

4.4.1. Características principales del trazador utilizado.

El trazador de rayos realiza un lanzamiento de rayos en dos dimensiones, desde el transmisor indicado hasta el receptor correspondiente. A partir del transmisor divide una circunferencia centrada en él en sectores constantes y lanza los rayos en incrementos del ángulo determinado.

El hecho de que el trazado de rayos se realice en dos dimensiones es debido a que los resultados obtenidos se ajustan muy bien a los experimentales en entornos microcelulares, bajando el cómputo de la simulación en comparación con el necesario en el caso de usar un lanzamiento en tres dimensiones.

Para un mejor ajuste el trazador añade la contribución correspondiente a la reflexión en el suelo, con lo que se consigue un lanzamiento pseudo 3-D, mejorando los resultados con la realidad. La altura de los edificios no es considerada, ya que en entornos microcelulares las antenas, tanto la transmisora como la receptora, están por debajo de la altura de los edificios. El trazador tiene en cuenta las paredes verticales para los mecanismos de reflexión y las esquinas, formadas por estas paredes, para el mecanismo de difracción.

El trazador está preparado para realizar simulaciones sobre canales MIMO. Un parámetro de entrada será la posición de cada elemento, tanto del transmisor como del receptor, y en función del elemento de la matriz a calcular, tomará las coordenadas de los elementos correspondientes para realizar el lanzamiento de rayos entre esos elementos.

4.4.2.- Entrada de datos.

El trazador de rayos necesita conocer en primer lugar las características físicas del entorno a simular. La descripción del entorno se basa en una discretización del mismo, sin incluir irregularidades en edificios o fachadas. El paso del entorno a la aplicación se hace mediante el formato de información vectorial, de forma que se dibuja la planta de los edificios o estructuras por medio de líneas rectas. Cada línea representa una pared vertical en el entorno a simular, pudiendo ésta corresponder a una pared de un edificio, donde la altura de ésta no tiene relevancia ya que, como se ha comentado anteriormente, el trazado de rayos se realiza en dos dimensiones y no se considera la propagación por encima de los edificios.

En la figura 4.25 se muestra un ejemplo de lo que podría ser un entorno picocelular de entrada. Se pueden observar los distintos habitáculos formados por elementos lineales que representan las paredes. En este entorno se situaría el transmisor y el receptor.

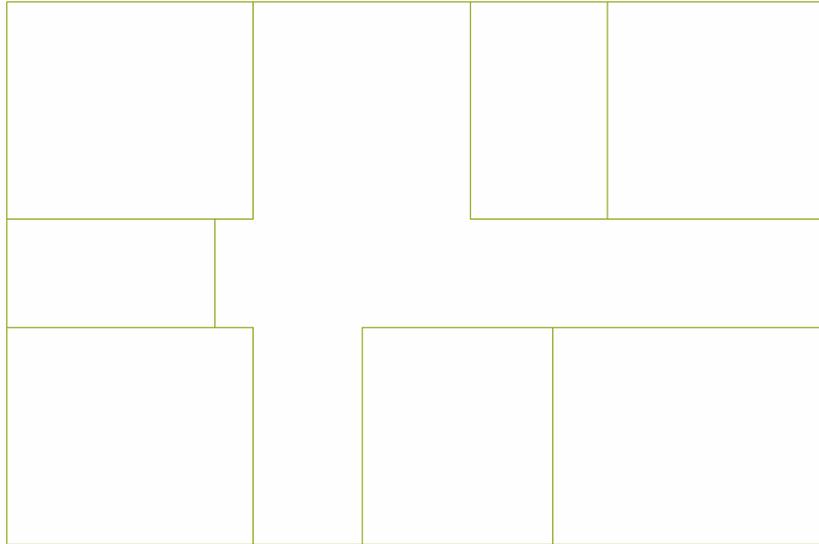


Figura 4.25. Ejemplo de un entorno picocelular.

La introducción de esta información se ha de hacer mediante ficheros con formato *DXF*. Estos ficheros se representan mediante caracteres ASCII y contienen información vectorial, pudiendo ser generados mediante programas como *AUTOCAD*.

El trazador implementado únicamente reconoce dos tipos de entidades, con las que se tendrán que representar todo el entorno. Estas entidades son *LINE* y *POLILINE*, y ambas sirven para representar rectas, con la diferencia que en la primera se describe una recta entre dos puntos y en la segunda se describen un conjunto de segmentos consecutivos.

Una vez introducido el entorno, el trazador lo descompone en segmentos básicos y les asigna propiedades eléctricas definidas por la conductividad y la permitividad dieléctrica, previamente introducida por el usuario, a partir de las cuales se calculan los coeficientes de reflexión y de difracción.

Es posible realizar dos tipos de simulación según los datos que se quieran obtener. En el caso de que se desee estudiar la potencia recibida en la determinada zona, como en un recorrido lineal o en unos puntos en concreto, se elige un perfil de potencias. Si por el contrario se quiere hacer un estudio de las diferentes contribuciones y su retardo en cada receptor se puede hacer eligiendo un perfil de retardo. En cualquier caso es necesaria la información de donde se encuentran los elementos del receptor y del transmisor previamente al inicio de la simulación. En el caso de que se elija un perfil de retardo únicamente se tendrá que indicar una posición del receptor, pero si se elige un perfil de potencias se tendrá que indicar cada una de las posiciones del receptor, o bien, si se elige un recorrido lineal, el número de puntos y la distancia entre ellos (en la dirección x e y).

Otra de las opciones que permite el trazador es elegir el tipo de antena que corresponde a cada elemento del transmisor y receptor. Podemos así elegir entre diagrama omnidireccional, dipolo en $\lambda/2$ horizontal y dipolo en $\lambda/2$ vertical.

Por último, dado que el trazador ha sido ampliado para poder analizar canales MIMO, existe la posibilidad calcular un único elemento de la matriz o calcularlos todos. En función del elemento a calcular, el trazador toma las posiciones de los elementos considerados y realiza un lanzamiento de rayos desde el transmisor hasta el receptor, devolviendo los resultados en el fichero correspondiente (**Hnm.txt**, desde el elemento n del transmisor hasta el m del receptor).

Todos estos parámetros se introducen en el trazador antes de iniciar la simulación por medio de ficheros de texto. Los ficheros necesarios se detallan a continuación, detallando algunos parámetros no comentados hasta ahora. Todos estos ficheros deben tener el nombre indicado y se tienen que guardar en el directorio donde se encuentre el fichero ejecutable



trazador.exe, que es el programa que se encarga de realizar el lanzamiento de rayos. En el caso de la herramienta programada en el presente proyecto es **c:\larcgis2\herramienta_mimo\trazador**.

4.4.2.1.- Fichero de entrada **parametos.txt**.

En este fichero se debe indicar, siguiendo el orden indicado, los siguientes parámetros a tener en cuenta al realizar la simulación:

1. Tipo de antena. Si los elementos tienen un diagrama omnidireccional se indica con '0', si es $\lambda/2$ vertical con '1' y si es $\lambda/2$ horizontal con '3'.
2. Activación del rayo directo. Si se quiere tener en cuenta el rayo directo debe tomar el valor 1, y se quiere desactivar 0.
3. Conductividad en Siemens/m.
4. Permitividad relativa.
5. Frecuencia central en hercios.
6. Tipo de polarización. Si es soft indicar con '1' y si es hard con '0'.
7. Número de antenas transmisoras.
8. Número de antenas receptoras.
9. Número de posiciones del receptor (en caso de perfil de potencias).
10. Número de rayos lanzados desde cada elemento del transmisor.
11. Número de reflexiones más una de los rayos que no sufren difracción.
12. Activación de la difracción. Si se desea activar la difracción se indica con '1', con un '0' se desactiva.
13. Activación de la reflexión en el suelo. Con un '1' se activa y con un '0' se desactiva.
14. Número de reflexiones más una de los rayos difractados después de sufrir la difracción.
15. Activación de aristas como *filo de cuchillo*. Con un '1' se activa y con un '0' se desactiva.
16. Indicación de conductividad infinita de las paredes. Con un '1' indicamos al trazador que debe tomar las paredes como conductoras, con un '0' indicamos que la conductividad es la especificada como parámetro.
17. Tipo de receptor. Con un '1' indicamos que el receptor se mueve en un recorrido lineal, con un '0' indicamos que las coordenadas de los puntos donde se encuentran los receptores los están en un fichero de texto llamado **puntos.txt**.
18. Separación angular de los rayos difractados en grados.
19. Coordenada x del primer elemento del transmisor (no es necesario especificarlo).
20. Coordenada y del primer elemento del transmisor (no es necesario especificarlo).
21. Coordenada x del primer elemento del receptor (no es necesario especificarlo).
22. Coordenada y del primer elemento del receptor (no es necesario especificarlo).
23. Distancia en la dirección x entre receptores (si se elige un recorrido lineal del receptor).
24. Distancia en la dirección y entre receptores (si se elige un recorrido lineal del receptor).
25. Espaciado entre elementos del transmisor en términos de longitud de onda (no es necesario especificarlo).
26. Espaciado entre elementos del receptor en términos de longitud de onda (no es necesario especificarlo).
27. Orientación del transmisor en grados (no es necesario especificarlo).
28. Orientación del receptor en grados (no es necesario especificarlo).



29. Tipo de simulación. Si se desea obtener un perfil de retardo indicar con '0' y si se desea un perfil de pérdidas con '0'.
30. Ruta completa del fichero DXF.
31. Activación de la transmisión. Si se desea activar la Transmisión se indica con '1', con '0' se desactiva.
32. Atenuación (dB) sufrida por la señal al transmitirse.
33. Número de transmisiones de los rayos que no sufren difracción.
34. Número de transmisiones de los rayos difractados después de sufrir la difracción.

A continuación se muestra un ejemplo de un fichero **parametros.txt** creado para una simulación:

```
// Tipo de antena (0=omnidireccional, 1=lamda/2 vertical, 3=lamda/2
horizontal
0
// rayo directo(activo si 1)
1
// sigma
0.01
// epsilon
5
// frecuencia central
2100000000
// tipo de polarizacion, (1=solft)
1
// numero de antenas transmisoras
3
// numero de antenas receptoras
3
// numero de posiciones del receptor
400
// numero de rayos
3600
// numero de reflexiones mas una (sin difraccion)
4
// activa difraccion (1)
1
// activa la reflexion en el suelo (1)
1
// numero de reflexiones mas una de los rayos difractados
2
// knife(1)
0
// paredes conductoras (1)
0
// tipo de receptor 0=punto a punto; 1=lineal
0
// separacion angular de los rayos difractados
1
// posicion x del transmisor contrado
5.97
// posicion y del transmisor contrado
5.17
// posicion x del receptor contrado
0
// posicion y del receptor contrado
0
// separacion x entre receptores (si lineal)
```



```
// separacion y entre receptores (si lineal)

// espaciado entre tx
0.5
// espaciado entre rx
0.5
// orientacion del tx
1
// orientacion del rx
1
// perfil de retardo(0), potencias(1)
1
// ruta del fichero dxf
c:\arcgis2\herramienta_mimo\trazador\pl2.dxf
// activa transmision (1)
1
// atenuacion (dB) por pared atravesada
10
// máximo número de transmisiones
2
// máximo número de transmisiones del rayo difractado
1
```

4.4.2.2.- Fichero de entrada **postx.txt**.

En este fichero se indican las coordenadas 3D de cada uno de los elementos del transmisor. El formato que se debe seguir se muestra a continuación:

```
Coord_x_elem1 Coord_y_elem1 Coord_z_elem1
Coord_x_elem2 Coord_y_elem2 Coord_z_elem2
...
Coord_x_elemN Coord_y_elemM Coord_z_elemM
```

Como se puede observar, las coordenadas de cada elemento se introducen separadas por un espacio, y cada línea corresponde a un elemento. Como ejemplo se muestra a continuación un fichero **postx.txt** creado para una simulación con tres antenas transmisoras:

```
5.97 5.17 1.8
6.04142857143 5.17 1.8
6.11285714286 5.17 1.8
```

4.4.2.3.- Fichero de entrada **posrx.txt**.

En este fichero se indican las coordenadas 3D de cada uno de los elementos del receptor. El formato es el mismo que para el caso del fichero **postx.txt** y se muestra a continuación:

```
Coord_x_elem1 Coord_y_elem1 Coord_z_elem1
Coord_x_elem2 Coord_y_elem2 Coord_z_elem2
...
Coord_x_elemN Coord_y_elemM Coord_z_elemM
```

4.4.2.4.- Fichero de entrada **matriz.txt**.

Este fichero indica la componente de la matriz de transferencia que se desea calcular. En primer lugar se indica la antena que recibe (elemento n) y en segundo lugar la que transmite (elemento m), obteniendo así el elemento $G(n,m)$ de la matriz. Si se desean calcular todos los componentes de la matriz poner como primer elemento el '0'.

Un ejemplo de fichero **matriz.txt** es el siguiente:



1 4

En este caso se calcula el elemento G(1,4). Si se desea que se calculen todos los elementos el fichero debe ser el siguiente:

0 0

4.4.2.5.- Fichero de entrada **puntos.txt**.

Si en el fichero "parametros.txt" indicamos que el tipo de receptor es punto a punto, es decir, que se desea especificar las coordenadas donde se posicionarán los receptores, es necesario este fichero como parámetro de entrada. El fichero "puntos.txt" contendrá las coordenadas en la dirección x e y, a las que se sumarán las posiciones de los elementos del receptor. Esto quiere decir que en este tipo de simulación las coordenadas de los elementos del receptor deben estar calculadas teniendo en cuenta que después se les va a sumar las coordenadas del punto donde se situará, por lo que deben ser creadas como si fuera a estar centrado en el origen.

El formato de este fichero es similar al empleado para los ficheros **postx.txt** y **posrx.txt**. Cada línea corresponde a una posición del receptor y las coordenadas están separadas por espacios. En este caso no se especifica la coordenada z. Un ejemplo de fichero **puntos.txt** es el siguiente:

```
1.4863 8.6716
1.9863 8.6716
2.4863 8.6716
2.9863 8.6716
3.4863 8.6716
3.9863 8.6716
4.4863 8.6716
4.9863 8.6716
5.4863 8.6716
5.9863 8.6716
6.4863 8.6716
6.9863 8.6716
7.4863 8.6716
7.9863 8.6716
8.4863 8.6716
8.9863 8.6716
9.4863 8.6716
9.9863 8.6716
10.4863 8.6716
10.9863 8.6716
11.4863 8.6716
11.9863 8.6716
12.4863 8.6716
12.9863 8.6716
13.4863 8.6716
```

4.4.3.- Salida de datos.

La salida de datos se realiza a través de ficheros ASCII, ubicado en el directorio **resultados** dentro del directorio donde se encuentre el archivo ejecutable del trazador (**trazador.exe**). El nombre que toman estos ficheros es **Hnm.txt**, siendo n el elemento del receptor considerado y m el elemento del transmisor. Según el tipo de simulación (perfil de retardo o de potencias) este fichero contendrá una información u otra.

En el caso de que se realice una simulación de tipo *perfil de potencias*, cada una de las filas escritas en el fichero de salida corresponde a un receptor y las columnas contienen la siguiente información:

- Columna 1. Valor de las pérdidas en el elemento n del receptor cuando transmite el elemento m del transmisor, en dB.



-
- | | |
|------------|--|
| Columna 2. | Número de contribuciones que impactan. |
| Columna 3. | Valor de la parte real del campo eléctrico recibido, en V/m. |
| Columna 4. | Valor de la parte imaginaria del campo eléctrico recibido, en V/m. |
| Columna 5. | Módulo del campo eléctrico recibido, en V/m. |
| Columna 6. | Coordenada x del elemento n del receptor. |
| Columna 7. | Coordenada y del elemento n del receptor. |

Esta información está contenida en cada uno de los ficheros de salida **Hnm.txt**, correspondiendo cada fila a cada uno de los elementos de la matriz de transferencia **G** en el punto del receptor considerado.

Si por el contrario se elige una simulación de tipo *perfil de retardo* en una determinada posición, cada fila corresponderá a una contribución que impacta en el receptor y cada columna contendrá la siguiente información:

- | | |
|-------------|--|
| Columna 1. | Valor de las pérdidas para cada impacto sobre el elemento n del receptor cuando el m transmite, en dB. |
| Columna 2. | Valor de la parte real del campo eléctrico recibido por ese impacto, en V/m. |
| Columna 3. | Valor de la parte imaginaria del campo eléctrico, en V/m. |
| Columna 4. | Módulo del campo eléctrico recibido, en V/m. |
| Columna 5. | Tiempo que tarda en llegar el rayo desde el transmisor hasta el receptor, en nseg. |
| Columna 6. | Número de reflexiones que sufre el rayo. |
| Columna 7. | Número de transmisiones que sufre el rayo. |
| Columna 8. | Coordenada x del origen del impacto. |
| Columna 9. | Coordenada y del origen del impacto. |
| Columna 10. | Coordenada x del elemento n del receptor. |
| Columna 11. | Coordenada y del elemento n del receptor. |
| Columna 12. | Ángulo en elevación de procedencia del impacto, en radianes. |
| Columna 13. | Número del rayo. |
| Columna 14. | Parámetro <i>s</i> (distancia recorrida por el rayo antes del punto de difracción). Si no hay difracción su valor es 0. |
| Columna 15. | Parámetro <i>s'</i> (distancia recorrida por el rayo después del punto de difracción). Si no hay difracción su valor es 0. |
| Columna 16. | Coordenada x de la última reflexión. |
| Columna 17. | Coordenada y de la última reflexión. |

Como se comentó en el punto de entrada de datos, si se desean calcular todos los elementos de la matriz de transferencia, el fichero de entrada **matriz.txt** debe ser "0 0", con lo que el resultado de la simulación serán **NxM** ficheros, correspondiendo cada uno de ellos a un elemento de la matriz.

4.5.- Cálculo de la capacidad MIMO.

Una vez obtenidos los resultados del trazador, el siguiente paso es el cálculo de la capacidad. Se puede observar en las expresiones necesarias para el cálculo de la capacidad MIMO, que dicho cálculo y la normalización de las matrices requieren operar sobre matrices, lo que dificulta la implementación de estas operaciones en un lenguaje de bajo nivel. Es por este



motivo por el que se ha considerado conveniente usar el lenguaje de programación *MATLAB*, dada su sencillez para operar con matrices.

Se han creado tres programas en *MATLAB* con el fin de calcular la capacidad para los diferentes tipos de simulación que se pueden realizar, los cuales se describen a continuación. Todos estos programas necesitan como ficheros de entrada uno de parámetros, que es proporcionado por el programa principal, y otro con los resultados del trazador.

4.5.1.- Programa “MIMOCAP”.

Este programa calcula la capacidad MIMO a partir de los ficheros creados por el trazador en una simulación de tipo perfil de potencias y sobre un **recorrido lineal**.

Como parámetros de entrada necesita el número de elementos del transmisor y del receptor, el número de posiciones del receptor, la relación señal a ruido, el tamaño de la ventana de normalización y el número de simulaciones realizadas sobre el mismo recorrido (aleatorización). Todos estos parámetros los toma de un fichero llamado **param.txt**, que debe estar en el mismo directorio que el archivo ejecutable **mimocap.exe**. El formato del fichero **param.txt** es el siguiente:

```
M
N
L
SNR
Ventana
Num_simulaciones
```

Donde *M* representa el número de elementos del transmisor, *N* el número de elementos del receptor, *L* el número de posiciones, *SNR* la relación señal a ruido en decibelios, ventana hace referencia al tamaño de la ventana de normalización (numero de posiciones) y Num_simulaciones indica el número de simulaciones que se han realizado cuando se hace una aleatorización. Un ejemplo de cómo debería ser el fichero **param.txt** para el cálculo de la capacidad de forma correcta a partir de una simulación en la que han considerado 8 antenas transmisoras, 4 receptoras, 100 puntos, una relación señal de 20 dB, una ventana de normalización de 5 posiciones y 3 simulaciones para aleatorizar sería el siguiente:

```
8
4
100
20
5
3
```

Este programa realiza en primer lugar una normalización mediante las expresiones 2.6, 2.8 y 2.9, y posteriormente calcula la capacidad máxima en cada punto (expresión 2.5). Tras esto escribe los resultados en un documento de texto llamado **cap.txt**, que contiene las capacidades en cada punto, siguiendo el orden desde el primer punto hasta el último tenido en cuenta en la simulación realizada con el trazador.

El código de la función principal es el siguiente:

```
function mimou (NT, NR, N, SNR)
%This program read a simulation of the ray tracing engine and calculate MIMO
capacity
clear all

%Parametres

[FID, MESSAGE] = fopen(strcat('param.txt'), 'r');
[A, COUNT] = fscanf(FID, '%d');
ST = fclose(FID);

M=A(1) %Number of transmit antennas
N=A(2) %Number of receive antennas
L=A(3) %Number of receptors
```



```
SNR=A(4)%Signal to noise rate
V=A(5)
num_puntos=A(6)

C_MIMO_S=zeros(1,L);
C_TOT_S=zeros(1,L);
C_VENT_S=zeros(1,L);
for i=1:num_puntos;
    cd(num2str(i));
    %Real MIMO matrix
    for n=1:N,
        for m=1:M,
            fich1=[deblank(num2str(n))];
            fich2=[deblank(num2str(m))];
            [FID, MESSAGE] = fopen(strcat('H',fich1,fich2,'.txt'),'r');
            [A,COUNT] = fscanf(FID,'%f');
            ST = fclose(FID);
            for t=1:L,
                H(n,m,t)=A(7*(t-1)+3)+j*A(7*(t-1)+4);
            end
        end
    end
end

cd ..

%Here, Capacity is calculated for all receiver positions
for l=1:L,%Full MIMO
    H_MIMO(:,:)=H(:,:,l);
    H_MIMO=normalize(H_MIMO,M,N);
    [C_MIMO(l),Lambdas_MIMO(:,l)]=capacity(H_MIMO,M,N,SNR);
end;
    C_MIMO_S = C_MIMO_S + C_MIMO/num_puntos

%NORMALIZAMOS TENIENDO EN CUENTA TODO EL RECORRIDO
H_NOR=normalizetot(H,M,N,L);
for l=1:L,%Full MIMO
    [C_TOT(l),Lambdas_MIMO(:,l)]=capacity(H_NOR(:,:,l),M,N,SNR);
end
    C_TOT_S = C_TOT_S + C_TOT/num_puntos

%NORMALIZAMOS TENIENDO EN CUENTA UNA VENTANA DE MATRICES
H_NOR=normalizevent(H,M,N,L,V);
for l=1:L,%Full MIMO
    [C_VENT(l),Lambdas_MIMO(:,l)]=capacity(H_NOR(:,:,l),M,N,SNR);
end
    C_VENT_S = C_VENT_S + C_VENT/num_puntos

end

fid = fopen('cap.txt','w+');
fprintf(fid,'%0.10f ',C_MIMO_S(L:-1:1));
fclose(fid);

fid = fopen('cap_tot.txt','w+');
fprintf(fid,'%0.10f ',C_TOT_S(L:-1:1));
fclose(fid);

fid = fopen('cap_vent.txt','w+');
fprintf(fid,'%0.10f ',C_VENT_S(L:-1:1));
fclose(fid);
```

Las funciones a las que se llama en el programa principal son:

- [CAP, Lambdas] = capacity(H, M, N, SNR): Función que calcula la capacidad en un punto a partir de la matriz de transferencia normalizada, el número de antenas



transmisoras y receptoras y la relación señal a ruido, devolviendo la capacidad en la variable CAP.

- $[H_NOR] = \text{normalize}(H, M, N)$: Función que realiza una normalización de la matriz H , teniendo en cuenta el número de antenas transmisoras y receptoras. La matriz H_NOR es la matriz de transferencia normalizada. La normalización llevada a cabo se realiza según la expresión 2.5.
- $[H_NOR] = \text{normalizetot}(H, M, N, L)$: Función que realiza una normalización teniendo en cuenta todo el recorrido. Sus parámetros de entrada son la matriz de transferencia, el número de antenas transmisores y receptoras y el número de posiciones del receptor. H_NOR es una matriz que contiene todas las matrices del recorrido normalizadas, es decir, es del mismo tamaño que H , pero sus valores son normalizados. Esta función usa la expresión 2.7 es la usada para el cálculo de la normalización.
- $H_NOR = \text{normalizevent}(H, M, N, L, V)$: Función de realiza una normalización por ventana. En este caso se añade el parámetro de entrada V , que es el tamaño de la ventana en número de posiciones. Los demás parámetros son los mismos que para la función *normalizetot*. Esta función devuelve la matriz H_NOR , que al igual que en el caso anterior, contiene todas las matrices del recorrido normalizadas. La normalización se realiza según la expresión 2.8.

Este programa crea tres ficheros de texto distintos (**cap.txt**, **cap_tot.txt**, **cap_vent.txt**). Cada uno de ellos contiene la capacidad en cada punto del recorrido lineal según la normalización individual, por recorrido total o por ventana, respectivamente.

Como se puede observar en el código del programa principal, al guardar los datos en los ficheros se hace de forma contraria a como están ordenados. Esto es debido a que en los resultados devueltos por el trazador la primera línea corresponde a el último punto, y la última línea al primero, con lo que de esta forma se reordenan, siendo ahora el primero que aparece el punto inicial elegido para la simulación.

4.5.2.- Programa “MIMOCAP2”

Cuando el trazador realiza una simulación de tipo perfil de potencias y se necesita la representación de la capacidad en forma de matriz por medio de ficheros *RASTER*, se utiliza este programa, ya que el fichero de salida es un archivo tipo *RASTER* con formato ASCII. Este es por tanto, el programa que calcula la capacidad en **simulaciones de zona**, ya que el resultado será un raster con la capacidad en cada punto de la zona seleccionada. Además, el formato ráster del resultado nos permitirá asociar un color a cada nivel de capacidad, por lo que el resultado final será más vistoso e intuitivo.

Como parámetros de entrada necesita el número de elementos del transmisor y del receptor, el número de posiciones del receptor, la relación señal a ruido, el número de columnas y de filas de la matriz, las coordenadas ‘x’ e ‘y’ del punto inferior izquierdo y la resolución de las celdas. Estos parámetros se han de introducir dentro de un fichero texto llamado **param.txt** y debe seguir el siguiente formato:

```
M
N
L
SNR
k
p
xi
yi
res
```

Donde M , N , L y SNR representan lo mismo que en el programa **MIMOCAP**, k el número de columnas, p el número de filas, x_i la coordenada ‘x’ inferior izquierda de la matriz, y_i la coordenada ‘y’ inferior izquierda de la matriz y res la resolución de las celdas.

La normalización y el cálculo de la capacidad se realiza de forma individual. En este caso, como fichero de salida se crea un archivo de tipo *RASTER* con formato ASCII, formado



por tantas filas y columnas como se le ha indicado en los parámetros de entrada, llamado **cap.txt**.

Un segundo archivo de salida es **hist.txt**, que contiene los datos del histograma de las capacidades calculadas en cada uno de los puntos. Este archivo se crea escribiendo las parejas capacidad-probabilidad separadas por un espacio.

El código utilizado para implementar la función principal es el siguiente:

```
function mimou(NT,NR,N,SNR)
%This program read a simulation of the ray tracing engine and
calculate MIMO capacity
clear all

%Parametros

[FID, MESSAGE] = fopen(strcat('param.txt'),'r');
[A,COUNT] = fscanf(FID,'%lf');
ST = fclose(FID);

M=A(1)%Number of transmit antennas
N=A(2)%Number of receive antennas
L=A(3)%Number of receptors
SNR=A(4)%Signal to noise rate
k=A(5)%numero de columnas
p=A(6)%numero de filas
xi=A(7)%esquina
yi=A(8)%esquina
resolucion=A(9)%resolucion de la celda

%Real MIMO matrix
for n=1:N,
    for m=1:M,
        fich1=[deblank(num2str(n))];
        fich2=[deblank(num2str(m))];
        [FID, MESSAGE] = fopen(strcat('H',fich1,fich2,'.txt'),'r');
        [A,COUNT] = fscanf(FID,'%f');
        ST = fclose(FID);
        for t=1:L,
            H(n,m,t)=A(7*(t-1)+3)+j*A(7*(t-1)+4);
        end
    end
end

%Here, Capacity is calculated for all receiver positions
for l=1:L,%Full MIMO
    H_MIMO(:,:)=H(:,:,l);
    H_MIMO=normalize(H_MIMO,M,N);
    [C_MIMO(l),Lambdas_MIMO(:,l)]=capacity(H_MIMO,M,N,SNR);
end;

%creacion del fichero raster con formato ascii
fid = fopen('cap.txt','w+');
fprintf(fid,'ncols %.0f\n',k);
fprintf(fid,'nrows %.0f\n',p);
fprintf(fid,'xllcorner %.4f',xi);
fprintf(fid,'yllcorner %.4f',yi);
fprintf(fid,'cellsize %.4f',resolucion);
fprintf(fid,'NODATA_value -9999\n');
```



```
l=L;
for i=1:p
    for j=1:k
        fprintf(fid, '%.5f ', C_MIMO(l));
        l=l-1;
    end
    fprintf(fid, '\n');
end

[PDF, xx]=hist(C_MIMO,100);
PDF=PDF/length(C_MIMO);
CDF=cumsum(PDF);
CCDF=1-CDF;

fclose(fid);
fid = fopen('hist.txt', 'w+');
for i=1:length(xx)
    fprintf(fid, '%.5f %.5f ', xx(i), CCDF(i));
end

fclose(fid);
```

4.5.3.- Programa “SISO2MIMOCAP”.

Este programa se encarga de realizar el cálculo de la capacidad MIMO a partir de una simulación SISO, según el modelo de ondas planas y paramétrico [15], siendo el utilizado por la herramienta para el cálculo de capacidad en **simulaciones de tipo siso2mimo**. La simulación en este caso es un perfil de retardo en cada punto donde se sitúa el receptor, obteniendo un listado de todos los rayos lanzados desde el elemento central del transmisor y que impactan en el elemento central del receptor, encargándose este programa de realizar el cálculo de la capacidad según ambos modelos. Este programa crea seis ficheros de texto distintos (**cap_PW.txt**, **cap_PM.txt**, **cap_PW_tot.txt**, **cap_PM_tot.txt**, **cap_PW_vent.txt**, **cap_PM_vent.txt**). Al igual que en el caso del programa **MIMOCAP**, cada uno de ellos contiene la capacidad en cada punto del recorrido lineal según la normalización individual, por recorrido total o por ventana. Las siglas *PW* y *PM* hacen referencia al tipo de modelo usado a la hora de realizar la transformación de SISO a MIMO, siendo estos modelos el de ondas planas y el paramétrico, respectivamente.

En este caso los parámetros de entrada necesarios son el número de elementos del transmisor y del receptor, el número de posiciones del receptor, la relación señal a ruido, la frecuencia, la dirección broadside de los arrays transmisor y receptor, la separación entre elementos, las posiciones del elemento central del transmisor y el tamaño de la ventana de normalización.

Al igual que en los programas anteriores, los parámetros se introducen mediante un fichero de texto, llamado **param.txt**. El formato que debe seguir este fichero es el siguiente:

```
M
N
L
SNR
frec
d_broad_tx
d_broad_rx
sep_elem_tx
sep_elem_rx
pos_x_tx
pos_y_tx
ventana
```

Donde *M*, *N*, *L*, *SNR* y *ventana* representa lo mismo que en los programas **MIMOCAP** y **MIMOCAP2**, *frec* es la frecuencia, *d_broad_tx* es la dirección broadside del transmisor y



d_{broad_rx} la del receptor, sep_elem_tx es la separación entre elementos del transmisor y sep_elem_rx es la del receptor, pos_x_tx es la posición x del transmisor y pos_y_tx es la posición y.

El primer paso realizado por este programa es la creación de la matriz de transferencia para los modelos de ondas planas y determinista a partir de la simulación SISO. En segundo lugar se realiza una normalización a través de las expresiones 2.5, 2.7 y 2.8. A partir de las matrices normalizadas se calculan las capacidades en cada punto. Finalmente se guardan los resultados en los ficheros de salida **cap_PW.txt**, **cap_PM.txt**, **cap_PW_tot.txt**, **cap_PM_tot.txt**, **cap_PW_vent.txt**, **cap_PM_vent.txt**.

A continuación se presenta el código implementado en *MATLAB* que realiza lo anteriormente explicado:

```
function siso2mimo()

%This program read a simulation of the ray tracing engine and
calculate MIMO capacity
clear all

[FID, MESSAGE] = fopen(strcat('param.txt'),'r');
[A, COUNT] = fscanf(FID, '%f');
ST = fclose(FID);

%Parametres
M=A(1) %Number of transmit antennas
N=A(2) %Number of receive antennas
L=A(3) %Number of receptors
SNR=A(4) %Signal to noise rate
frec=A(5) ; %Frequency
lambda=3e8/frec; %Wavelength

direccion_tx=(A(6)-180)/180*pi %Pointing direction of the Tx array
direccion_rx=(A(7)-180)/180*pi %Pointing direction of the Rx array

deltatx=A(8)*lambda %3*lambda;
deltarx=A(9)*lambda %lambda;

Tx0=A(10)+A(11)*j; %Posicion del transmisor
V=A(12) %ventana de normalizacion

%Here, Capacity is calculated for all receiver positions
for l=1:L,
    fich1=[deblank(num2str(l))];
    [FID, MESSAGE] = fopen(strcat('P',fich1,'.txt'),'r');
    [A, COUNT] = fscanf(FID, '%f', [16,inf]);
    H_SISO=A';
    ST = fclose(FID);

    H_SISO2MIMO_PW(:, :, l)=SISO2MIMO_PW(H_SISO,frec,direccion_tx,direccion_
    rx,deltatx,deltarx,N,M);
    H_SISO2MIMO_PW_IND=normalize(H_SISO2MIMO_PW(:, :, l),M,N);

    [C_SISO2MIMO_PW(l),Lambdas_SISO2MIMO_PW(:,l)]=capacity(H_SISO2MIMO_PW_
    IND,M,N,SNR);

    H_SISO2MIMO_PM(:, :, l)=SISO2MIMO_PM(H_SISO,frec,direccion_tx,direccion_
    rx,deltatx,deltarx,N,M,Tx0);
    H_SISO2MIMO_PM_IND=normalize(H_SISO2MIMO_PM(:, :, l),M,N);
```



```
[C_SISO2MIMO_PM(1),Lambdas_SISO2MIMO_PM(:,1)]=capacity(H_SISO2MIMO_PM_
IND,M,N,SNR);
end

%NORMALIZAMOS TENIENDO EN CUENTA TODO EL RECORRIDO
H_TOT_PM=normalizetot(H_SISO2MIMO_PM,M,N,L);
H_TOT_PW=normalizetot(H_SISO2MIMO_PW,M,N,L);
for l=1:L,%Full MIMO
    [C_TOT_PM(l),Lambdas_MIMO(:,1)]=capacity(H_TOT_PM(:, :, l),M,N,SNR);
    [C_TOT_PW(l),Lambdas_MIMO(:,1)]=capacity(H_TOT_PW(:, :, l),M,N,SNR);
end

%NORMALIZAMOS TENIENDO EN CUENTA UNA VENTANA DE MATRICES
H_VENT_PM=normalizevent(H_SISO2MIMO_PM,M,N,L,V);
H_VENT_PW=normalizevent(H_SISO2MIMO_PW,M,N,L,V);

for l=1:L,
[C_VENT_PM(l),Lambdas_MIMO(:,1)]=capacity(H_VENT_PM(:, :, l),M,N,SNR);

[C_VENT_PW(l),Lambdas_MIMO(:,1)]=capacity(H_VENT_PW(:, :, l),M,N,SNR);
end

fid = fopen('cap_PW.txt','w+');
fprintf(fid,'%10f ',C_SISO2MIMO_PW);
fclose(fid);
fid = fopen('cap_PM.txt','w+');
fprintf(fid,'%10f ',C_SISO2MIMO_PM);
fclose(fid);

fid = fopen('cap_PW_TOT.txt','w+');
fprintf(fid,'%10f ',C_TOT_PW);
fclose(fid);
fid = fopen('cap_PM_TOT.txt','w+');
fprintf(fid,'%10f ',C_TOT_PM);
fclose(fid);

fid = fopen('cap_PW_VENT.txt','w+');
fprintf(fid,'%10f ',C_VENT_PW);
fclose(fid);
fid = fopen('cap_PM_VENT.txt','w+');
fprintf(fid,'%10f ',C_VENT_PM);
fclose(fid);
```

Las nuevas funciones a las que se llama en este programa se explican a continuación (el resto están explicadas en el punto 4.5.1):

- **HMIMO_NB = SISO2MIMO_PW** (H, freq, direccion_tx, direccion_rx, deltatx, deltarx, N, M): Calcula la matriz de transferencia según el modelo de ondas planas a partir de una simulación SISO de perfil de retardo. Los parámetros de entrada son: *H*, que es una matriz que contiene todos los datos de los rayos que llegan al elemento central del receptor; *freq* es la frecuencia; *direccion_tx* es la dirección broadside del array transmisor y *direccion_rx* es la del array receptor; *deltatx* es la separación entre elementos del transmisor y *deltarx* es la separación entre los del receptor; *N* es el número de elementos del receptor y *M* del transmisor. La variable de salida, *HMIMO_NB*, contiene los datos de la matriz de transferencia, usados para el posterior cálculo de la capacidad.
- **H_SISO2MIMO_PM = SISO2MIMO_PM** (H_SISO, freq, direccion_tx, direccion_rx, deltatx, deltarx, N, M, Tx0): Calcula la matriz de transferencia según el modelo determinista a partir de una simulación SISO de perfil de retardo. Los parámetros



de entrada son los mismos que en la función **SISO2MIMO_PW** explicada anteriormente, añadiendo el parámetro $Tx0$ que representa la posición del transmisor (es un número complejo en el que la parte real representa la coordenada 'x' y la parte imaginaria la coordenada 'y'). Igual que en el caso anterior, la variable de salida $H_SISO2MIMO_PM$ contiene la matriz de transferencia calculada a partir de este modelo.

4.6.- Proceso de Simulación paso a paso.

Una vez vistos el programa trazador, que calculaba los ficheros de la matriz de transferencia de las antenas para las condiciones introducidas por el usuario, y los programas de cálculo de capacidades para los diferentes tipos de simulaciones, es el momento de tratar el proceso que debe seguir el usuario de la herramienta MIMOGIS para realizar una simulación de cualquiera de los tipos disponibles bajo el programa principal, programado en *Visual Basic*, y estudiar las operaciones realizadas por el mismo.

Hay que tener en cuenta que los procesos de simulación para el cálculo de capacidades en cualquiera de sus tres formas (lineal, zona, siso2mimo) son totalmente diferentes del proceso de cálculo de un sistema, ya que en este último no intervienen ni el trazador ni ninguno de los programas de cálculos de capacidad vistos en 4.5, ya que en este caso, los cálculos se hacen desde el código principal de la herramienta en *Visual Basic* sobre los ráster resultantes de las *simulaciones de zona* existentes que formen el sistema.

En primer lugar, cuando se pincha en una de las opciones de nueva simulación se procede a la llamada de una función diferente en cada caso. Todas tienen en común que cambian el texto de la variable de tipo **TextBox** llamada **simulacion.tipo**. Asimismo, cada una de ellas establece como directorio predeterminado para el tipo concreto de simulación seleccionado durante el resto del proceso de simulación, aquel correspondiente a su casilla en el menú 'Ubicación de...' y que se guardará en la variable **rutas.'tipo_de_simulacion'**.

Una vez llegados a este punto se carga el formulario **simulacion** para recoger el nombre de la nueva simulación, o bien, visualizar resultados de simulaciones realizadas anteriormente. A partir de este paso, se comentará cada opción por separado.

4.6.1. Nueva Simulación en recorrido lineal.

En este caso la variable **simulacion.tipo** toma el valor "lineal". A partir de aquí se procede, tras pulsar el botón 'Aceptar', a comprobar la existencia del nombre de la simulación. En caso de que no exista se lleva a cabo la simulación, continuando por mostrar los formularios para la introducción de los datos, hasta que se llega al último (Opciones). Al pulsar en 'Finalizar' el último formulario se cierra y un mensaje nos dice que pulsemos el botón 'Simular' para comenzar la simulación.

En este momento se pueden seleccionar elementos geográficos concretos de la capa DXF seleccionada en el formulario '*Opciones del trazador*' para que sólo esos elementos sean tenidos en cuenta a la hora de hacer los cálculos. Esta operación puede ser llevada a cabo gracias al comando '*Select Feature*' de la barra de herramientas '*Tools*' de *ArcMap*, que aparece con el símbolo  (como ya se adelantó en el punto 4.1).

Es necesario en cualquier caso que hayan elementos seleccionados (bien sea todo el DXF o sólo algunas de sus partes) ya que si no, no se podrá comenzar el proceso de simulación. Una vez seleccionados los elementos geográficos y pulsado el botón 'Simular' (con símbolo ) el conjunto de elementos seleccionados será guardado automáticamente en un archivo .dxf temporal llamado **p12.dxf** en la carpeta **C:\arcgis2\herramienta_mimo\trazador** donde se sobrescribirá la capa de elementos seleccionados cada en cada nueva simulación, siendo el archivo dxf calculado por la función **calcula.dxf** a partir de los elementos seleccionados. **Este proceso es común a los tres tipos de simulaciones** (recorrido lineal, zona y siso2mimo)

Una vez hecho esto, comienza el proceso de cálculo propiamente dicho. En primer lugar se crean los ficheros con las posiciones iniciales de las antenas (**postx.txt** y **posrx.txt**), el



fichero de parámetros del trazador y el fichero de parámetros necesario para el programa que calcula la capacidad. Este último fichero, al contrario del resto, se crea en el directorio **c:\arccgis2\herramienta_mimo\trazador\resultados**, donde se encontrarán los resultados tras la ejecución del trazador y se ejecutará el subprograma que calcula la capacidad. En el caso de que se elija una zona sobre la que calcular la capacidad, se creará también el fichero de puntos que necesita el trazador de rayos.

Al comenzar la simulación, si se ha activado la opción de “perfil de retardo”, se realiza una simulación de este tipo desde el primer elemento del transmisor al primero del receptor, obteniendo así una lista con todos los rayos que se han lanzado desde el transmisor y han alcanzado al receptor. El siguiente paso, tanto si se elige “perfil de retardo” como si se elige “perfil de potencias”, es lanzar el trazador $M \times N$ veces (numero de antenas transmisoras y receptoras respectivamente), cambiando el fichero **matriz.txt** en cada ejecución para obtener la matriz de transferencia y poder así calcular la capacidad. En el caso de que se desee aleatorizar (únicamente posible para recorridos lineales y simulaciones normales) se lanzará $M \times N \times \text{num_simulaciones}$ veces.

Cada matriz de transferencia calculada por el trazador se guarda en el directorio **c:\arccgis2\herramienta_mimo\trazador\resultados\num_simulacion**, para el posterior cálculo de la capacidad por el programa “**mimocap.exe**”.

Una vez que el trazador ha terminado de calcular la matriz de transferencia y la ha guardado en el directorio correspondiente, se copia desde el directorio **c:\arccgis2\herramienta_mimo\ejecutables** el programa **mimocap.exe** al directorio principal de resultados **c:\arccgis2\herramienta_mimo\trazador\resultados** para su posterior ejecución.

Cuando se ha terminado de calcular la capacidad se llama a la función **capacidad.tabla** que almacena en una tabla con formato **shapefile** (compuesto de tres archivos de extensión **.dbf**, **.shp** y **.shx** los tres del mismo nombre) los valores de todos los parámetros de simulación introducidos en los formularios, guardando este archivo en la carpeta **c:\rutas.capcidades_mimo_lin\tablas**, lo que facilitará la posterior consulta de la simulación. Una vez hecho esto y creados los archivos que contienen los resultados, se copian todos los resultados al directorio **c:\rutas.capcidades_mimo_lin\nombre_simulacion** para que sea posible su posterior consulta.

Llegados a este punto, lo último que se ha de realizar es la lectura de resultados y adecuación para su visualización. Para poder mostrar gráficas en el programa ArcMAP es necesario pasar los resultados a tablas (extensión **dbf**). Las tareas de adecuación y visualización las realizan las funciones **calcula.capacidad**, **grafico.cap_potencia**, **lee_fich.retardo** y **grafico.rayos**.

La función **calcula.capacidad** se encarga de pasar los datos producidos por el programa **mimocap.exe** en una simulación sobre un recorrido lineal o de perfil de retardo a una tabla llamada **captot_nombre_simulacion** que contendrá las coordenadas de los puntos, y la capacidad según las distintas normalizaciones en cada uno de los puntos.

La función **grafico.cap_potencia** utiliza la tabla creada por la función **calcula.capacidad** para mostrar por pantalla una gráfica en la que se representa la variación de la capacidad en función de la posición del receptor.

La función **lee_fich.retardo** lee el fichero creado a partir de la simulación de perfil de retardo y dibuja el rayo directo, los reflejados una vez, y los difractados.

Por último, la función **grafico.rayos** crea una tabla en la que se encuentran todos los datos de los rayos que alcanzan al receptor en una simulación de perfil de retardo, además de dibujar por pantalla el ángulo de los rayos que alcanzan al receptor en función de las pérdidas sufridas por el mismo, así como su retardo en función del retardo.

El resultado de este tipo de simulación será pues un conjunto de puntos (tantos como los seleccionados por el usuario en el formulario ‘*Opciones de Simulación*’) a lo largo del recorrido lineal, cada uno con su valor correspondiente de capacidad junto con una gráfica que represente la evolución de la capacidad a lo largo del recorrido.

4.6.2. Nueva simulación en zona.



El proceso para este tipo de simulación es similar al de la simulación de recorrido lineal, con la variación de que, además de que la variable **simulación.tipo** toma el valor “zona”, una vez se han realizado los cálculos del trazador, y calculado las tablas, el programa que se debe copiar de **c:\arccgis2\herramienta_mimo\ejecutables** y ejecutar en el directorio **c:\arccgis2\herramienta_mimo\trazador\resultados** es el **mimocap2.exe**.

Además, para la adecuación de los resultados para su visualización será necesario pasar los resultados a ficheros RASTER. Estas tareas serán llevadas a cabo por las funciones **lee_fich.raster**, **grafico.CreateRasterDataset**, **lee_fich.histograma** y **grafico.histograma**.

La función **lee_fich.raster** se encarga de convertir los puntos en comas del archivo de salida **cap.txt** del programa **mimocap2.exe** para que la función **grafico.CreateRasterDataset** pueda convertir correctamente este archivo que contiene un fichero raster con formato ASCII. Esta última función se encarga también de mostrar por pantalla el mapa creado.

La función **lee_fich.histograma** se encarga de leer el archivo **hist.txt**, también creado por el programa **mimocap2.txt** y pasar los datos a una tabla con el fin de poder mostrar la gráfica. Esta tabla se llama **histograma_nombre_simulacion** y contiene los datos del histograma de la capacidad sobre la superficie simulada. Estos datos son utilizados por la función **grafico.histograma** para mostrar por pantalla el histograma de la capacidad en la superficie de la simulación.

Hay que tener en cuenta que los resultados de esta simulación se guardarán el directorio **c:\rutas.capacidades_mimo_zona\nombre_sim**, siendo la variable **rutas.capacidades_mimo_zona** el directorio especificado en el menú ‘Ubicación de...’ para las simulaciones de zona.

Finalmente, el resultado de este tipo de simulación se representará sobre el mapa principal como dos capas que ocuparán la zona de cálculo designada por el usuario, y que representarán cada una los valores de capacidad y pérdidas respectivamente, en una escala de colores indicada en la ‘*tabla de contenidos*’ (*Table of contents*) de la ventana principal de *ArcMap*.

4.6.2. Nueva Simulación *siso2mimo*.

Cuando se hace una simulación de este tipo, la variable **simulacion.tipo** toma el valor “*siso2mimo*”. Al igual que en el caso de una simulación normal, se comprueba que el nombre de la simulación no coincide con ninguna de las simulaciones existentes.

Una vez hecho esto, se pasa a mostrar los formularios para la introducción de datos. En este caso, el único tipo de simulación posible a realizar es sobre un recorrido lineal.

Tras pulsar el botón ‘Finalizar’ del formulario opciones comienza la simulación, creándose los ficheros necesarios para el trazador y el programa que calcula la capacidad, en este caso llamado **siso2mimocap.exe**. Hay que tener presente que en este tipo de simulación las antenas deben tener un número impar de elementos y únicamente son válidos arrays lineales. Los ficheros **postx.txt** y **posrx.txt** contendrán únicamente la posición del elemento central de las antenas transmisora y receptora respectivamente.

Cuando se comienza a lanzar el trazador, el fichero **matriz.txt** no cambia, ya que solamente se realizará una simulación SISO en cada punto desde el elemento central de la antena transmisora hasta el central de la receptora, haciendo una simulación de perfil de retardo en cada uno de los puntos de la recta para estos dos elementos. En este caso, lo que cambia en cada ejecución del trazador es el fichero **posrx.txt**, ya que la posición del receptor cambia para cada ejecución.

Cada fichero devuelto por el trazador con el nombre **H11.txt** se mueve a uno con el nombre **Pl.txt**, donde *l* es la posición del receptor. Esto se hace antes de cada ejecución del trazador para que no se sobrescriban los datos y se pueda calcular posteriormente la capacidad con el programa **siso2mimo.exe**.



Una vez que se tienen todos los perfiles de retardo en cada punto se copia el programa **siso2mimocap.exe** en el directorio **c:\larcgis2\herramienta_mimo\trazador\resultados** y se procede a su ejecución.

Se obtienen así los seis ficheros de salida. Tras ser copiados todos los resultados a la carpeta **c:\rutas.capacidades_siso2mimo\nombre_sim** (donde **rutas.capacidades_siso2mimo** es la ruta especificada para simulaciones **siso2mimo** en el menú 'Ubicación de...'), son leídos por la función **calcula.cap_siso2mimo**. Esta función es similar a **calcula.capacidad** explicada en el punto anterior, siendo una adaptación para este tipo de simulación.

Por último, los resultados son mostrados por la función **grafico.siso2mimo**, que se encargará de presentar un gráfico en el que se muestra la variación de la capacidad en función de la posición comparando el modelo de ondas planas y el paramétrico.

4.6.3. Cálculo de sistema.

Como ya se indico en puntos anteriores, el cálculo de sistemas no requiere la intervención de programas externos, ya que lo que se pretende con este tipo de simulaciones, es realizar un cálculo de optimización de capacidad MIMO en zona, a partir de los resultados de varias simulaciones de capacidad en zona existentes.

En primer lugar se deben seleccionar las simulaciones de zona que queremos que formen parte de nuestro sistema, pudiendo elegir entre aquellas que se encuentren en el directorio **c:\rutas.capacidades_mimo_zona**, y que aparecerán en la lista de simulaciones existentes en el formulario 'Sistema Nuevo'. Usando los botones de flechas, podremos seleccionar las simulaciones pasando las que queramos a la lista de simulaciones del sistema.

Una vez hecho esto, habrá escribir el nombre del sistema, que no debe coincidir con ninguno de los que haya en la lista de sistemas existentes del mismo formulario, o de lo contrario saldrá un mensaje de error. Los datos del sistema (nombre del sistema, simulaciones que lo componen y nombres de las simulaciones) serán almacenados en una tabla (.dbf) de la misma manera que los datos de las simulaciones de capacidad, aunque en este caso, serán almacenados en el directorio **c:\rutas.sistemas\ficheros**, siendo **rutas.sistemas** la variable que guarda la ruta indicada en el menú 'Ubicación de..' para los sistemas.

Tras esto pulsaremos el botón 'Aceptar' y comenzará el proceso de cálculo. Este es llevado a cabo por la función **sistema.calcula**, que a su vez hace llamadas a las funciones **sistema.cap** y **sistema.perd**.

La función **sistema.cap** se encarga de calcular el raster de capacidad del sistema que se calcula como un raster cuyas dimensiones serán la suma de las dimensiones individuales de cada uno de las simulaciones de zona que lo componen, siendo el valor de capacidad en cada punto del raster del sistema, el **valor máximo de capacidad** en dicho punto de entre todas las simulaciones individuales superpuestas. Esto nos dará como resultado, una capa cuyos valores de capacidad serán los máximos posibles de entre todas las simulaciones, lo que servirá, por ejemplo, posibilidades para optimizar resultados y mejorar la planificación de redes de antenas de canal MIMO. El resultado de esto se guarda en el directorio **c:\rutas.sistemas\nombre_sistema"_cap"**.

Por su parte, **sistema.perd** hace lo mismo pero para los raster de pérdidas de las simulaciones de zona integrantes del sistema. No obstante, en este caso no se calculará el máximo de pérdidas en cada punto, sino que será el **mínimo valor de pérdidas en cada punto**, ya que, como hemos comentado, lo que nos interesa para planificación de redes MIMO son los resultados más optimizados posibles. El resultado de esto se guarda en el directorio **c:\rutas.sistemas\nombre_sistema"_perd"**.

4.6.4. Crear Resultados de Simulación normal y Siso2mimo.



Existe la posibilidad de poder visualizar resultados sobre ArcMap de simulaciones realizadas directamente sobre el trazador de rayos sin el uso de la herramienta. En este caso, la única información que posee el usuario son los ficheros devueltos por el programa de lanzado de rayos.

Para que esta opción funcione correctamente los resultados se han de depositar en el directorio **c:\arccgis2\herramienta_mimo\resultados\nombre_sim\num_simulacion**.

También será necesario introducir todos los datos con los que se realizó la simulación, siendo la única diferencia con una *simulación normal* que no se ejecuta el trazador de rayos.

Al igual que en caso anterior, para la *siso2mimo*, es una forma de visualizar los resultados creados por el trazador en una simulación realizada independientemente de la herramienta. La única diferencia que existe entre esta opción y una *simulación siso2mimo* es que no se ejecutará el trazador, ya que los datos ya están presentes.

Los datos creados por el trazador se han de depositar en el directorio **c:\arccgis2\herramienta_mimo\resultados\nombre_sim** para un correcto funcionamiento.

4.7.- Directorios.

- C:\rutas.tipo_de_simulacion

Los directorios indicados para cada tipo de simulación en el menú '**Ubicación de...**' son guardados en el archivo **dir.txt**, que posteriormente son leídos en la función **rutas()**. En cada uno de estos directorios se guardarán los resultados de las simulaciones en subdirectorios que toman el mismo nombre de la simulación. En cada subdirectorio se guardan los ficheros con las coordenadas de los elementos de las antenas con los que se realizó la simulación, los resultados devueltos por el trazador en la última ejecución, los ficheros de texto que contienen las capacidades en cada punto según la normalización, el ejecutable que creó estos ficheros, el archivo de parámetros que necesita este ejecutable, el fichero "shape file" o "raster" creado con los resultados finales de la simulación y la carpeta '**tablas**' (o '**fichero**' para los sistemas) con las tablas que contienen los parámetros de la simulación.

- C:\arccgis2\herramienta_mimo\trazador

En este directorio se encuentra el trazador de rayos. Se encuentra compilado bajo "Windows XP". En el caso de necesitar recompilarlo se debe tener en cuenta que el ejecutable final se debe llamar **trazador.exe**.

- C:\arccgis2\herramienta_mimo\ejecutables

En este directorio se encuentran los ejecutables que leen los resultados del trazador y calculan la capacidad. En el caso del cálculo de la capacidad sobre una línea el archivo es **mimocap.exe**, si es sobre una zona se utiliza el archivo **mimocap2.exe**, y si la simulación es de tipo *siso2mimo* se utiliza el archivo **siso2mimocap.exe**.

- C:\arccgis2\herramienta_mimo\matlab

En este directorio se encuentra el código en lenguaje de *MATLAB* con el que se han creado los ejecutables **mimocap.exe** y **mimocap2.exe**.

La creación del ejecutable se realiza a través de *MATLAB*, introduciendo una de las siguientes líneas, dependiendo si se quiere modificar el fichero **mimocap.exe** o el **mimocap2.exe**:

- `mcc -m c:\arccgis2\herramienta_mimo\matlab\mimocap.m -o c:\arccgis2\herramienta_mimo\ejecutables\mimocap`
- `mcc -m c:\arccgis2\herramienta_mimo\matlab\mimocap2.m -o c:\arccgis2\herramienta_mimo\ejecutables\mimocap2`

Automáticamente se crea el fichero **mimocap.exe** o **mimocap2.exe** en la carpeta **c:\arccgis2\herramienta_mimo\ejecutables**.



- C:\arcgis2\herramienta_mimo\siso2mimo

En esta carpeta se encuentra el código en lenguaje de *MATLAB* con el que se ha creado el ejecutable **siso2mimocap.exe**. Si se desea volver a crear el ejecutable se debe ejecutar la siguiente línea desde *MATLAB*:

- `mcc -m c:\arcgis2\herramienta_mimo\matlab\siso2mimocap.m -o c:\arcgis2\herramienta_mimo\ejecutables\siso2mimocap`

Capítulo 5. RESULTADOS



A modo de ejemplo, para mostrar visualmente las capacidades de esta herramienta, se va a proceder a mostrar los resultados reales obtenidos a partir de la realización de simulaciones de todos los tipos que se han tratado, incluidos los sistemas. Para ello disponemos de un entorno picocelular que representa una posible planta de un edificio.

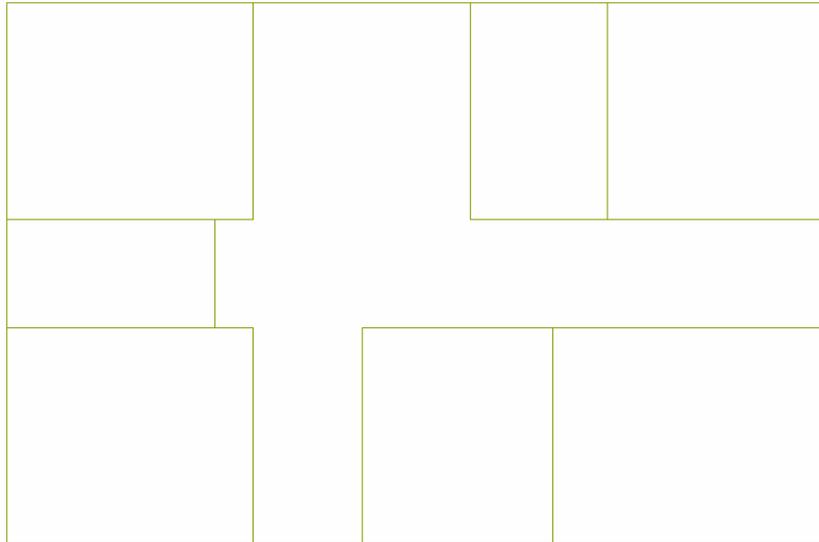


Figura 5.1. Planta de edificio.

5.1.- Simulación de un recorrido lineal.

Se ha realizado una simulación en la que se ha situado un array lineal de 4 elementos omnidireccionales transmisores con una separación de media longitud de onda, donde el primer elemento está situado en el punto(9,529459 4,995517), con una orientación de cero grados (paralela al pasillo donde se encuentra). La frecuencia de trabajo es de 2,1 GHz y el receptor tiene la misma configuración, pero se encuentra en el punto (5,319512 1,786140), y se moverá sobre una línea hasta el punto (6,603262 9,092192), teniendo éste la misma orientación que el transmisor. Además, para los cálculos de capacidad, solo se han tenido en cuenta las paredes del pasillo, resaltadas en azul en la figura 5.2 que muestra el resultado de esta simulación.

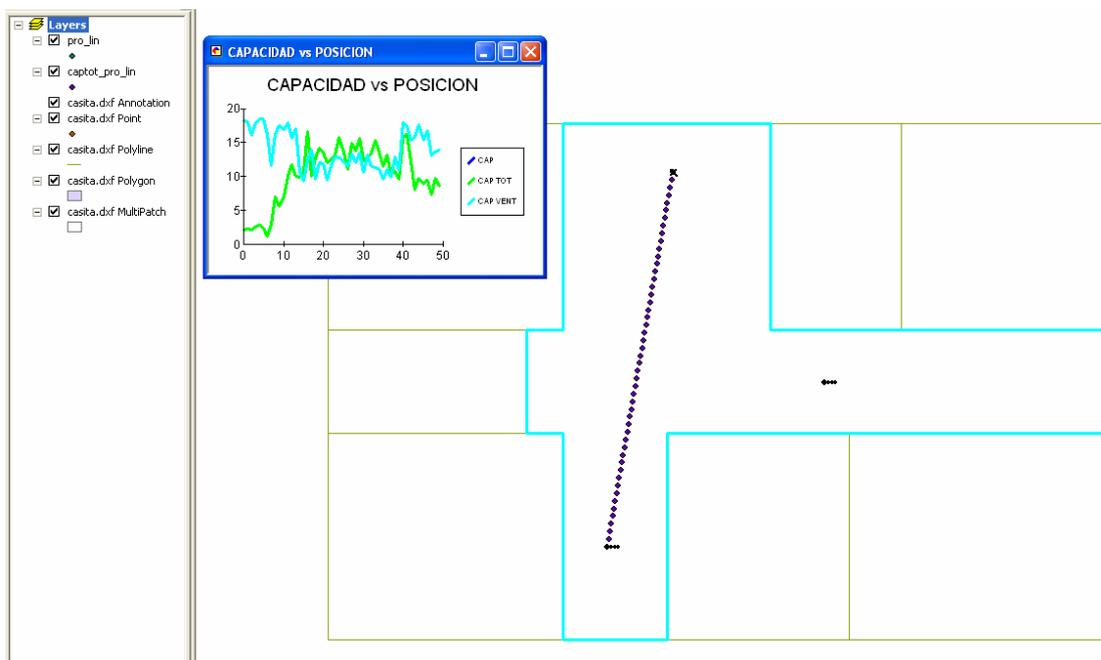


Figura 5.2. Resultado de simulación de recorrido lineal en pasillo.

Se ha considerado que la conductividad de las paredes es de 0,1 S/m, la permitividad relativa de 5, polarización soft y la relación señal a ruido de 20 dB. El número máximo de reflexiones que se han permitido es de 20 para los rayos no difractados y 2 para los difractados. Se ha permitido una transmisión, considerando las paredes como muros de cemento. Entre el punto inicial y final se han tomado 50 puntos.

Como resultado de esta simulación se obtiene una gráfica en la que se muestra la variación de la capacidad en función de la posición. Se puede ver como la capacidad disminuye (CAP está superpuesta por CAP_VENT, en azul cian en la figura 5.2) conforme el receptor se acerca al cruce hasta que en los puntos 15-20 decae notablemente, volviendo a repuntar en los puntos 35-40, dada la simetría aproximada del escenario.

5.2.- Simulación en una zona.

En esta simulación hemos situado el transmisor en las mismas coordenadas que en la simulación de recorrido lineal del apartado anterior, situando la zona de cálculo sobre la intersección de los pasillos, para comprobar de manera más amplia la evolución de la capacidad y las pérdidas en dicha área. Para ello, se ha empleado un array transmisor de las mismas características que el usado en la anterior simulación (4 antenas, orientación 0°, espaciado $0,5\lambda$), una frecuencia de 2100 MHz.

En cuanto a las condiciones del entorno, son idénticas a las del apartado anterior, salvo por que se han restringido las reflexiones a 10, con un máximo de 3 reflexiones por rayo difractado, una única transmisión tomando las paredes como bloques de cemento (atenuación 13 dB), como ya se indicó en el anterior apartado y una resolución de 0,1 m. Así pues, la capa que muestra la capacidad en cada punto queda como vemos en la figura 5.3.:

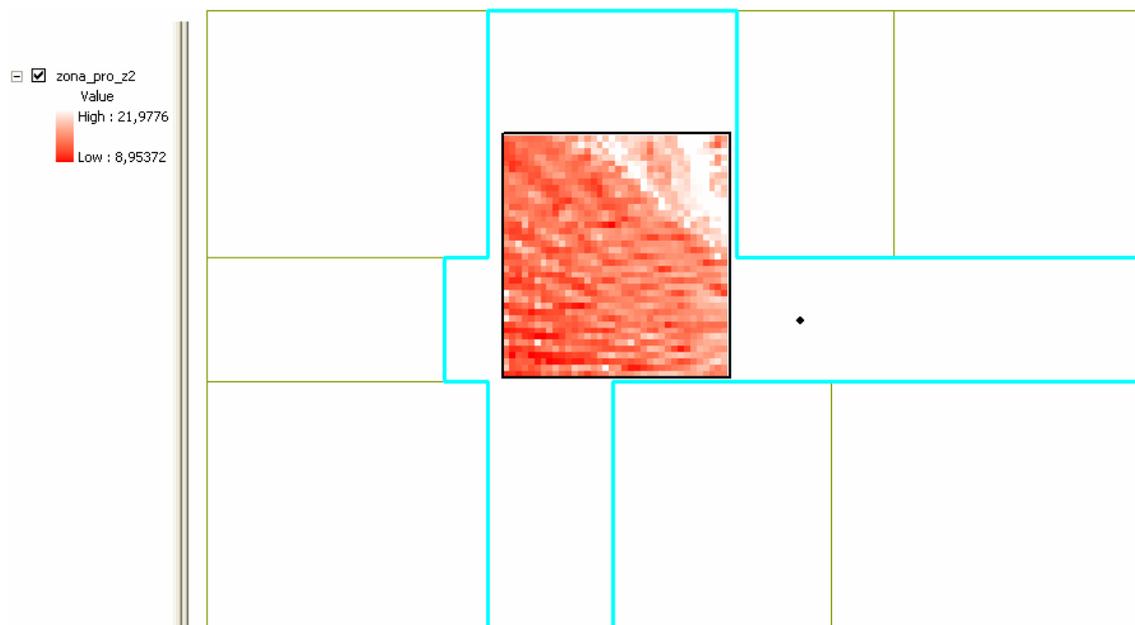


Figura 5.3. Raster de Capacidad de simulación de Zona.

Podemos observar en la parte izquierda de la pantalla que la capacidad oscila entre 8,95372 y 21,9776 bits/Hz. Atendiendo a la escala de colores, podemos observar en qué puntos hay más capacidad y en cuáles menos. Por su parte, la capa que representa las pérdidas en cada punto se muestra en la figura 5.4., donde vemos que las pérdidas se sitúan entre los 37,04 y los 86,24 dB's:

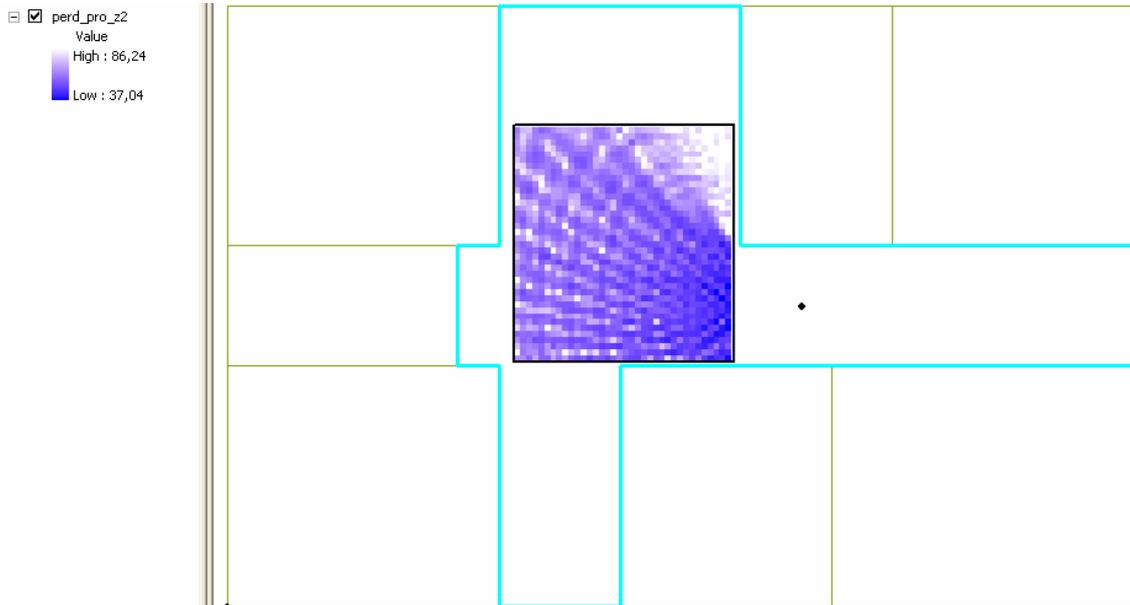


Figura 5.4. Raster de pérdidas de simulación de capacidad en Zona.

Al igual que en el apartado 5.1.- sólo hemos tenido en cuenta las paredes del pasillo interno de la planta.

Si superponemos la simulación realizada en recorrido lineal sobre la simulación de zona, se puede observar como en los puntos 38-41 se experimenta un repunte de la capacidad hasta los 17,96 bits/Hz en las que coincide con los puntos más blancos de la zona. En general, con esta representación, podemos entender mejor la evolución de la capacidad a lo largo de la parte del recorrido lineal que pasa por la zona de cálculo:

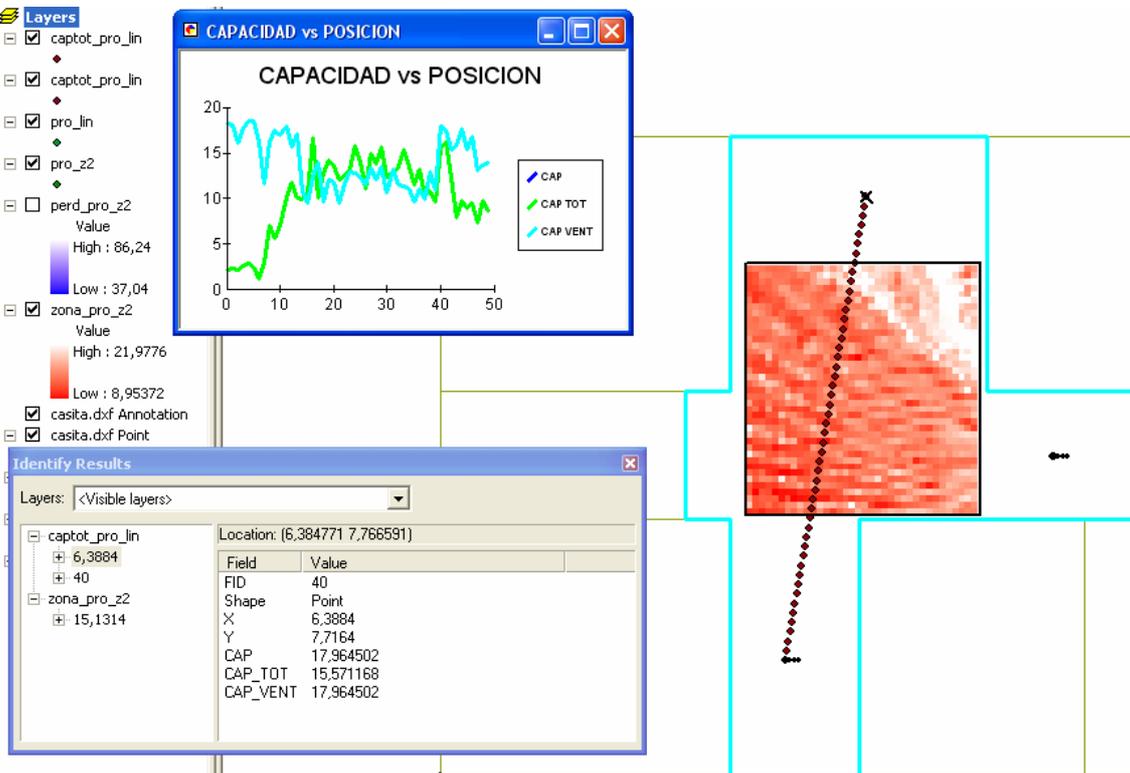


Figura 5.5. Superposición de simulaciones lineal y de zona.

5.3.- Simulación siso2mimo.

Se compararán ahora los resultados obtenidos en el apartado 5.1, realizados por una simulación normal, con los de una simulación siso2mimo. Para ello se ha realizado una simulación siso2mimo con las mismas características que la simulación normal del apartado 5.1. Lo ventajoso de este tipo de simulación es que necesita un menor tiempo de cómputo, pero tiene la desventaja de que el cálculo no es exacto.

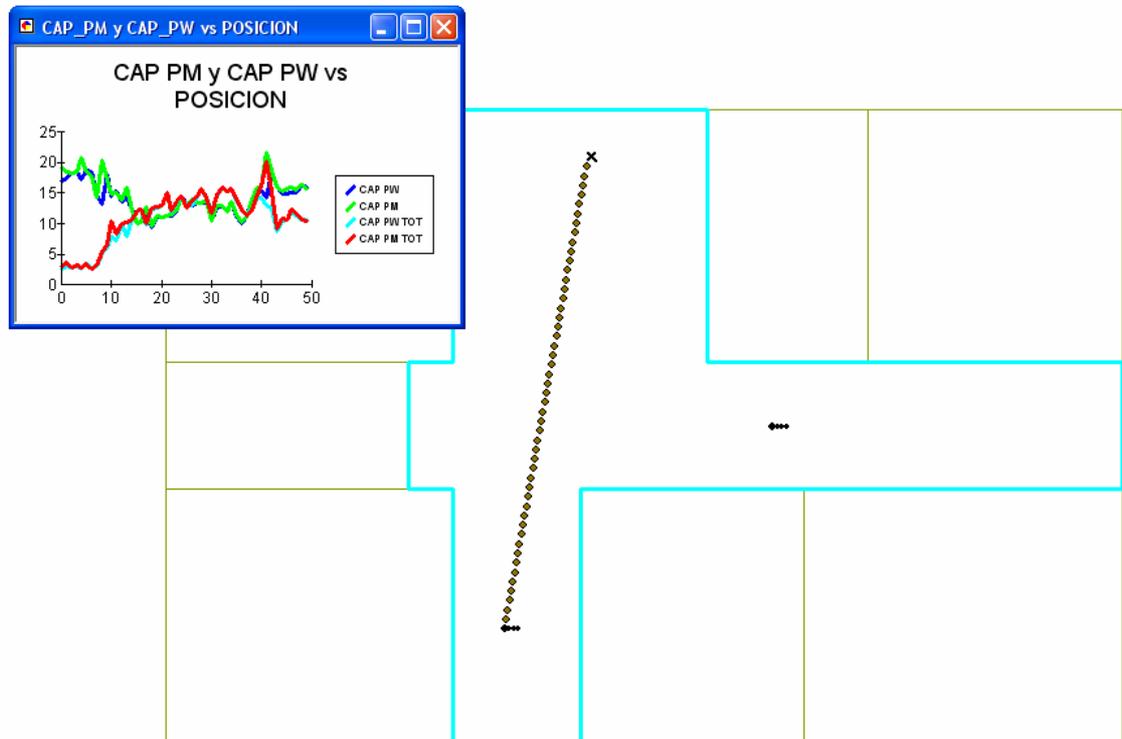


Figura 5.6. Simulación Siso2mimo.

En la figura 5.6 se muestra el resultado obtenido, pudiendo ser comparado con la simulación normal observando el resultado de la simulación normal. La gráfica superior muestra la capacidad calculada con el modelo paramétrico (verde) y de ondas planas (azul), pudiendo observar las diferencias entre ambos, siendo ambas para normalización individual. Además en podemos observar también las mismas gráficas para una normalización de recorrido total (modelo paramétrico en rojo y modelo de ondas planas en azul cian).

5.4.- Sistema.

Para los sistemas de simulaciones hemos tomado un ejemplo sencillo, con dos simulaciones de zona cuyos transmisores están en el pasillo principal del entorno. En las figuras siguientes podemos observar tanto las capas de pérdidas(en azul) y capacidad (en rojo) de cada una de las simulaciones de zona que componen este sistema (en este caso son dos simulaciones: 'zona 3' y 'zona 4'), como las capas de pérdidas y de capacidad del sistema (llamado 'ggg'), que vemos que abarcan la superficie suma de las superficies de las simulaciones de zona.

En la figura 5.7 podemos observar el raster de capacidad del sistema superpuesto a los raster de capacidad de las simulaciones integrantes, pudiendo observar que la capacidad del sistema está comprendido entre el valor mínimo de capacidad más alto de las simulaciones, 10,25 bits/Hz, hasta el valor máximo de ambas simulaciones, 26,3462 bits/Hz.

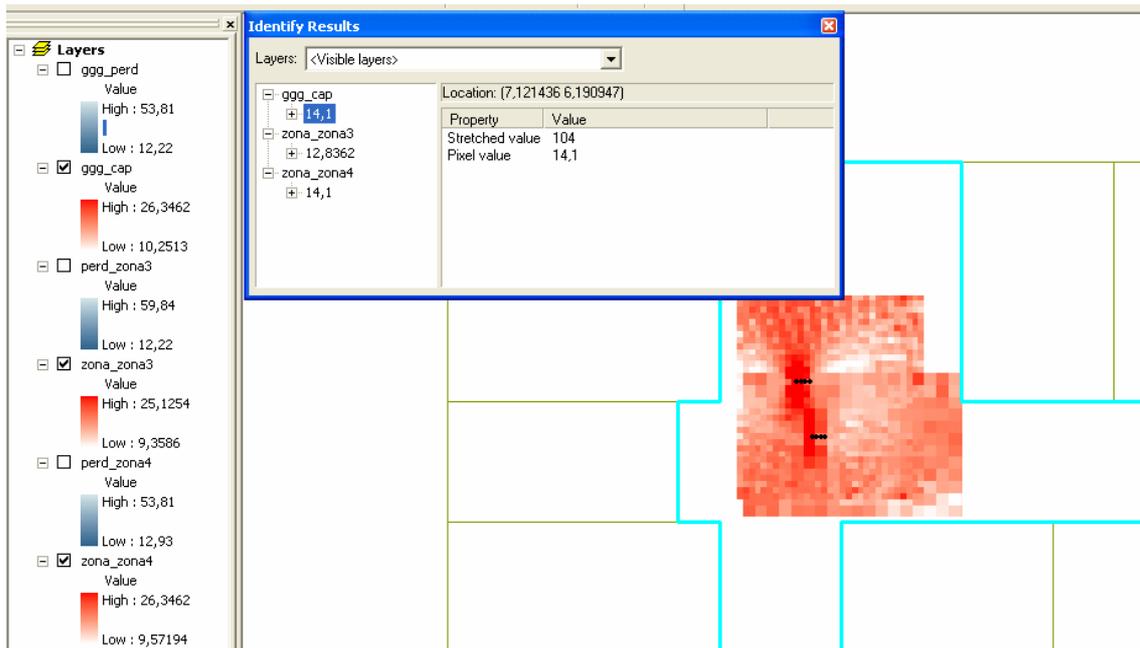


Figura 5.7. Raster de capacidad de un sistema.

En el cuadro superior derecho podemos comprobar que el valor de capacidad en cualquier punto del sistema es el máximo valor de capacidad de entre las simulaciones integrantes en dicho punto.

A continuación, en la figura 5.8. podemos observar el raster de pérdidas del sistema superpuesto a los raster de las simulaciones integrantes. En este caso, para conseguir el resultado óptimo interesa que las pérdidas sean lo más pequeñas posibles, por lo que el raster de pérdidas del sistemas se calcula en base al mínimo valor de pérdidas de las simulaciones integrantes en cada punto (al contrario que el raster de capacidad donde se calculaba el máximo). En definitiva observamos que las pérdidas del sistema están comprendidas entre 12,22 y 53,81 dB.

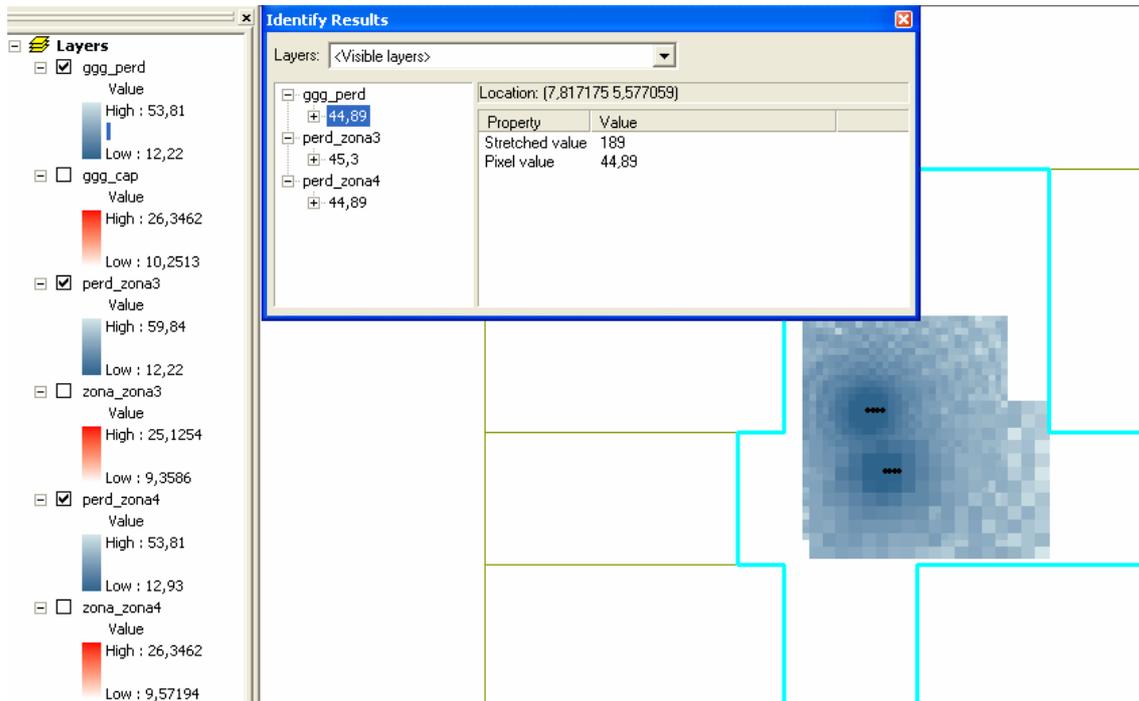


Figura 5.8. Raster de pérdidas de un sistema.

Si observamos el cuadro de la parte superior podemos confirmar que para un punto cualquiera, el valor de pérdida del sistema será el menor de entre todos los valores de pérdida de las simulaciones en ese punto.

Finalmente señalar que este ejemplo es un caso extremadamente sencillo de sistema, en el que simplemente se pretende hacer entender al lector las operaciones básicas de este tipo de simulación. Se podrían, por tanto, calcular sistemas a partir simulaciones de la misma zona con transmisores en sitios diferentes, con el fin de obtener el resultado óptimo para planificar una red MIMO indoor. Obviamente, usando simulaciones con mayor resolución obtendremos resultados más precisos, pero tendremos que pagar un alto coste computacional.

Capítulo 6. CONCLUSIONES



Con el constante aumento del volumen de transferencia de información que se experimenta hoy en día, la búsqueda de sistemas que sean capaces de soportar este creciente volumen sin sacrificar por ello la velocidad de transmisión es una necesidad prioritaria a todos los niveles de consumo, desde particulares hasta grandes corporaciones o gobiernos. Es por esta razón, que el estudio de sistemas MIMO resulta tan interesante en la actualidad, ya que, proporcionan un incremento sustancial de la capacidad de transmisión de información sin coste de velocidad, simplemente con el uso de varias antenas en las estaciones transmisoras y receptoras, suponiendo esto un avance en comunicaciones móviles, equiparable a la introducción de sistemas multiprocesador en la informática. Este avance es más importante si cabe, debido a la tendencia creciente del flujo de información por vía inalámbrica a través de gran variedad de redes, como por ejemplo, las redes WIFI.

La aplicación presentada ha sido desarrollada bajo un entorno SIG, lo que permite, además de una mejor comprensión y distribución del entorno, una representación de datos y resultados más intuitiva e inteligible para el usuario no avanzado. El canal MIMO se ha simulado a partir de los modelos de propagación de óptica geométrica (GO) y teoría uniforme de la difracción (UTD) con el fin de ahorrar coste computacional, habiéndose pensado esta herramienta para calcular capacidades en entornos picocelulares o indoor.

La programación del código principal de la herramienta se ha desarrollado en Visual Basic dada su facilidad a la hora de implementar los formularios y la facilidad para asociar funciones a determinados botones, así como el ágil manejo de objetos. Por su parte, los programas externos que usa la herramienta están programados en C y MatLab, debido a las virtudes de cada uno de estos programas para diferentes tareas. Así, mientras el trazador de rayos está programado en C, debido a la elevada velocidad de cálculo que proporciona este lenguaje, los programas que calculan las capacidades están programados en MatLab por la facilidad de manejo de matrices que ofrece este entorno.

La utilidad de los cálculos que es capaz de realizar la herramienta, la hacen válida para trabajar como herramienta en aplicaciones tan dispares como la enseñanza universitaria, usándola en prácticas dada su sencillez de manejo y claridad de resultados, o la planificación de redes MIMO dada sus funcionalidades de optimización de resultados a partir del cálculo de sistemas y la posibilidad de estudios comparativos por la agilidad del manejo de datos geográficos, o incluso como base de datos geográficos de simulaciones, dada la facilidad del manejo de estos datos desde el menú '*Base de datos*' de la herramienta.

A pesar de la sencillez del entorno donde se han realizado las simulaciones del capítulo 5, estas simulaciones conllevan un tiempo de simulación considerable, que está directamente relacionado con el máximo número de reflexiones permitidas, y en mayor medida, con el número de transmisiones. Esta es la razón de que se halla implementado en la herramienta la posibilidad de hacer simulaciones siso2mimo (que calculan la matriz de transferencia MIMO a partir de una simulación SISO), ya que con los modelos que emplea se reduce sustancialmente el tiempo de cómputo, a pesar de sacrificar exactitud en el cálculo. Esto permite la comparación de distintos modelos para ver hasta qué punto se adaptan estos modelos a la realidad.

La herramienta desarrollada tiene un cierto carácter modular, ya que realiza tareas de forma independiente, ejecutándose desde programas diferentes. Es este carácter el que hace que tenga una gran versatilidad, pudiendo hacer modificaciones sobre cualquiera de los programas auxiliares en función de nuevas necesidades creadas por el usuario, adición de nuevos tipos de cálculo, mejora de la interfaz o incluso posibles cambios o mejoras que aumenten la velocidad de cálculo, simplemente manteniendo el formato de los datos devueltos por cada uno de los programas auxiliares.

Otras posibles mejoras podrían ser la inclusión de nuevos modelos SISO2MIMO o la modificación de los ya existentes, pudiendo validarlos comparando la reconstrucción llevada a cabo por éstos con la matriz exacta.

La herramienta es capaz de simular tanto en entornos microcelulares como en entornos indoor o picocelulares incluyendo en el trazado de rayos las componentes transmitidas por las paredes. Es en estos escenarios donde mayor velocidad de transmisión se va a necesitar por usuarios que usen la interfaz radio, dado el gran auge que ha tenido en los últimos años las redes inalámbricas WIFI. De esta forma obtenemos una herramienta de planificación de sistemas MIMO indoor que puede ser de gran utilidad para comprobar que las



velocidades de transmisión son las adecuadas en el entorno. Además desempeña una función de apoyo al planificador de redes indoor, puesto que es posible cotejar resultados con diferentes localizaciones de transmisores y receptores de manera ágil y sencilla, además del cálculo de optimización de varios escenarios mediante el cálculo de sistemas.

También puede tomar un enfoque didáctico para la realización de prácticas por estudiantes de Ingeniería de Telecomunicación, ya que su uso es muy sencillo y los resultados que se obtienen son claros y sencillos.

Como mejora que se podría incluir en esta herramienta sería el permitir la introducción de campañas de medidas, con el fin de comparar las simulaciones con las medidas realizadas en el entorno real. Esta mejora sería necesaria para validar todas las aproximaciones electromagnéticas llevadas a cabo y comprobar la fiabilidad de la herramienta.

Capítulo 7. BIBLIOGRAFÍA



- [1] C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication", *Bell System Technical Journal*, Vol. 27, pp. 379-423 and 623-656, July and October, 1948.
- [2] J. M. Hernández Rábanos, "Comunicaciones Móviles", Madrid: De. Centro de Estudios Ramón Areces. 1997.
- [3] D. Gesbert, M. Shafi, D-S Shiu, P. Smith and A. Naguib, "From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space-Time Coded Wireless Systems", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 21, No.3, April 2003
- [4] G. J. Foschini and J. Gans, "On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multiple Antennas", *Bell Labs Technical Journal*, Vol. 1, No. 2, Lucent Technologies, pp 41-59, Autumn 1996.
- [5] Telatar, I.E., "Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channel", *European Trans. on Telecommunications*, Vol. 10, No. 6, pp. 585-595, 1999.
- [6] P. Almers, F. Tufvesson, P. Karlsson and A. Molish, "The Effect of Horizontal Array Orientation on MIMO Channel Capacity", *Mitsubishi*, TR-2003-39, July 2003
- [7] S. M. Alamouti, "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol 16, no. 8, pp. 1451-1458, 1998
- [8] V. Tarokh, H. Jafarkhani, and A. R. Calderbank "Space-time block codes from orthogonal designs", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol 45 no 5, pp. 1456-1467, July 1999.
- [9] H. L. Bertoni, *Radio Propagation for Modern Wireless Systems*, New Jersey: Prentice Hall, 2000.
- [10] G.A. Deschamps, "Ray techniques in electromagnetics", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 60, No. 9, pp. 1022-1035, 1972.
- [11] GLASSNER, ANDREW S. *An introduction to Ray Tracing*. Academic Press. Harcourt Brace Jovanovich Publishers. New York. Tercera edición 1990.
- [12] T. S. Rappaport, *Wireless Communications*, New York, Prentice Hall, 1996.
- [13] C. A. Balanis, *Advance Engineering Electromagnetics*, New York, 1989.
- [14] Rodríguez, Jorge Luis. *Predicción de parámetros básicos de propagación en entornos microcelulares mediante técnicas de trazado de rayos*. Proyecto Fin de Carrera, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Valencia. Julio 1999.
- [15] A.F. Molish, M. Steinbauer. M. Toreltsch, E. Bonek, R.S. Thoma, "Capacity of MIMO Systems Based on Measured Wireless Channels", *IEEE Journal on Selected Areas in Comm*, vol. 20, no. 3, pp. 561-569, April 2002.
- [16] Ibernón Fernández, Rubén. *Programación de una Herramienta de Simulación de Canales MIMO sobre ArcGIS*, proyecto fin de carrera, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Cartagena. Julio de 2004.
- [17] Ruiz Moreno, Alberto, *Programación de una herramienta para el cálculo de coberturas indoor en canales MIMO*, proyecto fin de carrera Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Cartagena. Febrero de 2005.
- [18] A.F. Molish, M. Steinbauer. M. Toreltsch, E. Bonek, R.S. Thoma, "Capacity of MIMO Systems Based on Measured Wireless Channels", *IEEE Journal on Selected Areas in Comm*, vol. 20, no. 3, pp. 561-569, April 2002.
- [19] J-S. Jiang and M. Ingram, "Path Model and MIMO capacity for measured indoor channels at 5.8 GHz", *IEEE International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics*, August 2002.



- [20] R. S. Thomä, D. Hampicke, A. Richter, G. Sommerkorn, "MIMO Vector Channel Sounder Measurements for Smart Antenna System Evaluation", *European Transaction on Telecommunications, ETT*, vol. 12, no. 5, pp. 427-438, September/October 2001.
- [21] Tinoco Guevara, Roberto, "Definición y algunas aplicaciones de los sistemas de información geográfica", artículo en <http://www.monografias.com>.
- [22] Dr F. Escobar, Assoc Prof G. Hunter, Assoc Prof I. Bishop, Dr A. Zerger, "GIS theory Introduction", artículo del Department of Geomatics, The University of Melbourne, para <http://www.sli.unimelb.edu.au/gisweb/>
- [23] David J. Buckley, "The GIS Primer, an introduction to Geographic Information Systems", Corporate GIS Solutions Manager, Pacific Meridian Resources, Inc.
- [24] <http://www.esri-es.com/productos.html>
- [25] *ArcGIS 9.0 Administrator and Developer Guide*, ESRI Inc. 2005