



Software de Análisis de Propagación Outdoor

Eliana Marion Katz Esquivel
Federico Larroca Ponzoni
María Ximena Martino Vaeza

Tutor:
José Acuña

Facultad de Ingeniería
Universidad de la República

Proyecto de fin de carrera, Ingeniería Eléctrica
Plan 97, Telecomunicaciones

22 de marzo de 2006

Agradecimientos

Este proyecto no hubiese sido posible sin el apoyo de muchas personas.

Queremos dedicar y brindar nuestros más encendidos agradecimientos a nuestras familias. Por soportarnos todo este tiempo y estar siempre.

También a nuestro tutor José, por su constante asesoramiento cada vez que lo necesitábamos.

A Gabriel Dutra, que siempre colaboró con nosotros brindándonos material de estudio e ideas para el proyecto.

A Pedrito y Víctor, por ayudarnos y aconsejarnos con la ingeniería de software y programación en general.

Muchas gracias a Paola y Laurita, por apoyarnos en la parte matemática de los problemas y por haberse ofrecido a leer la documentación completa.

Queremos agradecer a Rona, que nos ayudó a hacer muchos de los dibujos que aparecen en la documentación.

También a Nacho, Martín y Pao, que nos bancaron la poca bola que les dimos en estos últimos meses y nos brindaron su apoyo constante.

A nuestros amigos y amigas, por interesarse y acompañarnos durante este año y medio.

A Mauge, por haber “presentado” al grupo de proyecto.

A Jaime Wajner y Roberto Nisivoccia por habernos permitido utilizar el software de predicción con que cuentan en ANCEL.

A Fernando Fontán, que colaboró en la gestión para realizar la mini pasantía en ANCEL.

Y a todos aquellos que nos estamos olvidando y creen que deberían estar en esta página.

Índice general

I	Presentación del problema	11
1.	Introducción	13
1.1.	Motivación	13
1.2.	Objetivos	14
1.3.	Alcance	15
2.	Conceptos preliminares	17
2.1.	El concepto celular	17
2.2.	Caracterización de las radiobases	19
II	Fundamentos Teóricos	21
3.	Principios básicos de propagación	23
3.1.	Propagación en espacio libre	23
3.2.	Propagación sobre una superficie reflectora	24
3.2.1.	Propagación sobre Tierra esférica	25
3.2.2.	Propagación sobre Tierra plana	27
3.2.3.	Propagación sobre una superficie rugosa	29
4.	Propagación sobre terrenos irregulares	31
4.1.	Principio de Huygens	31
4.1.1.	Propagación por difracción	31
4.2.	Elipsoides de Fresnel	33

4.3. Atenuación por múltiples cuchillos	35
4.3.1. Método de Vogler	36
5. Modelos de propagación	39
5.1. Modelo de Okumura-Hata	40
5.1.1. Modelo de Okumura	40
5.1.2. Modelo de Okumura-Hata	41
5.1.3. Modelo de Okumura-Hata COST231	43
5.2. Modelo de Erceg-SUI	43
5.3. Modelo de Walfisch-Ikegami	45
5.3.1. Modelo de Walfisch-Bertoni	45
5.3.2. Modelo COST231 Walfisch-Ikegami	48
5.3.3. Modelo MOPEM	50
5.4. Modelo propuesto: Vogler-Ikegami	52
III Desarrollo de Software	55
6. Aspectos previos al desarrollo de software	57
6.1. Elección del lenguaje de programación	57
6.2. Introducción a GIS	58
6.2.1. Representación de datos en GIS	60
6.2.2. Java y GIS	61
7. Descripción general de SAPO	63
7.1. ¿Qué es un proyecto en SAPO?	64
7.2. Ingreso de datos del entorno	64
7.3. Creación de una red celular	66
7.4. Estimación de potencia mediana de señal	68
7.5. Otras herramientas	69
7.5.1. El Generador de Edificios	69
7.5.2. Cálculo de interferencia co-canal	69

7.5.3. Identificación de área de servicio	69
7.5.4. Identificación de región de línea de vista	70
7.5.5. Análisis del error de predicción	70
8. Arquitectura de software	71
8.1. Arquitectura de paquetes	71
8.1.1. El paquete principal	72
8.1.2. El paquete proyecto	72
8.1.3. El paquete capas	74
8.1.4. El paquete raster	74
8.1.5. El paquete vectorial	76
8.1.6. El paquete red	77
8.1.7. El paquete predicciones	78
8.1.8. El paquete ifusuario	81
8.1.9. El paquete archivos	85
8.2. Comportamiento dinámico	85
8.3. Manejo de errores	89
9. Formato de archivos	91
9.1. Archivos de entrada de datos de altura de terreno	91
9.1.1. ASCII Grid	92
9.1.2. GRASS ASCII Grid	93
9.2. Archivos de entrada de datos de edificaciones y manzanas	93
9.2.1. SHP	93
9.3. Archivos de entrada para generar manzanas	94
9.4. Archivos de entrada para la importación de patrones de radiación	95
9.5. Archivos de entrada-salida de predicciones	96
9.6. Archivos de entrada-salida para el análisis de error de predicción	96
9.7. Archivos de entrada-salida para el manejo de proyectos	96
9.7.1. XML	97

10. Algoritmos y cálculos implementados	101
10.1. Cómputo de distancia	101
10.2. Cálculo de ganancia de la antena transmisora	102
10.2.1. Ángulos relativos a la dirección de máxima propagación	102
10.2.2. Búsqueda en el patrón de radiación	103
10.3. Cálculo de alturas efectivas	104
10.4. Cálculo del ángulo de orientación y ancho de la calle	105
10.5. Cálculo de la distancia a una esquina	106
10.6. Consideración del factor de seguridad en variables aleatorias	108
10.7. Verificación de línea de vista	108
10.8. Resolución de la integral de Vogler	110
10.8.1. Estimación Numérica: Métodos QMC y RQMC	111
10.8.2. Algoritmo para la evaluación de la integral	114
10.9. Algoritmo de búsqueda del perfil	117
11. Ejemplos de aplicación	119
11.1. Cálculos asociados a una predicción	119
11.2. Variación de las características de una antena	121
11.3. Variación de los modelos de propagación	123
11.4. Verificación de línea de vista	124
IV Validación y Conclusiones	125
12. Validación	127
12.1. Obtención de las medidas reales	128
12.2. Breve descripción del entorno y las medidas	130
12.3. Performance de los modelos	130
12.3.1. Okumura-Hata-COST231	130
12.3.2. Erceg-SUI	131
12.3.3. COST231-Walfisch-Ikegami	133

12.3.4. MOPEM	135
12.3.5. Vogler-Ikegami	136
12.4. Conclusiones de la validación	139
13. Conclusiones	141
13.1. Líneas de trabajo futuro	142
V Anexos	145
A. Intersección de una elipsoide con un plano	147
A.1. Verificación de la intersección entre un plano y la elipsoide	147
A.2. Intersección entre una elipsoide y un plano arbitrario	149
A.3. Aplicación al problema de línea de vista	150

Parte I

Presentación del problema

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se presentan los principales elementos que motivan la realización del presente proyecto, los objetivos planteados al inicio del mismo y se establece su alcance.

1.1. Motivación

Los sistemas de comunicación inalámbrica han adquirido una indiscutible importancia dentro del mundo de las telecomunicaciones. Más específicamente, los servicios de telefonía móvil celular, que fueron lanzados al mercado en la década de los 80, han tenido desde entonces un vertiginoso desarrollo, constituyendo hoy en día un elemento integrado en la sociedad contemporánea. Esto se traduce en una cada vez mayor exigencia a nivel de costos, calidad de servicio y soporte de aplicaciones a los operadores, para poder satisfacer las demandas del mercado sin perder competitividad. A su vez les impone, tanto a los operadores como a sus proveedores, una eficiente planificación y mantenimiento de los sistemas, mayor precisión en las estimaciones de cobertura e identificación de las regiones de sombra y puntos de comunicación dudosa. Para el cumplimiento de dichos objetivos, resulta de fundamental importancia disponer de herramientas de predicción de cobertura flexibles, precisas y escalables.

En el marco académico, también es de interés contar con este tipo de herramientas no sólo a nivel de investigación, sino también con fines educativos. Los paquetes de software que existen en la actualidad han sido desarrollados con un fin puramente comercial y están destinados a operadores, teniendo por ende un costo muy elevado. Esto los torna inaccesibles para una empresa de bajo porte o una institución educativa.

Aquí mencionamos algunos sólo a modo de ejemplo:

- Ericsson TEMS CellPlanner - *A universal approach to network planning* [1]

- AWE Communications ProMan - *Radio Network Planning & Prediction of Wavepropagation* [2]
- Teleworx Xcalibur - *Real Time RF Design & Optimization Tool* [3]
- Expert Wireless Solutions MaXPlan - *Wireless System Design Software Tool* [4]

Su costo ronda entre los U\$S 10.000 y los U\$S 80.000 anuales.

A su vez, estos paquetes de software están diseñados para entornos homogéneos ya que pueden realizar predicciones asociándole un único modelo a todas las antenas involucradas. En la realidad, dentro de una misma celda pueden existir entornos tan distintos que la aplicación de un mismo modelo conduzca a resultados inexactos. Esto constituyó una motivación para la elaboración de un software de predicción de propagación para señal celular, que sea más flexible en este sentido de forma de lograr mayor exactitud en caso de diversidad de entornos de propagación.

La intención es que el resultado del proyecto sea el primer paso para lograr una herramienta completa y comparable a las disponibles a nivel comercial lo cual motivó a que sea de código abierto y con un diseño modular que facilite el agregado de nuevas funcionalidades.

1.2. Objetivos

El objetivo general del presente proyecto es el desarrollo de una herramienta de predicción de pérdida de camino de señales celulares para entornos urbanos y suburbanos de características heterogéneas. La misma consistirá en un software que pueda calcular a partir de los datos topográficos del entorno, ubicación y características de las antenas radiobases, la potencia mediana de la señal recibida en cualquier punto del terreno. Para ello se utilizarán distintos modelos de propagación para los entornos mencionados.

El software deberá aceptar datos con distintos niveles de detalle, incluyendo el mapa de alturas de terreno, el trazado de las manzanas y la disposición y altura de las edificaciones. Los formatos utilizados deberán ser reconocidos internacionalmente.

Para el cálculo de la atenuación se utilizarán diversos modelos de propagación, y se intentará cubrir la mayor cantidad de escenarios posibles. Los modelos deberán ser configurables por el usuario (es decir, se podrán fijar arbitrariamente los parámetros que los definen). Esto es con el fin de lograr la mayor flexibilidad posible, característica a buscar en todos los aspectos del diseño.

La herramienta debe ser de fácil manejo, de forma que el usuario pueda interactuar con la misma de forma natural, mediante una interfaz gráfica amigable y clara. Ser experto en la teoría no debe ser una condición necesaria para poder utilizarla y obtener resultados razonables.

Es también una característica deseable, que el software pueda funcionar bajo distintos sistemas operativos, de forma de no restringir su uso a una determinada plataforma, y que los tiempos de ejecución sean razonables. Para lograr esto último se intentará minimizar los tiempos de cálculo mediante algoritmos eficientes, sin necesidad de perder confiabilidad en los resultados.

Como se mencionó en la sección anterior, la herramienta de software pretende ser parte de un desarrollo más general, por lo cual es condición imprescindible que el código generado sea fácilmente reutilizable.

Como objetivos secundarios, necesarios para la concreción del objetivo final, se encuentran el estudio y análisis de los fundamentos teóricos, que incluyen todos los aspectos relativos a la propagación, características de la señal celular, modelos de predicción, así como el entendimiento de los procedimientos matemáticos necesarios para la implementación de los diferentes cálculos. También cabe mencionar la familiarización con el lenguaje y el entorno de programación, así como el manejo de datos del tipo cartografías digitales.

1.3. Alcance

A la hora de encarar un proyecto es importante establecer las fronteras que limitan el alcance del mismo, así como mencionar las hipótesis más importantes que es necesario asumir para su desarrollo.

El estudio de las señales celulares se basa en descripciones estadísticas dada la imposibilidad del tratamiento del problema electromagnético que implicaría la predicción exacta del valor de potencia en un punto dado. Esto incluye los niveles medianos de señal y una distribución de éstos, así como una medida del apartamiento temporal y frecuencial. El presente trabajo se basará en la estimación del valor mediano de la potencia local en una región geográfica, y no incluirá el análisis de las variaciones de largo alcance (debidas principalmente al efecto de los cambios de topografía a lo largo del camino de propagación) ni las de corto alcance (debidas al fenómeno de multicamino en la vecindad del móvil).

Otro elemento a mencionar es el tipo de entorno de estudio, que se limita principalmente a entornos suburbanos y urbanos. Esto no es para nada restrictivo ya que en ese marco se admite una gran variedad de escenarios, con trazado de manzanas y distribución de edificaciones arbitrarios. La elección de este tipo de entornos se debe a que son los más complejos desde el punto de vista de la propagación, y por lo tanto los más desafiantes a la hora de hacer estimaciones de cobertura o planificación. Además son en general los de principal interés para los operadores por tener la mayor concentración de demanda de servicios debido a la alta densidad de población. Cabe aclarar que se trabajará en ambientes *outdoor* (en la calle); el cálculo de atenuación en ambientes del tipo *indoor* (dentro de edificaciones) o *incar* (dentro de automóviles) está por fuera de los alcances del proyecto.

Tampoco se incluirá el análisis de interferencia del tipo canal adyacente, esto es, niveles de potencia no deseados provenientes de emisiones de señales con portadoras diferentes a la de la señal útil (frecuencias próximas a la de transmisión). Por el contrario se incluirá el cálculo de interferencia del tipo co-canal (para sistemas FDMA), debida a señales interferentes con la misma portadora.

En cuanto a las frecuencias de operación, se consideran principalmente las incluidas en las bandas UHF y VHF (30 MHz a 3 GHz), que son las usadas para comunicaciones móviles celulares. Sin embargo, esto dependerá del modelo de propagación en particular que se esté utilizando, ya que alguno puede ser válido para rangos de frecuencia más amplios o más reducidos que el mencionado.

Una suposición que es necesario realizar a la hora de asegurar la confiabilidad de los resultados arrojados por la herramienta de software, es que el usuario que la utiliza dispone de una base de datos suficiente y precisa, tanto de la topografía del terreno como de la topología de la red celular y de las antenas. A su vez, debe estar capacitado para elegir las opciones más adecuadas dentro de las que ofrece el software, de acuerdo a las condiciones particulares de trabajo, e ingresar valores numéricos coherentes para los diferentes parámetros, para lo cual deberá estar mínimamente familiarizado con los conceptos que se manejan.

Capítulo 2

Conceptos preliminares

En este capítulo se introducen algunos conceptos y definiciones elementales en los que se funda el presente trabajo.

2.1. El concepto celular

El diseño de red para las comunicaciones móviles está basado en el concepto celular, concepto introducido por *Bell Laboratories* en la década de 1970. El sistema celular divide la región en celdas, cubiertas cada una por un sistema de radio (radiobase) que hace posible la conexión de los terminales móviles a la red, y un sistema de conmutación (central móvil celular, MSC/MTSO) que permite la interconexión entre las estaciones base y la conexión a la red conmutada de telefonía pública (PSTN). En la figura 2.1 se puede ver un esquema típico de una red celular, las celdas suelen representarse como un área hexagonal a fin de facilitar el análisis.

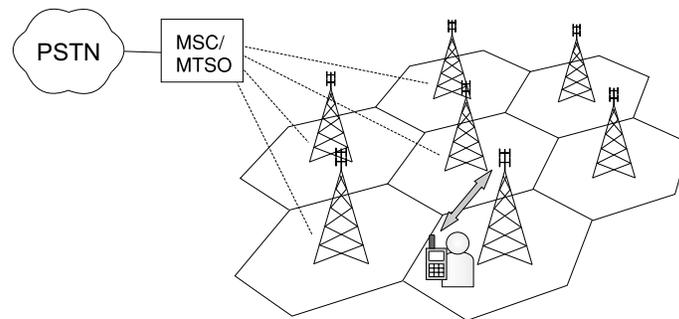


Figura 2.1: Esquema de una red celular

Los principales elementos que diferencian al sistema celular de otros sistemas radio usados anteriormente son el uso de varias radiobases con relativa poca cobertura, y

la capacidad de reutilizar en distintas zonas geográficas separadas una determinada distancia las frecuencias que fueran asignadas para los canales de comunicación del sistema. Esto se traduce en:

- Aumento en la capacidad del sistema
- Reducción en el uso de potencia
- Mejor cobertura

La reutilización de frecuencias permite un uso más eficiente del espectro radioeléctrico, que es un recurso escaso y caro. A la hora de planificar el sistema es necesario estimar el área que habrán de cubrir las radiobases, así como también los canales que se le debe asignar a cada una de ellas, generando así los llamados *patrones de reutilización* de las celdas. Esto debe hacerse minimizando los efectos de interferencia co-canal (señales interferentes con la misma portadora que la señal útil), para cumplir con determinados requerimientos de calidad de señal, más específicamente con un nivel mínimo de relación portadora/señal interferente (C/I o CIR).

Como se dijo anteriormente, el elemento responsable de la transmisión de la señal en la comunicación bidireccional con el terminal es la radiobase (RBS o ERB). Se denomina *área de cobertura* de una radiobase al área geográfica en la cual un terminal móvil puede establecer una comunicación usando esa radiobase como interfase con la red. Depende de la señal emitida por la propia radiobase, y tiene una fuerte dependencia de la geografía y edificación de la zona. La cobertura continua se logra mediante el mecanismo de *handover*, esto es, el proceso de pasar una comunicación de un canal en una celda a un nuevo canal en otra celda o en la misma sin que se corte la comunicación. El manejo de estas transiciones es un factor vital en un sistema celular, si bien le agrega cierta complejidad.

Según la capacidad y cobertura requeridas en el área de influencia de las redes, su diseño implicará la utilización de celdas de diferentes radios y las antenas de las radiobases presentarán diferentes alturas y potencias de transmisión. De allí surge la clasificación de las celdas en tres tipos:

- *Macroceldas*. Son los tipos de celdas más comunes para operación celular, proveen un área de cobertura de radio entre 1 km y 30 km. Las antenas se montan sobre el nivel medio de las edificaciones y tienen una potencia de salida que ronda en el entorno de las decenas de Watts. Se utilizan en ambientes *outdoor* (exteriores).
- *Microceldas*. Tienen un radio de cobertura que está entre 100 m y 1000 m. Incrementan la capacidad de la red, ya que permiten hacer un mayor manejo de tráfico y hacen posible la utilización de potencias de transmisión muy bajas (unos pocos Watts). A diferencia de las macroceldas, las antenas se montan debajo del nivel medio de edificaciones. Al igual que éstas se utilizan en ambientes *outdoor*.

- *Picoceldas*. Proveen una cobertura aún más localizada que las microceldas, con un radio de cobertura típico menor a 100 m. Se utilizan generalmente para brindar cobertura en ambientes *indoor* (cerrados) identificados como de muy alto tráfico, tales como centros comerciales y aeropuertos, donde existe una alta densidad de usuarios con un patrón de comportamiento de baja movilidad.

2.2. Caracterización de las radiobases

La principal función de la radiobase es actuar como intermediario entre los terminales móviles y la central móvil celular. Es la encargada de manejar la interfaz de radio para la comunicación con los terminales móviles en el acceso inalámbrico. Está constituida por varias unidades de canal, consistentes cada una por un transmisor y receptor de radio y por el sistema radiante (sistema de antenas).

Cada radiobase se ubica en un determinado punto geográfico al que se denomina *sitio*. La elección de los sitios no sólo depende de aspectos de radiofrecuencia, sino de disponibilidad de espacio físico, que puede implicar también cuestiones legales y/o regulatorias. Por las necesidades de altura, las torres se ubican generalmente sobre una edificación.

Una radiobase puede conformar una celda de uno o más sectores, en este caso se denomina *sectorizada* (ver figura 2.2). Esta última variante es muy utilizada, sobre todo en entornos urbanos. En lugar de una única antena omnidireccional que sea capaz de cubrir los 360° , se agrupan los equipos de transmisión y recepción con antenas direccionales que cubren un cierto ángulo. Con esto se logra disminuir la interferencia (debido a que se reduce la zona de cobertura) y aumentar la ganancia (las antenas direccionales concentran la potencia en una zona mucho más pequeña que las omnidireccionales). Además, la alta relación frente-espalda ¹ de las antenas direccionales permite mejorar la CIR del sistema, pudiéndose reutilizar más grupos de frecuencia en la zona.

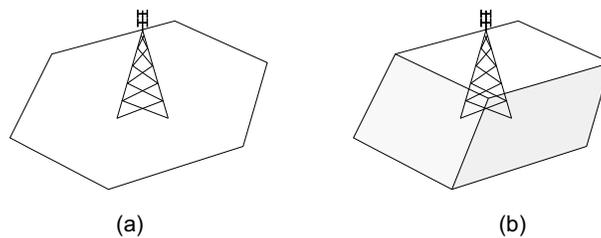


Figura 2.2: Esquema de una radiobase (a) omnidireccional, (b) de tres sectores

En resumen, la caracterización de las radiobases se hará mediante:

¹Relación entre la ganancia de la antena en la dirección de máxima ganancia y la diametralmente opuesta

- el *sitio* al cual pertenece (coordenadas)
- la *altura*
- la cantidad y características de las antenas

Las antenas incluyen los siguientes parámetros de interés:

- *Canal*. El grupo de frecuencias asignado.
- *Potencia radiada*. La potencia de transmisión de la antena.
- *Ganancia máxima*. La ganancia de una antena se define como la relación entre la densidad de potencia (intensidad de radiación) en una dirección dada y la intensidad que sería obtenida si la potencia aceptada por la antena fuera radiada isotrópicamente². La máxima ganancia corresponde a la ganancia en la dirección de máxima intensidad de radiación; para el cálculo de la ganancia en otra dirección se utiliza la información del patrón de radiación.
- *Patrón de radiación*. Es una función matemática o una representación gráfica de las propiedades de radiación en función de las coordenadas espaciales. Lo que se suele hacer para facilitar la medición e interpretación es un corte (horizontal y vertical) en el diagrama de radiación en tres dimensiones para pasarlo a dos dimensiones (ver figura 2.3).

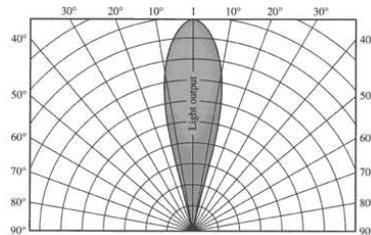


Figura 2.3: Ejemplo de patrón de radiación

- *Tilt*. Es el ángulo de inclinación vertical del lóbulo principal en relación al plano horizontal (*down-tilt* cuando se mide hacia abajo del mismo). Mediante el ajuste de este parámetro es posible reducir el tamaño de las celdas, para lograr una cobertura más específica de la zona y disminuir así las interferencias, controlando más efectivamente el alcance de la celda. Puede ser mecánico y/o eléctrico.
- *Azimut*. Se define como la orientación del lóbulo principal con respecto al norte magnético.

²Una antena isotrópica es aquella que irradia homogéneamente hacia todas las direcciones. Es una idealización ya que en la realidad no existen antenas con tales propiedades.

Parte II

Fundamentos Teóricos

Capítulo 3

Principios básicos de propagación

Antes de comenzar a analizar los modelos de propagación en entornos urbanos y suburbanos, se deben estudiar algunos métodos teóricos para calcular la atenuación de la señal al propagarse en algunos entornos simples. Algunos de estos serán la base para muchos de los modelos que se verán más adelante.

3.1. Propagación en espacio libre

En el espacio libre la energía electromagnética se propaga uniformemente en todas las direcciones desde una fuente puntual. Dada una antena transmisora con potencia de transmisión P_t ubicada en el espacio libre, alejada de cualquier tipo de obstrucción, que tiene una ganancia G_t en la dirección de la antena receptora, la densidad de potencia (potencia por unidad de área) a una distancia d en la dirección elegida estará dada por:

$$W = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2}$$

La potencia disponible en la antena receptora, que tiene un área efectiva A^1 resulta entonces:

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} A = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \left(\frac{\lambda^2 G_r}{4\pi} \right)$$

donde G_r es la ganancia de la antena receptora.

De esta forma se obtiene que:

$$\frac{P_r}{P_t} = G_r G_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (3.1)$$

¹Si una antena es irradiada por una onda electromagnética, la potencia de recepción disponible en sus terminales es la potencia por unidad de área transportada por la onda multiplicada por el área efectiva A . Se cumple también: $A = \frac{\lambda^2 G}{4\pi}$

lo cual se conoce como la *ecuación de espacio libre* o de *Friis*. La conocida relación entre la longitud de onda λ , la frecuencia f y la velocidad de propagación c ($c = f\lambda$) se puede utilizar para escribir la ecuación en una forma alternativa:

$$\frac{P_r}{P_t} = G_r G_t \left(\frac{c}{4\pi f d} \right)^2$$

La pérdida en espacio libre es expresada convenientemente como una cantidad positiva y de la ecuación anterior se obtiene que:

$$L_{EL}(dB) = 10 \log \left(\frac{P_t}{P_r} \right) = -10 \log G_t - 10 \log G_r + 20 \log f + 20 \log d + k \quad (3.2)$$

donde

$$k = 20 \log \left(\frac{4\pi}{3 \cdot 10^8} \right) = -147,56$$

Resulta muchas veces conveniente comparar la pérdida de camino con la pérdida de camino básica L_B entre antenas isotrópicas ($G_t = G_r = 1$) la cual resulta:

$$L_{B_{EL}}(dB) = 32,44 + 20 \log f + 20 \log d \quad (3.3)$$

donde la distancia d está expresada en km y la frecuencia f en MHz.

Como se puede observar en la ecuación (3.2), la pérdida en espacio libre es proporcional al cuadrado de la distancia d , entonces la potencia recibida decae 6 dB cuando la distancia se duplica (o disminuye 20 dB por década). De forma similar, la pérdida aumenta con el cuadrado de la frecuencia de transmisión, entonces las pérdidas también aumentan 6 dB si la frecuencia se duplica. En una primera inspección, se podría concluir que la utilización de altas frecuencias no sería adecuada para comunicaciones móviles, sin embargo, este incremento en la pérdida de transmisión se puede compensar con un incremento en las ganancias de las antenas.

En la práctica, se dice que existen condiciones de propagación de espacio libre si existe visibilidad entre la antena transmisora y la antena receptora en la primer zona de Fresnel (ver sección 4.2) y si no existen reflexiones en la superficie de la Tierra o en obstáculos como pueden ser colinas, árboles, edificios, etc. De acuerdo a lo visto, todo modelo de propagación debe al menos predecir en cualquier caso una pérdida mayor a la de espacio libre.

3.2. Propagación sobre una superficie reflectora

La ecuación de propagación en espacio libre es aplicable únicamente bajo condiciones restrictivas. En la práctica, existen en la mayoría de los casos obstáculos en el

camino de propagación o superficies donde las ondas de radio pueden ser reflejadas. Un caso simple pero de interés práctico, es la propagación entre dos antenas elevadas con línea de vista dispuestas sobre la superficie de la Tierra. Se pueden considerar dos casos, en primer lugar, la propagación sobre una superficie esférica reflectora y en segundo lugar, la propagación cuando la distancia entre las antenas es lo suficientemente pequeña como para obviar la curvatura de la Tierra y asumir que la superficie es plana. En ambos casos, la señal recibida es una combinación de las ondas directas y las ondas reflejadas; para determinar la señal resultante es necesario conocer el coeficiente de reflexión.

3.2.1. Propagación sobre Tierra esférica

La figura 3.1 muestra la situación de dos antenas mutuamente visibles sobre una Tierra de radio efectivo r_e . Las alturas de las antenas sobre la superficie de la Tierra

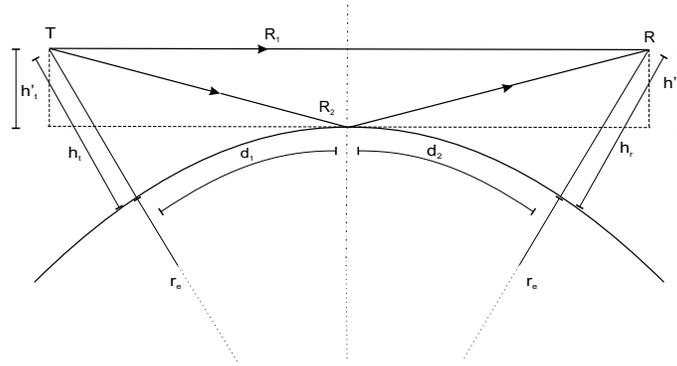


Figura 3.1: Dos antenas visibles mutuamente sobre la Tierra esférica de radio efectivo r_e

son h_t y h_r , y las alturas sobre el plano tangente en el punto de reflexión son h'_t y h'_r respectivamente. De esta forma, se obtiene como resultado de relaciones geométricas la siguiente expresión:

$$d_1^2 = [r_e + (h_t - h'_t)]^2 - r_e^2 = (h_t - h'_t)^2 + 2r_e(h_t - h'_t) \simeq 2r_e(h_t - h'_t) \quad (3.4)$$

y análogamente:

$$d_2^2 \simeq 2r_e(h_r - h'_r) \quad (3.5)$$

Utilizando las ecuaciones (3.4) y (3.5) se obtiene:

$$h'_t = h_t - \frac{d_1^2}{2r_e} \quad \text{y} \quad h'_r = h_r - \frac{d_2^2}{2r_e} \quad (3.6)$$

El punto de reflexión, donde los dos ángulos ψ son iguales, se puede determinar tomando en cuenta que dado $d_1, d_2 \gg h_t, h_r$, el ángulo ψ (en radianes) estará dado por:

$$\psi = \frac{h'_t}{d_1} = \frac{h'_r}{d_2}$$

Entonces:

$$\frac{h'_t}{h'_r} = \frac{d_1}{d_2} \quad (3.7)$$

Combinando la relación $d = d_1 + d_2$ con las ecuaciones (3.6) y (3.7) es posible formular la siguiente ecuación cúbica en d_1 :

$$2d_1^3 - 3dd_1^2 + [d^2 - 2r_e(h_t + h_r)]d_1 + 2r_e h_T d = 0$$

La solución de esta ecuación se puede hallar con métodos estándar comenzando por la aproximación

$$d_1 \simeq \frac{d}{1 + h_t/h_r}$$

Para calcular la intensidad del campo en el punto de recepción, se asume normalmente que la diferencia entre la longitud de camino entre la onda directa y la reflejada no afecta en forma significativa la atenuación, pero debe ser considerada la diferencia de fase entre ambos caminos. La longitud del camino directo es

$$R_1 = d \left(1 + \frac{(h'_t - h'_r)^2}{d^2} \right)^{1/2}$$

y la longitud del camino reflejado es

$$R_2 = d \left(1 + \frac{(h'_t + h'_r)^2}{d^2} \right)^{1/2}$$

La diferencia $\Delta R = R_2 - R_1$ es

$$\Delta R = d \left\{ \left(1 + \frac{(h'_t + h'_r)^2}{d^2} \right)^{1/2} - \left(1 + \frac{(h'_t - h'_r)^2}{d^2} \right)^{1/2} \right\}$$

y si $d \gg h'_t, h'_r$ se reduce a

$$\Delta R = \frac{2h'_t h'_r}{d}$$

La diferencia de fase correspondiente es

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R = \frac{4\pi h'_t h'_r}{\lambda d} \quad (3.8)$$

Si la intensidad del campo en la antena receptora debido a la onda directa es E_d , entonces el campo total recibido E es

$$E = E_d[1 + \rho e^{-j\Delta\phi}]$$

donde ρ es el coeficiente de reflexión de la Tierra ($\rho = |\rho|e^{j\theta}$). En la práctica, la Tierra no es ni un conductor ni un dieléctrico perfecto, por lo tanto el coeficiente de reflexión depende de las constantes del terreno, en particular, de la constante dieléctrica ε y de la conductividad σ .

Entonces,

$$E = E_d\{1 + |\rho|e^{-j(\Delta\phi-\theta)}\} \quad (3.9)$$

Esta ecuación se puede utilizar para calcular la intensidad de campo recibida en cualquier punto, pero hay que tener en cuenta que la curvatura de la Tierra esférica produce una cierta divergencia de la onda reflejada. Este efecto puede ser tenido en cuenta utilizando en la ecuación (3.9) un valor de ρ que difiera del usado para la reflexión en una superficie plana; la modificación apropiada consiste en multiplicar dicho valor por un factor de divergencia D dado por:

$$D \simeq \left(1 + \frac{2d_1d_2}{r_e(h'_t + h'_r)}\right)^{-1/2}$$

El valor de D puede ser del orden de 0.5, por lo cual el efecto de la onda reflejada en la Tierra se reduce considerablemente.

3.2.2. Propagación sobre Tierra plana

Para distancias menores a unas pocas decenas de kilómetros, es posible ignorar la curvatura de la Tierra y asumir que la superficie es plana como muestra la figura 3.2. Si además se asume que $\rho = -1$, entonces la ecuación (3.9) se convierte en:

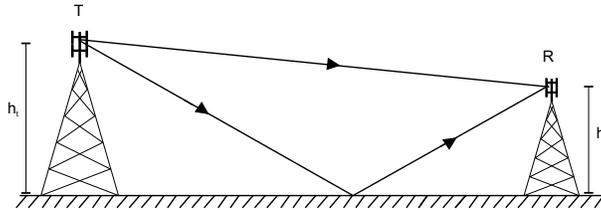


Figura 3.2: Propagación sobre Tierra plana

$$E = E_d[1 - e^{(-j\Delta\phi)}] = E_d[1 - \cos \Delta\phi + j \sin \Delta\phi]$$

De esta forma,

$$|E| = |E_d|[1 + \cos^2 \Delta\phi - 2 \cos \Delta\phi + \sin^2 \Delta\phi]^{1/2} = 2|E_d| \sin \Delta\phi/2$$

y utilizando la ecuación (3.8), con $h'_t = h_t$ y $h'_r = h_r$,

$$|E| = 2|E_d| \sin \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d}$$

La potencia recibida P_r es proporcional a E^2 entonces

$$P_r \propto 4|E_d|^2 \sin^2 \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right) = 4P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_t G_r \sin^2 \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right)$$

$$\frac{P_r}{P_t} = 4 \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_t G_r \sin^2 \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right) \quad (3.10)$$

En una forma logarítmica conveniente, la ecuación (3.10) puede ser escrita como:

$$L_{TP}(dB) = -10 \log G_t - 10 \log G_r - 20 \log \lambda + 20 \log 2\pi + 20 \log d - 20 \log \left[\sin \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right) \right]$$

y en comparación con la ecuación (3.3) podemos escribir la “pérdida básica” entre antenas isotrópicas como:

$$L_{BTP}(dB) = -20 \log \lambda + 20 \log 2\pi + 20 \log d - 20 \log \left[\sin \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right) \right]$$

Aproximación

Si $d \gg h_t, h_r$ resulta

$$\frac{P_r}{P_t} = G_T G_r \left(\frac{h_t h_r}{d^2} \right)^2 \quad (3.11)$$

La ecuación (3.11) se conoce como la *ecuación de propagación en Tierra plana*. Difiere de la ecuación de propagación en espacio libre (3.1) en dos aspectos importantes. En primer lugar, al asumir que $d \gg h_t, h_r$, el ángulo $\Delta\phi$ es pequeño y λ se cancela en la ecuación (3.11), resultando independiente de la frecuencia. En segundo lugar, se obtiene una relación inversamente proporcional a la cuarta potencia de la distancia en lugar de una relación inversa con el cuadrado de la misma, asemejándose más a lo que sucede en entornos urbanos. Esto significa una disminución más rápida de la potencia recibida con la distancia, 12dB por cada duplicación de la misma.

Es importante notar que la ecuación (3.11) solamente aplica en rangos donde la relación $d \gg h_t, h_r$ es válida. Cerca del transmisor, la ecuación (3.10) debe ser utilizada y esto se traduce en mínimos y máximos alternados en la intensidad de la señal.

La ecuación (3.11) escrita en decibeles queda:

$$L_{TPA}(dB) = -10 \log G_t - 10 \log G_r - 20 \log h_t - 20 \log h_r + 40 \log d$$

siendo la “pérdida básica”

$$L_{BTPA}(dB) = 40 \log d - 20 \log h_t - 20 \log h_r$$

3.2.3. Propagación sobre una superficie rugosa

En la sección anterior se consideró una superficie reflectora lisa y entonces el análisis fue basado en la hipótesis de que se da una reflexión perfecta en el punto en que la onda transmitida incide en la superficie de la Tierra. Cuando la superficie es irregular, esta hipótesis deja de ser realista dado que una superficie rugosa presenta muchas facetas a la onda incidente. En estas condiciones, la caracterización mediante un simple coeficiente de reflexión no es apropiada debido a que la naturaleza irregular de la superficie resulta en una situación impredecible. Solo una pequeña fracción de la energía incidente será reflejada en la dirección de la antena receptora, y la onda reflejada en la superficie de la Tierra podrá tener una contribución despreciable en la señal recibida.

En estas circunstancias es necesario definir qué constituye la superficie rugosa. Claramente, una superficie que puede considerarse rugosa a determinadas frecuencias y ángulos de incidencia puede aproximarse a una superficie lisa si estos parámetros son modificados. Una medida de la rugosidad es requerida para cuantificar el problema, y el criterio comúnmente utilizado es el *criterio de Rayleigh*. El problema se ilustra en la figura 3.3(a) y una idealización de la situación se ilustra en la figura 3.3(b).

Se considera los dos rayos A y B de la figura 3.3(b). El Rayo A es reflejado desde la parte superior de la superficie rugosa y el Rayo B desde la parte inferior. En relación al frente de onda AA' mostrado en la figura, la diferencia de distancia recorrida entre los dos rayos cuando alcanzan los puntos C y C' luego de la reflexión es:

$$\Delta l = (AB + BC) - (A'B' + B'C') = \frac{d}{\sin \psi} (1 - \cos 2\psi) = 2d \sin \psi \quad (3.12)$$

La diferencia de fase entre C y C' es entonces:

$$\Delta \theta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l = \frac{4\pi d \sin \psi}{\lambda} \quad (3.13)$$

Si la altura d es pequeña en comparación con λ entonces la diferencia de fase $\Delta \theta$ es también pequeña y la superficie aparenta ser lisa. Por otro lado, la condición de rugosidad extrema se da cuando $\Delta \theta = \pi$, los rayos reflejados están en contrafase y tienden entonces a cancelarse. Un criterio práctico para distinguir entre liso y rugoso es definir

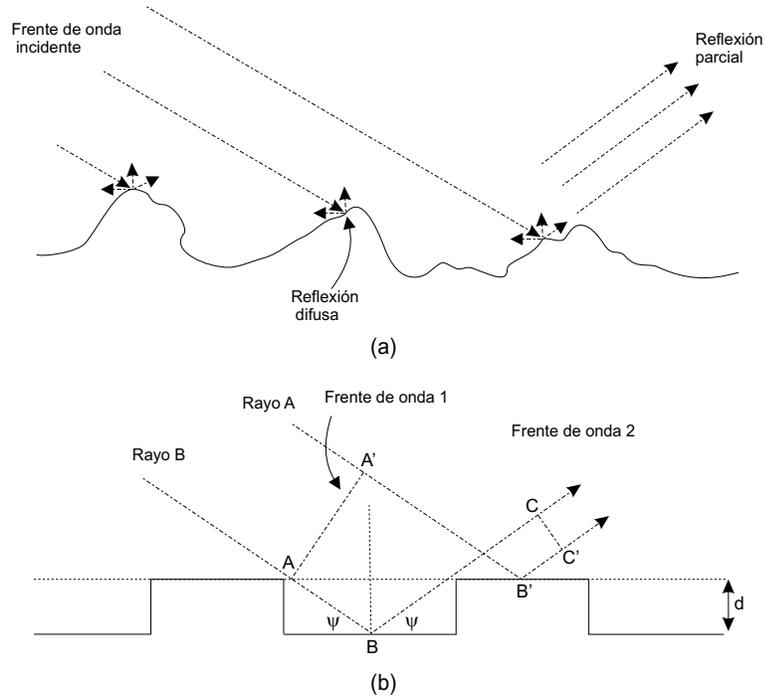


Figura 3.3: Reflexión en una superficie semi-rugosa: (a) situación de terreno práctica, (b) modelo idealizado

una superficie rugosa como aquella para la cual se cumple $\Delta\theta \geq \pi/2$. Sustituyendo esta expresión en la ecuación (3.13) se demuestra que para una superficie rugosa se cumple:

$$d \geq \frac{\lambda}{8 \sin \psi} \quad (3.14)$$

En el caso de sistemas móviles ψ es siempre muy pequeño y es admisible hacer la sustitución $\sin \psi = \psi$. En estas condiciones la ecuación (3.14) se reduce a:

$$d \geq \frac{\lambda}{8\psi}$$

En la práctica, la superficie de la Tierra se asemeja más a la figura 3.3(a) que a la superficie idealizada de la figura 3.3(b) y el valor comúnmente utilizado como medida de la altura de la ondulación del terreno es σ , la desviación estándar de las irregularidades de la superficie en relación a la altura media. El criterio de Rayleigh es expresado entonces escribiendo la ecuación (3.13) como:

$$\Delta\theta = \frac{4\pi\sigma \sin \psi}{\lambda} \simeq \frac{4\pi\sigma\psi}{\lambda}$$

Para $\Delta\theta < 0,1$ hay reflexión perfecta y la superficie puede considerarse lisa. Para $\Delta\theta > 10$ hay una alta reflexión difusa y la onda reflejada es lo suficientemente pequeña como para ser descartada.

Capítulo 4

Propagación sobre terrenos irregulares

4.1. Principio de Huygens

En general, cuando se analizan los fenómenos de reflexión y refracción, se asume que las superficies reflectoras y las regiones refractantes son grandes en comparación a la longitud de onda del frente incidente. Sin embargo, cuando el frente de onda encuentra un obstáculo o una discontinuidad que no cumple dicha propiedad, es posible utilizar el *principio de Huygens*. Éste se puede deducir de las ecuaciones de Maxwell, y básicamente dice que cada punto de un frente de onda se comporta como una fuente puntual de ondas secundarias. En la figura 4.1 se puede apreciar como un frente de onda se mueve desde AA' hasta BB' . Las ondas esféricas generadas por cada punto en AA' se combinan para generar un nuevo frente de onda en BB' tangencial a todas las ondas esféricas con igual radio. En la figura también se pueden ver tres de las ondas esféricas arribando a BB' . Dado que el frente de onda debe propagarse hacia una dirección, se concluye que las ondas generadas por cada punto del frente de onda no tienen la misma amplitud en todas las direcciones. Por el contrario, si α es el ángulo formado entre la dirección de una de las ondas y la dirección de propagación del frente, entonces la amplitud de dicha onda será proporcional a $(1 + \cos \alpha)$ [6]. Considerando todos los puntos en AA' , se puede hallar la expresión de la onda en cualquier punto en BB' a través de una integral, cuya solución muestra que el campo en cualquier punto en BB' es exactamente igual al campo en el punto más cercano en AA' , salvo que tiene un retraso en la fase de $2\pi d/\lambda$.

4.1.1. Propagación por difracción

Ahora bien, el principio introducido en la sección 4.1 es válido también cuando el frente de onda se encuentra con un obstáculo. En ese caso, y suponiendo que dicho

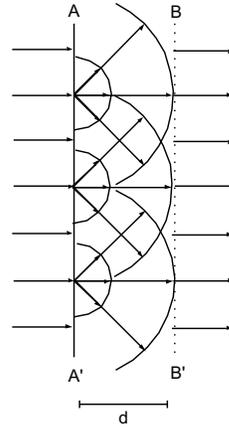


Figura 4.1: Aplicación sencilla del principio de Huygens

obstáculo es de un material perfectamente conductor (en condiciones de alta frecuencia, esta hipótesis no es muy restrictiva pues la mayoría de los materiales reflejan las ondas de frecuencia alta), se puede utilizar el principio de Huygens para hallar la expresión del campo más allá de dicho obstáculo. En la figura 4.2 se puede apreciar cómo el principio

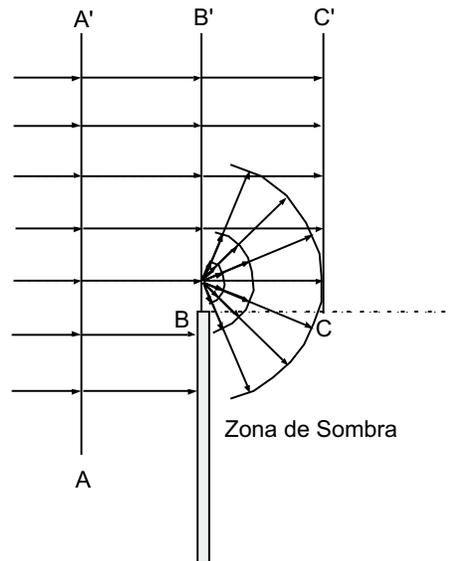


Figura 4.2: El principio de Huygens cuando hay un obstáculo presente

de Huygens muestra que las ondas se propagarán también en la zona de sombra (es decir, de la semirrecta BC hacia abajo), al contrario de lo que la teoría de rayos simple indica. Este fenómeno se llama *difracción*.

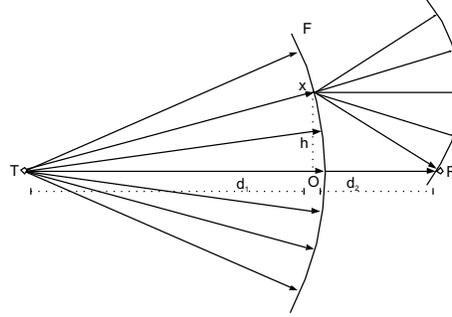


Figura 4.3: Geometría definiendo la ubicación del transmisor y el receptor, el frente principal y uno secundario

4.2. Elipsoides de Fresnel

Sea la geometría de la figura 4.3, donde T es una fuente puntual. Si para hallar la expresión del campo en R se aplica el principio de Huygens sobre el frente esférico generado por T , se llega intuitivamente al concepto de las denominadas *Elipsoides de Fresnel*. De todas las ondas generadas por las fuentes puntuales del frente F y que arriban a R , la que llega con mayor potencia es la generada por la fuente en O (es decir, la que “recorre” el camino más corto). El resto también arribará a R pero por un camino más largo y por lo tanto con la potencia disminuida por la propagación en vacío. Dependiendo de la fase con que arriben, aportarán a la potencia total de recepción o simplemente interferirán destructivamente y por ende la disminuirán. La fase con respecto a la onda generada en O de aquella generada en el punto x al arribar a R se puede calcular como:

$$\Phi = \Delta \frac{2\pi}{\lambda} = \left(\sqrt{d_2^2 + h^2} - \left(d_1 + d_2 - \sqrt{d_1^2 + h^2} \right) \right) \frac{2\pi}{\lambda} \simeq \frac{h^2}{2} \left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right) \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\pi}{2} \nu^2 \quad (4.1)$$

La aproximación es válida cuando $h \ll d_1, d_2$; ν es el denominado *parámetro de difracción de Fresnel-Kirchoff* y será utilizado en la expresión del campo en R .

En definitiva, el campo en R es la combinación de las ondas secundarias generadas a lo largo del frente F . Dichas ondas arribarán con defasaje respecto de la de mayor potencia como si ésta hubiese sido generada en T y aquéllas también hubiesen sido generadas en T pero pasando por su punto generador en el frente (x en la figura 4.3) antes de arribar a R . Por lo tanto, si la distancia entre T y x más la distancia entre x y R está entre $\frac{2k\lambda}{2}$ y $\frac{(2k+1)\lambda}{2}$, la onda sumará a la potencia total, en caso contrario estará a contrafase con la onda principal e interferirá destructivamente. El lugar geométrico de los casos límites (donde la suma de las distancias es exactamente $\frac{k\lambda}{2}$) es una serie de elipsoides conocidas como *elipsoides de Fresnel*. Por lo dicho anteriormente, dichas elipsoides tienen como focos T y R y la k -ésima elipsoide tiene como radio a $\frac{k\lambda}{2}$. Además, obstaculizar zonas entre una elipsoide par y otro impar tiene como efecto

que la potencia de recepción sea mayor, y viceversa. En la figura 4.4 se pueden apreciar las primeras elipsoides y aquellas zonas donde un obstáculo aumenta la potencia total (en sombreado) y aquellas donde la disminuye (en blanco). De todas formas, la primera

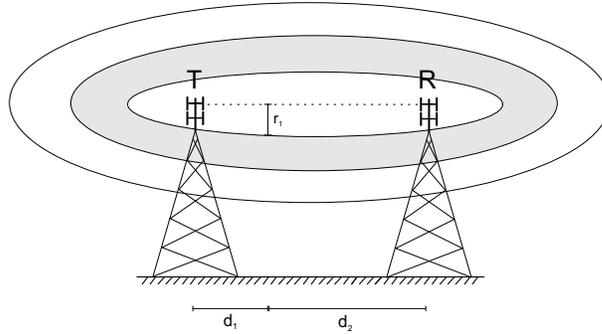


Figura 4.4: Las primeras elipsoides de Fresnel

elipsoide es la única con una importancia significativa sobre la potencia de recepción y un obstáculo en las demás cambia de manera insignificante a la misma. Existe una aproximación muy utilizada del radio de las circunferencias resultado de intersectar las sucesivas elipsoides con un plano perpendicular a la recta que une T con R (en figura 4.4 se puede ver el primer radio):

$$r_k = \sqrt{\frac{k\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

Además, se ha corroborado tanto empírica como teóricamente que para que un obstáculo sea significativo debe estar por encima del cuarenta por ciento del primer radio de fresnel (r_1). En definitiva, la *línea de vista* no se corrobora simplemente con que la línea que une T y R esté libre de obstáculos, sino que dicha línea debe estar libre en un entorno del sesenta por ciento del radio de la primera elipsoide de Fresnel.

Si se ubica un obstáculo como el de la figura 4.2 (es decir, un semiplano perfectamente conductor, comúnmente denominado cuchillo) a una distancia h por debajo de la recta que une T con R y a d_1 de T (y por lo tanto a d_2 de R), la expresión del campo en R resulta [6]:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{(1+j)}{2} \int_{\nu}^{\infty} e^{-j\frac{\pi}{2}t^2} dt \quad (4.2)$$

donde E_0 es el campo en el punto R si la propagación hubiese sido en el vacío y ν es el parámetro de difracción de Fresnel-Kirchoff. Ahora bien, muchas veces se encon-

trará esta integral en función de las integrales de Fresnel [7] $C(\nu)$ y $S(\nu)$:

$$\begin{aligned} \int_{\nu}^{\infty} e^{-j\frac{\pi}{2}t^2} dt &= \int_{\nu}^{\infty} \cos\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt - j \int_{\nu}^{\infty} \sin\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt \\ \int_{\nu}^{\infty} \cos\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt &= 1/2 - \int_0^{\nu} \cos\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt = 1/2 - C(\nu) \\ \int_{\nu}^{\infty} \sin\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt &= 1/2 - \int_0^{\nu} \sin\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt = 1/2 - S(\nu) \\ \Rightarrow \frac{E}{E_0} &= \frac{(1+j)}{2} [(1/2 - C(\nu)) - j(1/2 - S(\nu))] \end{aligned}$$

Una gráfica representativa de esta expresión puede apreciarse en la figura 4.5.

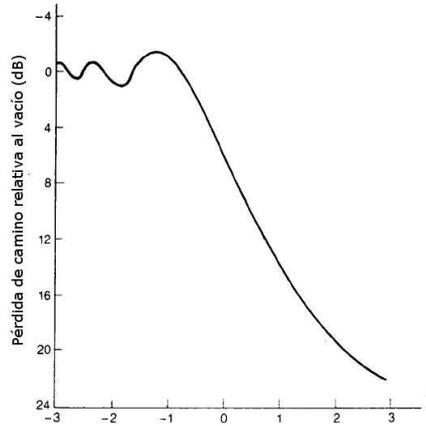


Figura 4.5: La atenuación por difracción por un solo obstáculo

4.3. Atenuación por múltiples cuchillos

La ecuación (4.2) es muy sencilla y utilizada cuando únicamente existe un obstáculo importante y puede ser razonablemente aproximado por un cuchillo. En entornos urbanos los obstáculos serán casi exclusivamente edificaciones, que dadas sus dimensiones respecto a la longitud de onda pueden ser aproximados por un cuchillo. Ahora bien, en muchas ocasiones no es única la edificación que obstruye significativamente el camino entre el receptor y el transmisor. Es por ello que es necesario contar con algún método que permita calcular la atenuación debida a la difracción en varios cuchillos.

La extensión de dicho análisis al caso de más de un cuchillo trae complicaciones desde el punto de vista matemático y es por eso que se han desarrollado y utilizado

varias aproximaciones desde hace ya unos años. Algunos de los métodos más usados son los siguientes:

- **Bullington:** Este método [8] sólo se aplica cuando se está ante dos cuchillos. Consiste básicamente en sustituirlos por uno solo “equivalente” . Aunque muy sencillo, tiene algunos problemas como subestimar aquellos cuchillos que se encuentren por debajo de la línea que une al transmisor y el receptor. Por lo general subestima la atenuación.
- **Epstein-Peterson:** Epstein y Peterson [9] intentaron corregir el método anterior, en cuanto a su falta de consideración respecto de algunos obstáculos de importancia. En este caso todos los cuchillos aportan a la atenuación y se puede aplicar para una cantidad arbitraria de ellos. La atenuación total se calcula como la suma (en dB) de la atenuación que genera cada cuchillo entre el anterior y el siguiente. De todas formas es bastante inexacto, sobre todo cuando dos obstáculos se encuentran demasiado juntos entre sí.
- **Deygout:** Éste [10] es una variante del anterior. Primero se determina cuál es el cuchillo más “importante” del perfil, calculando el parámetro de Fresnel para cada cuchillo como si el resto no existiera. Una vez identificado, se calcula la atenuación que genera (nuevamente como si los demás no estuvieran) y finalmente se suman las atenuaciones debidas al resto en la misma forma que en el método de Epstein-Peterson. Presenta inexactitudes cuando algunos cuchillos están muy próximos, y además ante la presencia de muchos obstáculos tiende a sobreestimar la atenuación.

4.3.1. Método de Vogler

El método presentado en esta sección, por las características enumeradas a continuación, es el elegido para el cálculo de la atenuación por difracción en múltiples cuchillos.

Como se vio anteriormente, todos los métodos sufren del problema de poder tomar en cuenta sólo una cantidad limitada de cuchillos en el perfil, cuando no padecen ciertas inexactitudes. Además, son todas aproximaciones heurísticas y no tienen rigor ni fundamento de ningún tipo, salvo la empírica. El primer método que logró subsanar todos estos problemas (una solución teórica exacta para una cantidad arbitraria de obstáculos) es el desarrollado por Vogler [11][12] basado en un trabajo anterior de Furutsu [13], quien llega a resultados acerca de la propagación sobre terrenos irregulares y en particular sobre obstáculos romos¹, caracterizados por su radio de curvatura y constantes eléctricas del suelo. Vogler toma dichos resultados y calcula la atenuación en el caso particular en que los radios de curvatura tienden a cero. La atenuación (relativa a la atenuación en espacio vacío) así obtenida se calcula de la siguiente forma (la geometría se define en la figura 4.6):

¹Obtusos y sin punta

$$A_N = \frac{1}{2^N} C_N e^{\sigma_N} \left(\frac{2}{\pi^{1/2}} \right)^N \int_{\beta_1}^{\infty} \dots \int_{\beta_N}^{\infty} e^{2f - (x_1^2 + \dots + x_N^2)} dx_1 \dots dx_N \quad (4.3)$$

donde

$$f = \begin{cases} 0 & N = 1 \\ \sum_{m=1}^{N-1} \alpha_m (x_m - \beta_m) (x_{m+1} - \beta_{m+1}) & N \geq 2 \end{cases}$$

$$\sigma_N = \sum_{m=1}^N \beta_m^2$$

$$C_N = \begin{cases} 1 & N = 1 \\ \left[\frac{r_2 r_3 \dots r_N r_T}{(r_1 + r_2)(r_2 + r_3) \dots (r_N + r_{N+1})} \right]^{1/2} & N \geq 2 \end{cases}$$

$$r_T = \sum_{m=1}^{N+1} r_m$$

$$\alpha_m = \left[\frac{r_m r_{m+2}}{(r_m + r_{m+1})(r_{m+1} + r_{m+2})} \right]^{1/2}$$

$$\beta_m = \theta_m \left[jk \frac{r_m r_{m+1}}{2(r_m + r_{m+1})} \right]^{1/2}$$

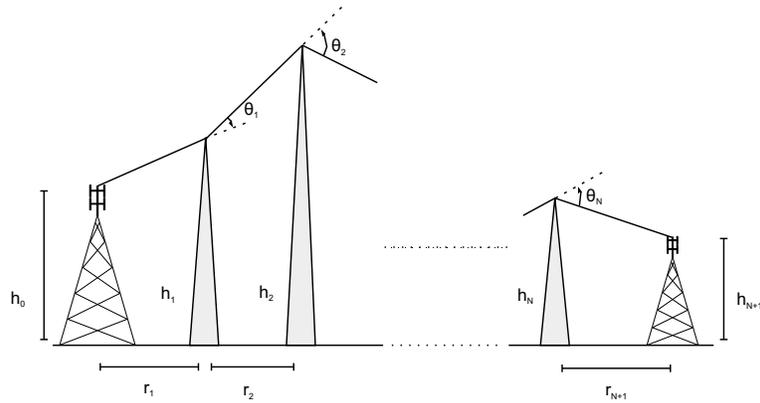


Figura 4.6: Representación de un perfil de cuchillos

Dado que uno de los extremos de integración es complejo, cabe la pregunta de cuál es la curva por donde se debe integrar. Como esta fórmula se basa en la definición de la *error function* [7], las restricciones son las mismas; entonces:

$$\begin{aligned} \arg(x_m) &\xrightarrow{x_m \rightarrow \infty} \alpha \\ \text{donde } |\alpha| &< \frac{\pi}{4} \end{aligned}$$

Vogler continúa luego transformando la integral en una serie cuyos términos dependen ahora de la *repeated error integral* [7]. Esto lo justifica por un mero tema computacional, pues sostiene que la integral así planteada era en ese momento, de muy difícil resolución.

Vale la pena destacar que los parámetros α y β son fundamentales pues dan una idea somera del perfil en cuestión. El primero mide qué tan apareados están dos cuchillos sucesivos. Si $r_{m+1} \ll r_m, r_{m+2}$, $\alpha_m \simeq 1$, lo cual indica que los cuchillos $m+1$ y m están muy próximos entre sí en comparación con el resto y podrían ser sustituidos por uno equivalente. La parte real de β mide qué tan significativo es el cuchillo en cuestión. Cuanto más grande sea (menos negativo), mayor es la importancia del cuchillo en el perfil dado que cuanto mayor sea θ más alto será el cuchillo respecto al siguiente.

Capítulo 5

Modelos de propagación

En este capítulo se presentan algunos de los modelos de propagación más difundidos para medios urbanos y suburbanos, que fueron a su vez implementados en la herramienta de software. La propagación en dichos entornos resulta de una diversidad de mecanismos debido a su topografía, variable y compleja, que combina edificios, calles, parques, etc., además de obstáculos ocasionales como vehículos de distinto porte. Esto tiene una gran influencia sobre la pérdida de propagación y caracterización del canal de radio, y los modelos de predicción deben tener en cuenta esta influencia en mayor o menor medida. Es así que surge un compromiso entre complejidad, exactitud, rapidez y costo.

Los métodos se clasifican básicamente en tres grupos:

- *Empíricos*. Se basan en numerosas medidas de campo, a partir de las cuales se obtienen fórmulas por medio de ajustes.
- *Semiempíricos*. Se basan en teorías físicas y mecanismos de propagación de las ondas electromagnéticas. Incorporan algunas características del entorno (por lo que requieren ciertos datos de morfología del terreno), y se complementan con medidas para el ajuste de sus parámetros.
- *Físicos*. Se apoyan en la teoría de rayos y en el estudio de interacciones entre los rayos que enlazan el transmisor y receptor y las estructuras interpuestas. Exigen la disponibilidad de detalle de edificios, calles, etc., así como de herramientas informáticas.

Cabe aclarar que estos modelos proporcionan los niveles medianos de señal, no la predicción exacta del valor de potencia en un punto dado, lo cual constituye un problema electromagnético sumamente complejo (por no decir irresoluble). Para obtener una descripción completa de la señal sería necesario añadir una distribución estadística de estos, así como una medida del apartamiento temporal y frecuencial.

5.1. Modelo de Okumura-Hata

5.1.1. Modelo de Okumura

Okumura *et al.* [14] desarrollaron en 1968 un método para predecir el valor mediano de la pérdida de camino en base a una serie de medidas en y alrededor de la ciudad de Tokio. Aunque fue de los primeros trabajos en tratar la propagación en entornos urbanos y proponer un modelo para predecir la pérdida de camino, hasta el día de hoy continúa siendo uno de los modelos más usados (en su versión analítica y mejorada, que se verá más adelante) por su sencillez, razonable precisión y versatilidad.

El método consiste en hallar la pérdida de camino (relativa a la atenuación en vacío) mediante curvas creadas por los autores. Está conformado por varios términos, donde el que podría denominarse “principal” depende de la distancia entre el móvil y la radiobase y de la frecuencia de transmisión ($A_{mu}(f, d)$, ver figura 5.1). Ésta es la pérdida relativa al vacío para entornos urbanos sobre terrenos suavemente ondulados con altura efectiva de 200 m y 3 m de antena transmisora y receptora respectivamente; para el probable caso en que las condiciones mencionadas no se cumplan existen factores correctivos. Por ejemplo, de las curvas que se pueden apreciar en la figura 5.2 se pueden obtener

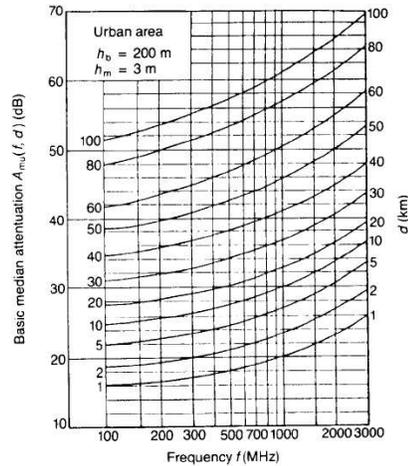


Figura 5.1: Representación gráfica de la mediana de la pérdida de camino en función de la frecuencia y la distancia según el método de Okumura

correcciones al valor de la pérdida de camino debidas a otras alturas de transmisor y receptor (H_{tu} y H_{ru}). La pérdida de camino resulta:

$$L_{Okumura} = L_{EL} + A_{mu} + H_{tu} + H_{ru}$$

donde L_{EL} es la atenuación por la propagación en vacío vista en la sección 3.1.

Éstas no son las únicas correcciones disponibles. Existen también factores correctivos que toman en cuenta el entorno (urbano, suburbano y rural), la regularidad del

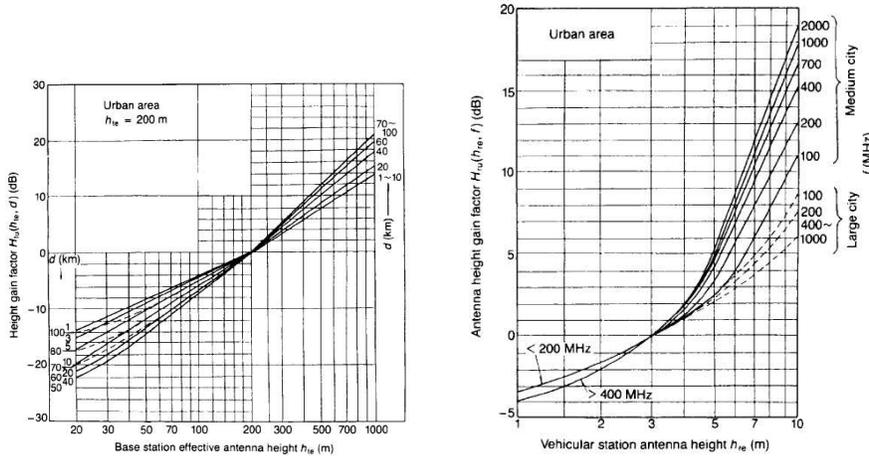


Figura 5.2: Correcciones para altura del transmisor y receptor según el método de Okumura

terreno y la orientación de las calles, todos en forma gráfica.

El modelo tiene algunos problemas no menores. Es casi puramente gráfico, lo que lo hace muy difícil de implementar en software. En el momento en que se desarrolló se tenían en mente únicamente macroceldas donde la antena transmisora estuviera por encima de las edificaciones circundantes, dando resultados erróneos en caso contrario. Hoy en día, con el uso muy frecuente de micro y picoceldas el modelo se vuelve en esos casos inaplicable. Otro factor a tener en cuenta es que, dado que las medidas se tomaron en Tokio, la correlación entre las medidas reales y la predicción es muy dependiente de que el entorno sea similar al de dicha ciudad. El método no especifica qué hacer cuando algún parámetro queda por fuera del dominio de las funciones que aparecen en las gráficas, se puede extrapolar pero no se asegura que eso sea lo más correcto. También algunas definiciones pueden devolver valores inutilizables (por ejemplo, si la antena trasmisora es más baja que el terreno circundante su altura efectiva tal cual la define Okumura resultaría negativa).

5.1.2. Modelo de Okumura-Hata

Con la intención de hacer más sencillo y automatizable el método de Okumura, Hata [15] halló una expresión analítica para las curvas del mismo. Es decir, que la pérdida de camino puede calcularse mediante funciones, que comparada con las curvas originales tiene diferencias que muy raramente exceden el decibel. La única desventaja con respecto al original, es que Hata no tomó en cuenta las correcciones por el tipo de terreno y es válido únicamente para terrenos suavemente ondulados.

Las fórmulas para los distintos entornos son:

Entorno Urbano

$$L_{OH_{urbano}}(dB) = 69,55 + 26,16 \log f - 13,82 \log h_t - a(h_r) + (44,9 - 6,55 \log h_t) \log d$$

donde

$$\begin{array}{ll} 150 \text{ MHz} \leq f \leq 1500 \text{ MHz} & \text{frecuencia de transmisión en MHz} \\ 30 \text{ m} \leq h_t \leq 200 \text{ m} & \text{altura del transmisor en metros} \\ 1 \text{ km} \leq d \leq 20 \text{ km} & \text{distancia entre el móvil y la base en kilómetros} \end{array}$$

$a(h_r)$ es el factor correctivo debido a la altura del receptor y depende del tamaño de la ciudad.

Para ciudades de pequeño o mediano porte:

$$a(h_r) = (1,1 \log f - 0,7)h_r - (1,56 \log f - 0,8)$$

Para ciudades grandes:

$$a(h_r) = \begin{cases} 8,29(\log 1,54h_r)^2 - 1,1 & f \leq 200 \text{ Mhz} \\ 3,2(\log 11,75h_r)^2 - 4,97 & f \geq 400 \text{ Mhz} \end{cases}$$

donde $1 \text{ m} \leq h_r \leq 10 \text{ m}$.

Entorno suburbano

$$L_{OH_{suburbano}}(dB) = L_{OH_{urbano}} - 2 [\log (f/28)]^2 - 5,4$$

Entorno rural

$$L_{OH_{rural}}(dB) = L_{OH_{urbano}} - 4,78(\log f)^2 + 18,33 \log f - 40,94$$

La expresión analítica de las curvas de Okumura resultó en la posibilidad de poder implementar el modelo en software. De todas formas, hereda los mismos problemas del original y empeora algunos debido a que no toma en cuenta los distintos tipos de terreno. Es así que para casos extremos como zonas muy abiertas o terreno irregular, el modelo predice valores con errores excesivos.

5.1.3. Modelo de Okumura-Hata COST231

Éste es el modelo al que generalmente se refiere como Okumura-Hata. El modelo original se puede utilizar para frecuencias de transmisión menores a 1500 MHz. Ahora bien, las tecnologías celulares que hoy en día son las más extendidas utilizan frecuencias por encima de dicho rango (por ejemplo, GSM utiliza las bandas de 1800 y 1900 MHz). Por ello, el grupo de trabajo COST Action 231 extendió el rango de frecuencias donde el modelo es válido. El resultado es una nueva fórmula para el caso en que la frecuencia esté entre los 1500 y 2000 MHz. Ésta resulta [16]:

$$L_{OH-COST}(dB) = 46,3 + 33,9 \log f - 13,82 \log h_t - a(h_r) + (44,9 - 6,55 \log h_t) \log d + C$$

donde $a(h_r)$ ya se definió y C vale 0 dB para ciudades de mediano porte y centros suburbanos y 3 dB para centros metropolitanos.

5.2. Modelo de Erceg-SUI

Este modelo, presentado por Vinko Erceg *et al.* en 1999 [17], es un modelo empírico de predicción de pérdida de camino basado en exhaustivas mediciones realizadas por *AT&T Wireless Services* a lo largo del territorio de Estados Unidos, cubriendo 95 macroceldas de 1.9 GHz (por detalles de la campaña de medidas ver [17]).

Se aplica a entornos suburbanos, y a su vez distingue entre tres diferentes categorías de terreno. La caracterización consiste en una curva lineal de potencia en función de distancia (ambos ejes en escala logarítmica), con una variación gaussiana entorno a dicha recta debida al efecto de *shadowing*, variaciones de potencia provocadas principalmente por la vegetación. El aspecto más novedoso del modelo es que tanto el exponente de pérdida de camino γ (pendiente de la recta), como la desviación estándar del *shadowing*, σ , varían aleatoriamente de una celda a otra, y esto es modelado estadísticamente mediante variables aleatorias gaussianas cuyos parámetros dependen explícitamente de la altura del móvil y del tipo de terreno.

Con este modelo se intentan cubrir algunas carencias de los modelos de predicción ya existentes, de cara a los nuevos sistemas de comunicación (como servicios de telefonía fija inalámbrica) que tienen una mayor exigencia en el tipo de tráfico, y han motivado ciertas tendencias en los sistemas celulares como ser reducción del tamaño de las celdas, disminución de la altura de las radiobases y aumento de las frecuencias. Por ejemplo, el modelo de Okumura-Hata, que es el más usado para entornos suburbanos de macroceldas, no da buenos resultados para los casos de altura de radiobase baja (menor a 30 m), altura de móvil alta (mayor que 2 m), terrenos ondulados o con alta densidad de vegetación; limitaciones que se corrigen en este nuevo modelo, de creciente popularidad en la actualidad. El mismo es parte de la caracterización de los canales inalámbricos denominados *SUI channels*, desarrollados por el grupo de trabajo de la Stanford University Interim, que incluyen además el modelado del *mutipath delay spread*, las variaciones de señal (*fading*), el *Doppler spread* e interferencia [18].

Como se dijo anteriormente, distingue dentro del entorno suburbano tres categorías diferentes de terreno. Las condiciones de mayor pérdida de camino se engloban en la categoría A, terreno ondulado con densidad de vegetación media a alta. Le sigue la categoría B, que incluye tanto terrenos ondulados con baja densidad de vegetación como terrenos llanos pero densamente arbolados. Finalmente, la categoría de condiciones más favorables para la propagación (categoría C) es aquella caracterizada por terrenos llanos que a su vez poseen baja densidad de árboles. Ha dado también buenos resultados la aplicación de este modelo en entornos urbanos [19][18]; lo más apropiado parecería ser utilizar los parámetros del terreno tipo B, aunque de acuerdo a las características del entorno podría también usarse el A.

La pérdida de camino en decibeles puede escribirse como:

$$PL(dB) = A + 10\gamma \log(d/d_0) + s \quad d \geq d_0 \quad (5.1)$$

donde A está dado por la fórmula de espacio libre

$$A = 20 \log(4\pi d_0/\lambda) \quad (5.2)$$

siendo $d_0 = 100$ m la distancia de referencia y λ la longitud de onda en metros.

El exponente de pérdida de camino, γ , es una variable aleatoria gaussiana, que puede expresarse de la siguiente manera:

$$\gamma = (a - bh_t + c/h_t) + x\sigma_\gamma$$

El término entre paréntesis corresponde a la media y σ_γ a la desviación estándar (x es una v.a. $N[0, 1]$). h_t es la altura (sobre el terreno) de la radiobase en metros; a , b y c , con sus respectivas unidades, son constantes ajustadas empíricamente, que al igual que σ_γ dependen de la categoría de terreno y están dadas por el cuadro 5.1.

El término s de la ecuación (5.1) representa el efecto de *shadowing* y se modela como una variable aleatoria lognormal de media nula, cuya desviación estándar también es una variable aleatoria gaussiana que puede escribirse como:

$$\sigma = \mu_\sigma + z\sigma_\sigma$$

en donde μ_σ es la media, σ_σ la varianza y z una v.a. $N[0, 1]$. Los valores numéricos de estas constantes para las diferentes categorías de terreno pueden encontrarse también en el cuadro 5.1.

Factores correctivos

En la ecuación (5.2) se considera la dependencia de la pérdida de camino con la frecuencia, pero no se toman en cuenta las variaciones por pérdidas de difracción para

Parámetro	Categoría de terreno		
	A	B	C
a	4.6	4.0	3.6
b (m ⁻¹)	0.0075	0.0065	0.0050
c (m)	12.6	17.1	20.0
σ_γ	0.57	0.75	0.59
μ_σ	10.6	9.6	8.2
σ_σ	2.3	3.0	1.6

Cuadro 5.1: Valores numéricos de los parámetros del modelo de Erceg

frecuencias distintas a 1.9 GHz. Esto puede corregirse agregando un término a la ecuación (5.1) debido a las pérdidas por difracción, basándose en los resultados presentados en [20][21] para entornos suburbanos

$$C_f = 6 \log(f/1900)$$

siendo f la frecuencia en MHz.

El modelo fue originalmente desarrollado para el caso en que la altura del móvil es de 2 m, pero puede ser extendido a otras condiciones en base a los aportes de [22], adicionando otro factor correctivo a la ecuación (5.1)

$$C_h = \begin{cases} -10,8 \log(h_r/2) & \text{para categorías A y B} \\ -20,0 \log(h_r/2) & \text{para categoría C} \end{cases}$$

donde h_r es la altura (sobre el terreno) de la antena móvil en metros.

Finalmente, la ecuación de pérdida de camino incluyendo los factores correctivos puede escribirse como:

$$PL_{total} = PL + C_f + C_h$$

El rango de validez de los parámetros es:

$$\begin{array}{ll} 450 \text{ MHz} \leq f \leq 11,2 \text{ GHz} & \text{frecuencia de transmisión} \\ 10 \text{ m} \leq h_t \leq 80 \text{ m} & \text{altura del transmisor} \\ 2 \text{ m} \leq h_r \leq 10 \text{ m} & \text{altura del móvil} \\ 0,01 \text{ km} \leq d \leq 8 \text{ km} & \text{distancia entre el móvil y la base} \end{array}$$

5.3. Modelo de Walfisch-Ikegami

5.3.1. Modelo de Walfisch-Bertoni

Hasta la publicación del paper de Walfisch y Bertoni [23] los modelos de propagación en entornos urbanos eran ajustes a curvas con el agregado de factores de corrección

heurísticos. No se entendían los mecanismos de propagación subyacentes, sobre todo los que tenían que ver con la propagación sobre las edificaciones presentes. Ellos desarrollaron un modelo que, aunque como se verá más adelante supone hipótesis a veces demasiado restrictivas e irreales, tiene una base teórica basada principalmente en la pérdida por difracción en múltiples cuchillos (basado en una teoría distinta de la explicada en la sección 4.3.1), y considera que los mecanismos de propagación dominantes en un entorno urbano son los que se ilustran en la figura 5.3.

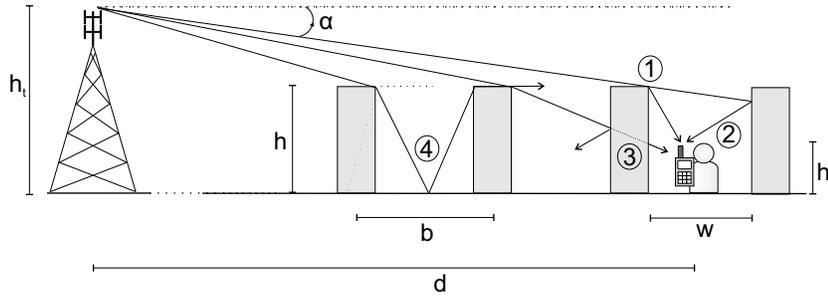


Figura 5.3: Mecanismos de propagación dominantes en un entorno urbano según Walfisch y Bertoni

Basados en trabajos anteriores [24][14][15], concluyen que los caminos principales hacia el móvil son aquel que se propaga sobre los edificios y difracta en el último (el camino 1 en la figura 5.3) y aquel que se refleja desde el siguiente hacia el móvil (camino 2). Existen otros caminos para arribar al receptor (por ejemplo los caminos 3 y 4), pero estos se consideran despreciables en su aporte total a la potencia.

Los edificios están aleatoriamente ubicados y no están alineados desde una calle hacia otra o con el trayecto radiobase-móvil, por lo tanto la propagación entre edificios no produce una contribución mayor a la señal recibida. El modelo representa los edificios como una serie de cuchillos y toma en cuenta aquellos que, para un valor dado de α (ver figura), penetran la primer zona de Fresnel. La pérdida por difracción es entonces calculada mediante métodos numéricos. Para resolver el problema de la difracción sobre varios edificios ubicados en el camino de propagación y que tienen influencia en la misma, en particular para valores de α pequeños, es necesario realizar una serie de aproximaciones. Algunas de éstas son que todas las filas de edificios tienen la misma altura, que la propagación es perpendicular a la fila de edificios y que se considera la polarización vertical.

Para determinar el campo difractado en el nivel de la calle, es necesario establecer el campo incidente en el techo del edificio más próximo al móvil. Walfisch y Bertoni muestran que para un número grande de edificios esto se puede obtener como:

$$Q(\alpha) \approx 0,1 \left(\frac{\alpha \sqrt{b/\lambda}}{0,03} \right)^{0,9} \quad (5.3)$$

Esta es una adición a la dependencia con d^{-1} del campo irradiado, otorgando una dependencia total con $d^{-1,9}$. Esto resume una dependencia de la potencia de la señal recibida con $d^{-3,8}$, muy cercana a la de la propagación sobre el plano de la Tierra (d^{-4}) que es comúnmente utilizada en los modelos empíricos. Es así que la pérdida total consiste en tres factores: la pérdida entre antenas en espacio libre, la pérdida por difracción por múltiples cuchillos hasta el edificio más cercano al móvil y la pérdida por difracción desde este punto hasta el móvil a la altura de la calle. Asumiendo antenas isotrópicas, el primero de estos factores es la pérdida básica definida en el capítulo 3.1:

$$L_{BEL}(dB) = 32,44 + 20 \log f + 20 \log d \quad (5.4)$$

La ecuación (5.3) es utilizada para hallar $Q(\alpha)$, y α (expresado en radianes) está dado por:

$$\alpha = \frac{h_t - h}{d} - \frac{d}{2r_e} \quad (5.5)$$

donde $r_e \simeq 8,5 \times 10^3$ km es el radio efectivo de la Tierra.

La pérdida de camino asociada a la difracción al nivel de la calle depende de la existencia de edificios en la cercanía del móvil. Para las antenas receptoras cerca del nivel de la calle, una simple aproximación a este proceso se obtiene asumiendo que una fila de edificios se comporta como una pantalla absorbente en el centro de la fila. En dicho caso, la amplitud del campo en el móvil se obtiene multiplicando el campo en el techo por el siguiente factor:

$$\frac{\sqrt{\lambda}}{2\pi} \frac{1}{\left[\left(\frac{d}{2}\right)^2 + (h - h_r)^2\right]^{1/4}} \left[\frac{-1}{\gamma - \alpha} + \frac{1}{2\pi + \gamma - \alpha} \right] \quad (5.6)$$

donde h es la altura de los edificios y h_r es la altura de la antena del móvil como muestra la figura 5.3. Los ángulos α y γ están expresados en radianes con:

$$\gamma = \arctan[2(h - h_r)/b] \quad (5.7)$$

La expresión (5.6) puede simplificarse descartando $1/(2\pi + \gamma - \alpha)$ al compararlo con $1/(\gamma - \alpha)$ y asumiendo que α es pequeño al compararlo con γ .

El hecho de que haya *fading* en la señal recibida en el móvil indica que la componente del campo recibido debido a las reflexiones en los edificios próximos al móvil es de una amplitud similar a la recibida por la difracción directa desde los techos de los edificios próximos a él. Sin embargo, estas dos componentes tienen fases aleatorias, entonces el valor rms (*root mean square*) del campo total es la suma de los valores rms de cada componente individual. En este caso, la componente primaria del campo es mayor a la componente secundaria (debida a múltiples caminos) por un factor $\sqrt{2}$. Combinando las ecuaciones (5.4) y (5.7) con el factor $\sqrt{2}$, se obtiene una expresión de la reducción del campo sobre aquel obtenido entre las mismas antenas separadas una distancia d

en espacio libre. Expresada en dB, ésta es una expresión del exceso de pérdida de propagación sobre la pérdida en espacio libre y está dada por:

$$L_{ex} = 57,1 + A + \log f + 18 \log d - 18 \log(h_t - h) - 18 \log \left(1 - \frac{d^2}{17(h_t - h)} \right) \quad (5.8)$$

donde el último término en (5.8) considera la curvatura de la Tierra y puede descartarse en la mayoría de los casos. La influencia de la geometría de los edificios está contenida en el término:

$$A = 5 \log \left[\left(\frac{d^2}{2} \right) + (h - h_r)^2 \right] - 9 \log d \quad (5.9)$$

La pérdida total se halla sumando L_{ex} a la pérdida de propagación en vacío $L_{B_{EL}}$ para antenas isotrópicas.

$$L_{WB}(dB) = L_{B_{EL}} + L_{ex}$$

5.3.2. Modelo COST231 Walfisch-Ikegami

Durante el proyecto del COST231, un subgrupo propuso la combinación del modelo Walfisch-Bertoni con el modelo Ikegami, para mejorar la estimación de la pérdida de propagación al incluir más datos. Se incluyeron los siguientes cuatro factores:

- altura promedio de edificios (h)
- ancho de calles (w)
- separación de edificios (b)
- orientación de las calles respecto al camino de LOS (φ)

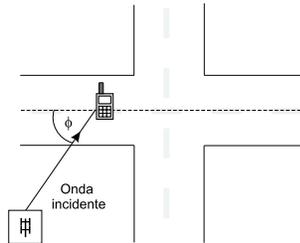


Figura 5.4: Definición del ángulo de orientación de la calle φ según el modelo COST231 Walfisch-Ikegami

El modelo hace la distinción entre los caminos con línea de vista (LOS) y aquéllos sin línea de vista (NLOS) como se describe a continuación.

Caso LOS

En este caso la señal pasa por un “cañón” formado en la calle por los edificios, donde se aplica una ecuación diferente a la de espacio libre:

$$L_{WI_{LOS}}(dB) = 42,6 + 26 \log d + 20 \log f \quad d \geq 20 \text{ m} \quad (5.10)$$

Esto fue desarrollado en base a medidas adquiridas en Estocolmo, Suecia. Tiene la misma forma que la ecuación de propagación en espacio libre, y las constantes son elegidas de tal forma que $L_{WI_{LOS}}$ es igual a la pérdida en espacio libre en $d = 20m$.

Caso NLOS

En el caso de que no haya LOS la pérdida básica de transmisión se compone de la pérdida en espacio libre L_{BEL} ((5.4)), la pérdida por difracción en múltiples cuchillos (L_{msd}) y la pérdida por difracción desde el techo de los edificios a la calle (L_{rts}). De esta forma:

$$L_{WI_{NLOS}}(dB) = \begin{cases} L_{BEL} + L_{rts} + L_{msd} & L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_{BEL} & L_{rts} + L_{msd} < 0 \end{cases}$$

La determinación de L_{rts} se basa en el principio dado por el modelo de Ikegami [25] pero con una función distinta de la orientación de la calle. La geometría se muestra en las figuras 5.3 y 5.4.

$$L_{rts} = -16,9 - 10 \log w + 10 \log f + 20 \log(h - h_r) + L_{ori} \quad (5.11)$$

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,354\varphi & 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\varphi - 35) & 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4,0 - 0,114(\varphi - 55) & 55^\circ \leq \varphi < 90^\circ \end{cases}$$

Cabe aclarar que L_{ori} es un factor que fue estimado de un número pequeño de medidas.

La pérdida por difracción en múltiples cuchillos fue estimada por Walfisch y Bertoni para el caso en que la radiobase está por encima de los techos ($h_t > h$). Esto fue extendido por COST para el caso en que la antena está por debajo de la altura media de edificaciones, usando una función empírica basada en medidas. Las ecuaciones relevantes son:

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log d + k_f \log f - 9 \log b \quad (5.12)$$

donde

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log[1 + (h_t - h)] & h_t > h \\ 0 & h_t \leq h \end{cases}$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & h_t > h \\ 54 - 0,8(h_t - h) & h_t \leq h \text{ y } d \geq 0,5 \text{ km} \\ 54 - 0,8(h_t - h) \frac{d}{0,5} & h_t \leq h \text{ y } d < 0,5 \text{ km} \end{cases}$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & h_t > h \\ 18 - 15 \frac{(h_t - h)}{h} & h_t \leq h \end{cases}$$

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0,7(f/925 - 1) & \text{para ciudades medianas y centros suburbanos} \\ & \text{con densidad de árboles mediana} \\ -4 + 1,5(f/925 - 1) & \text{para áreas metropolitanas} \end{cases}$$

El término k_a representa el aumento en la pérdida de propagación cuando la radiobase está por debajo de la altura de los techos. Los términos k_d y k_f consideran la dependencia de la pérdida de difracción con la distancia y la frecuencia, respectivamente. Si no se dispone de datos exactos se recomienda tomar:

$$\begin{aligned} h &= 3 \text{ m} \times (\text{número de pisos}) + \text{altura del techo} \\ \text{altura del techo} &= \begin{cases} 3 \text{ m} & \text{para techos puntiagudos} \\ 0 \text{ m} & \text{para techos planos} \end{cases} \\ b &= 20 \text{ a } 50 \text{ m} \\ w &= b/2 \\ \varphi &= 90^\circ \end{aligned}$$

La aplicación del modelo de COST se restringe a los siguientes rangos de parámetros:

$$\begin{array}{ll} 800 \text{ MHz} \leq f \leq 2000 \text{ MHz} & \text{frecuencia de transmisión} \\ 4 \text{ m} \leq h_t \leq 50 \text{ m} & \text{altura del transmisor} \\ 1 \text{ m} \leq h_r \leq 3 \text{ m} & \text{altura del móvil} \\ 0,02 \text{ km} \leq d \leq 5 \text{ km} & \text{distancia entre el móvil y la base} \end{array}$$

Da buenos resultados cuando la antena de la radiobase está por encima de los techos, produciendo errores con una media de 3dB y desviaciones estándar en el rango de 4-8 dB. Sin embargo, la performance se deteriora cuando h_t se aproxima a h y es bastante pobre cuando $h_t \ll h$.

5.3.3. Modelo MOPEM

El modelo de propagación para entornos urbanos de pequeñas macroceldas (MOPEM) surge como resultado de un proyecto de fin de carrera de estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República [26]. Este grupo presentó un modelo de propagación para entornos densamente urbanos en la banda de 850 a 900

MHz tomando como escenario de medición dos zonas urbanas de Montevideo, Pocitos y Punta Carretas.

El modelo está basado en el modelo COST231-WI anteriormente descrito y en el análisis de rayos por difracción múltiple. Sin embargo, revisa la hipótesis de considerar las filas de edificios como pantallas infinitas, tomando en cuenta los cortes en las filas de edificios en el cruce de calles. Este modelo considera la dependencia con la orientación de la calle respecto a la dirección de propagación, la variabilidad de la señal a lo largo de la calle por efecto de pantallas finitas y la influencia de la altura del terreno. Para ello, incorpora en la estimación de la atenuación la cota del terreno, la presencia de las esquinas (que adapta la hipótesis de pantallas infinitas en la difracción de múltiple pantalla) como elementos significativos y la incidencia del ángulo de orientación de la calle en la continuidad del modelo a los efectos de aumentar la exactitud de la estimación.

Es así que expresa la atenuación como la suma de cuatro términos independientes: la pérdida por propagación en el espacio libre L_{BEL} , la pérdida por difracción desde el techo del último edificio a la calle donde se encuentra el móvil L_{rts} , la pérdida por difracción multipantalla L_{msd} y el término L_{esq} de corrección por el mencionado efecto de levantar la hipótesis de multipantallas infinitas.

$$L_{MOPEM} = L_{BEL} + L_{rts} + L_{msd} + L_{esq}$$

El término L_{BEL} comprende la propagación en espacio libre y es el mismo que fue considerado en la ecuación (5.12) en el modelo de COST-WI detallado en la sección 5.3.2. Al término L_{rts} que representa la pérdida desde el último edificio difractante hasta el receptor móvil, el modelo MOPEM le agrega dos nuevos enfoques: la consideración de la cota del terreno incluida en la altura del móvil y el promedio de edificaciones y una nueva función del ángulo de orientación, resultando en:

$$L_{rts} = 1,87 - 10 \log w + 10 \log f + 10,4 \log(h - h_r) + L_{ori_{MOPEM}}$$

donde la función del ángulo hallada empíricamente, presenta la siguiente formulación:

$$L_{ori_{MOPEM}} = -2,8 \left(\frac{\phi}{45}\right)^4 + 13,2 \left(\frac{\phi}{45}\right)^3 - 29,5 \left(\frac{\phi}{45}\right)^2 + 30,3 \left(\frac{\phi}{45}\right) - 3,5$$

El término L_{msd} , modela la pérdida por difracción multipantalla, y es ajustado empíricamente con la distancia consiguiendo una mayor aplicabilidad del modelo MOPEM a la zona de estudio escogida durante el desarrollo del proyecto, resultando en:

$$L_{msd} = 54 - 18 \log[1 + (h_t - h)] + \left[-4 + 0,7 \left(\frac{f}{925} - 1\right)\right] \log f + 27,7 \log d - 9 \log b$$

Finalmente, L_{esq} es un término adicional considerado como un término de corrección por el efecto de pantallas finitas, modelando la variación de la señal a lo largo de la

cuadra.

$$L_{esq} = -11,32 + 3,3 \log d_{esq1} + \log d_{esq2}$$

donde d_{esq1} y d_{esq2} , son las distancias desde la ubicación del receptor a cada una de las esquinas de la calle considerada. Esta expresión es válida para puntos que disten a más de 7 m de ambas esquinas.

El error medio del modelo para la zona de estudio considerada en el proyecto fue de 0 dB y la desviación estándar del mismo fue de 5.1 dB.

5.4. Modelo propuesto: Vogler-Ikegami

Como se vio en la sección 5.3, el modelo de Walfisch-Ikegami toma algunas hipótesis que muchas veces no son ciertas y por ende repercuten negativamente en la exactitud de sus resultados. Son destacables las hipótesis ya mencionadas sobre la regularidad en las alturas de las edificaciones y una cantidad suficiente para que la aproximación asintótica en el cálculo de la atenuación por múltiples pantallas (L_{msd}) sea confiable. Que la cantidad de edificios entre el móvil y la base sea alta es en general verdad en macroceldas, donde la cobertura de cada celda es suficientemente grande para que en la mayoría de los puntos de cobertura sí se cumpla dicha hipótesis. En las microceldas utilizadas hoy en día, donde la cobertura de cada celda no sobrepasa el kilómetro de distancia, esa hipótesis es falsa. En cuanto a la regularidad en las edificaciones, ocurre en muchas zonas urbanas, aunque obviamente también debe haber una regularidad en el terreno subyacente, pues ésta también debe ser considerada en la altura edilícea (ver sección 5.3.3).

Además, aunque el grupo COST231 agregó factores correctivos para contemplar el caso en que la antena transmisora estuviera a la misma altura o por debajo de las edificaciones circundantes (como es el caso en microceldas), en la práctica el modelo falla y tiene errores que hacen que en tales ambientes no se utilice para realizar predicciones [16].

Por lo tanto, la falla del modelo se encuentra en el cálculo de L_{msd} . Con el objeto de mejorar la exactitud del modelo en general, pero principalmente pensando en los casos ya mencionados, en este proyecto se decidió proponer un nuevo modelo híbrido que calcule la atenuación hasta la última edificación con el método de Vogler (ver sección 4.3.1) y desde allí hasta el móvil mediante el modelo de Ikegami (en la formulación del modelo Walfisch-Ikegami). Es decir, la formula resulta:

$$L_{VI} = L_{BEL} + L_{rts} + L_{msd_vogler}$$

Esta corresponde a la misma formulación que en el caso de Walfisch-Ikegami, pero ahora el término L_{msd_vogler} se calcula con la integral (4.3) que se vio en la sección 4.3.1. En la figura 5.5 se ilustra el camino de propagación correspondiente a cada término de la ecuación.

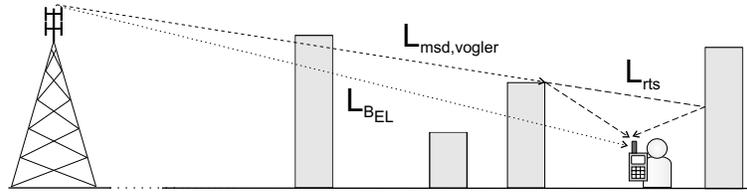


Figura 5.5: El perfil de edificios y los diferentes términos de la ecuación del modelo propuesto Vogler-Ikegami

Lo único que resta especificar es cuáles edificios se considerarán para crear el perfil necesario, dada la ubicación del transmisor, receptor y la disposición y tamaño de todas las edificaciones presentes. El criterio utilizado fue que un edificio formará parte del perfil siempre que tenga alguna influencia significativa en la atenuación. Esto es, siempre que la edificación se introduzca en el primer elipsoide de Fresnel más de determinado porcentaje del primer radio del mismo (ver sección 4.2). En particular se tomó un porcentaje del 50 % (edificios sombreados en la figura 5.6).

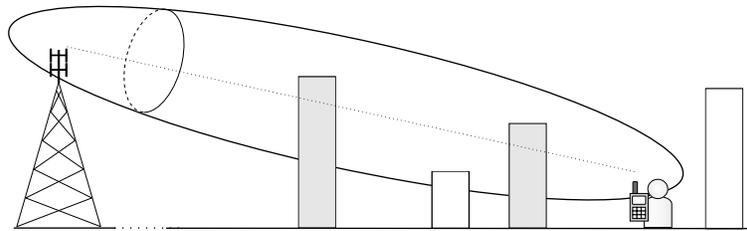


Figura 5.6: Consideración del perfil de edificios en el modelo propuesto Vogler-Ikegami

Los resultados concretos de este modelo se verán en las secciones siguientes, pero es de esperar una exactitud mayor en el caso que las edificaciones sean irregulares en su altura. De todas formas, la hipótesis subyacente de que el mecanismo de propagación dominante es por encima de los techos (y por lo tanto, hasta el móvil la mayoría de los rayos llegan sobre los edificios) sigue manteniéndose. Esto quiere decir que en aquellos casos donde la antena transmisora se encuentre por debajo de los techos circundantes, donde puede haber caminos entre el móvil y la base entre los edificios, este modelo sobreestimaré la atenuación de camino pues no tomará en cuenta dichos caminos. Lo mismo sucede en las inmediaciones de la radiobase, pues allí también son importantes.

Parte III

Desarrollo de Software

Capítulo 6

Aspectos previos al desarrollo de software

El producto final del presente proyecto consiste en una herramienta de software, que basada en la teoría anteriormente desarrollada, sea capaz de estimar la potencia mediana por sector de la señal recibida en cualquier punto del espacio, dada la topografía del terreno y las características de la red celular. En este capítulo se justifica la elección del lenguaje de programación utilizado para su desarrollo y se introduce el concepto de GIS, en el cual se basó el manejo de la información geográfica.

6.1. Elección del lenguaje de programación

Para el desarrollo de SAPO se optó por utilizar Java, dentro de la amplia gama de lenguajes de programación existentes. Java presenta varias ventajas que justifican su elección, siendo además un lenguaje con el cual los integrantes del presente proyecto ya se encontraban familiarizados. Entre las mismas se puede destacar:

- *Programación orientada a objetos.* Java permite aprovechar la flexibilidad y versatilidad de la programación orientada a objetos en el diseño de sus aplicaciones.
- *Simplicidad.* Está pensado para ser más fácil para el desarrollador que otros lenguajes orientados a objetos (como C++), permitiendo crear código más robusto en menor tiempo. Reduce en gran medida los errores más comunes de programación con lenguajes como C y C++ al eliminar muchas de las características menos usadas y más confusas de éstos, sin dejar de ofrecer toda la funcionalidad de un lenguaje potente. Su estructura simple y clara permite generar programas fácilmente legibles.
- *Portabilidad.* La plataforma Java proporciona una única interface estándar para ejecutar aplicaciones en cualquier máquina y en la mayoría de los sistemas

operativos, ya que es independiente de la plataforma de desarrollo. Un programa creado en Java, cuando es compilado se convierte en un código de bits de alto nivel que, en vez de ser específico de una arquitectura, incluye instrucciones para ser ejecutadas en una máquina virtual, independientemente del sistema operativo. Esto es posible gracias a que el corazón de la plataforma es la máquina virtual Java.

- *Amplia difusión.* El JDK¹ (*Java Development Kit*) es una herramienta libre de licencias (sin costo) y está respaldada por un gran número de proveedores. Su amplia difusión a nivel mundial permite un fácil acceso a documentación, bibliografía y foros. Cuenta con una rica gama de bibliotecas, herramientas para soporte de todo tipo de aplicaciones.
- *Robustez.* Java pone gran énfasis en chequeo de posibles errores e inconsistencias, realizando verificaciones tanto en tiempo de compilación como en tiempo de ejecución. La comprobación de tipos en Java ayuda a detectar errores lo antes posible en el ciclo de desarrollo. Cuenta con manejo de excepciones en tiempo de ejecución, lo cual le da al desarrollador la posibilidad de crear un programa robusto y capaz de continuar la ejecución en caso de presentarse un error.

La principal limitación de Java en comparación con otros lenguajes es la velocidad de ejecución; como los programas de Java son interpretados nunca alcanzan la velocidad de un verdadero ejecutable. En el caso del presente proyecto, los tiempos de ejecución no son un elemento crítico, ya que no tiene requerimientos de tiempo real. Si bien es un aspecto a tener en cuenta, la optimización de los tiempos no es un requisito indispensable, por lo cual no constituyó un elemento decisivo a la hora de hacer la elección, frente a ventajas como las anteriormente mencionadas. Sí se buscará la minimización de los tiempos de cálculo mediante el diseño e implementación de algoritmos eficientes.

Un aspecto importante en el desarrollo del presente software es la manipulación de información espacial, para lo cual se decidió trabajar en el marco de GIS (*Geographic Information System*) [27], por su gran utilidad y difusión. Java cuenta con herramientas específicas para el desarrollo de aplicaciones de este tipo, como se verá más en detalle en las siguientes secciones.

6.2. Introducción a GIS

La geografía no es solamente un área de conocimiento académico, es una disciplina de implicaciones multimillonarias tanto para los gobiernos como para el mundo de los negocios, ya que sirve como marco para el manejo de diversos tipos de conocimiento. GIS es justamente una tecnología que se encarga del tratamiento de información desde una perspectiva geográfica. Más específicamente, un Sistema de Información Geográfica o GIS es un sistema computacional que permite y facilita la creación y manejo de

¹ Creado por *Sun Microsystems*

información geo-referenciada. Esto implica la recolección, análisis, integración, almacenamiento, gestión y representación de datos espaciales y sus atributos asociados.

El concepto principal detrás de GIS es la asociación de objetos gráficos con una base de datos, por lo que se les suele llamar a los mismos *smart maps* (mapas inteligentes). La base de datos se encuentra asociada por un identificador común a los objetos gráficos de un mapa digital; de esta forma señalando un objeto se conocen sus atributos e, inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía.

GIS puede verse básicamente de tres maneras distintas:

- Como una base de datos de información geográfica (*geodatabase*).
- Como un conjunto de mapas en los cuales se visualizan determinadas características y sus relaciones en la superficie terrestre (*geovisualization*).
- Como una herramienta que puede tomar un conjunto de datos geográficos para analizarlos y transformarlos en un nuevo conjunto de datos (*geoprocessing*).

Toda aplicación GIS utiliza cada una de estas visiones en mayor o menor medida.

Otro concepto muy importante es el concepto de capas (*layers*), que se ilustra en la figura 6.1. El sistema separa la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla. Esta división conceptual facilita el entendimiento de cómo se interrelaciona la información, y permite la aplicación de diferentes combinaciones.

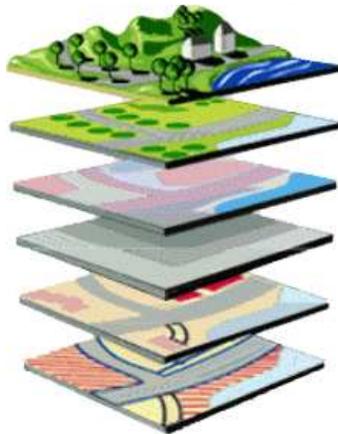


Figura 6.1: El concepto de capas en GIS

6.2.1. Representación de datos en GIS

En GIS se representan objetos del mundo real (calles, tipos de terreno, elevaciones, etc.) por medio de datos digitales. Dichos objetos pueden abstraerse en dos grupos diferentes: aquellos que son continuos (como las elevaciones) y aquellos que son discretos (como un edificio). Así es que en GIS existen dos formas de almacenar datos: *raster* y *vectorial*; una para cada una de dichas abstracciones.

Raster

El modelo GIS de datos tipo raster consiste en la división del espacio en celdas regulares (organizadas en filas y columnas) en donde cada una de ellas almacena un único valor. En muchos casos, los datos de este tipo son imágenes, en donde el valor de cada pixel además de representar el color tiene un determinado significado, como por ejemplo la altura del terreno en un punto geográfico. La información espacial está dada por la posición de la celda en el raster. Además podría asociarse al valor de cada celda un atributo, o hacer que el valor de la celda sea un identificador para referirse a un registro en una tabla.

Se denomina *resolución* de un raster al ancho de una celda en unidades de distancia; lo más usual es que las celdas representen áreas cuadradas. Cuanto mayores sean las dimensiones de las mismas menor es la precisión o detalle en la representación del espacio geográfico.

Vectorial

Los datos del tipo vectorial utilizan geometrías para representar los objetos del mundo real. Dichas geometrías son básicamente tres: puntos, líneas (serie ordenada de puntos) y áreas o polígonos (figuras delimitadas por líneas). La información espacial está dada por las coordenadas de la geometría, es decir, la localización de los diferentes elementos en el espacio. La información no espacial se almacena como atributos de los diferentes objetos; por ejemplo, un polígono que represente un área forestal, y uno de sus atributos sea la descripción de las especies de árboles que lo componen. A la composición de una geometría y sus atributos se le denomina *feature*.

Cada uno de los dos modelos de datos tiene sus ventajas y desventajas, y puede ser más adecuado uno u otro según la realidad que se esté representando y el objetivo que se persiga. Por ejemplo, los datos en formato del tipo raster permiten el almacenamiento de datos continuos. Como desventaja podría mencionarse que requieren mayor espacio de disco para su almacenamiento, ya que guardan un valor por cada uno de los puntos del área a cubrir, a diferencia de los vectoriales que sólo guardan la información necesaria, y son de más rápido despliegue. En la figura 6.2 se muestra dos posibles representaciones de un mismo edificio mediante cada uno de los tipos de datos.

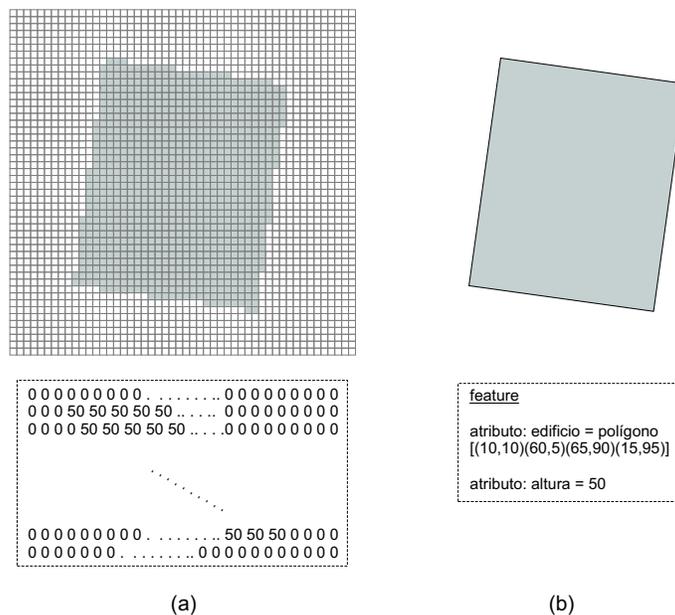


Figura 6.2: Representación de un edificio de altura 50 mediante un modelo de datos del tipo (a) raster (b) vectorial

6.2.2. Java y GIS

Existen diversas bibliotecas para desarrollo en JAVA utilizando GIS. Sin embargo, a la hora de tomar la elección se encontró con que algunas de ellas son específicas para ciertos tipos de formatos (GML4J [28], WKB4J [29]), o están diseñadas para aplicaciones web (GeoServer [30]). Otras tienen un proceso de desarrollo muy lento (DeeGree [31]) o son sumamente recientes (uDig/JUMP2 [32]). Existen herramientas muy buenas pero orientadas al usuario (JUMP/JCS [33]) u otras que ofrecen buenas funcionalidades para la visualización de datos pero son pobres en lo que refiere al análisis de los mismos (OpenMap [34]). A su vez, debieron descartarse todas aquellas herramientas que no sean de distribución gratuita (MapObjects-Java Edition [35]). Es así que se decidió utilizar una biblioteca llamada GeoTools [36], por ser sumamente amplia y adaptarse a las necesidades del proyecto, si bien tiene sus limitaciones como se verá más adelante. Cabe aclarar que otra elección podría haber sido también válida. Para el manejo de geometrías se usó otra biblioteca más específica denominada JTS [37].

GeoTools

GeoTools es una biblioteca de código abierto que constituye una herramienta para el desarrollo en Java de soluciones GIS. Provee una implementación de las especificaciones de la OGC (*Open Geospatial Consortium*, también llamado *OpenGIS Consortium*). La OGC [38] es una organización internacional sin fines de lucro en la cual más de 300 compañías, agencias de gobierno y universidades participan en el desarrollo de especificaciones para servicios basados en información geoespacial y de localización. Las interfaces y protocolos definidos en estas especificaciones promueven la interoperabilidad entre diferentes soluciones, y permiten que información espacial y servicios complejos puedan ser accesibles y útiles para una amplia gama de aplicaciones.

El proceso de desarrollo de GeoTools es abierto, el mismo está en constante crecimiento y se nutre día a día de las contribuciones y colaboraciones públicas. Este dinamismo puede ser una desventaja a la hora de utilizar esta herramienta, ya que hay muchas funcionalidades que aún no están soportadas, mientras que otras se encuentran en estado de desarrollo.

Para el presente proyecto se utilizó la distribución de GeoTools 2.0.0 (creada en enero de 2005), ya que era la última distribución estable a disposición en el momento de tomar la elección. Sin embargo, para algunos puntos en particular que se detallarán más adelante debió usarse bibliotecas pertenecientes a la distribución 2.1.0 (surgida en julio de 2005).

JTS

Para el manejo de datos del tipo vectorial GeoTools utiliza una biblioteca de código abierto llamada *Java Topology Suite*, consistente con la especificación *Simple Features Specification* de la OGC. Esta biblioteca provee un conjunto de operaciones para el procesamiento de datos espaciales mediante una implementación completa y robusta de los algoritmos fundamentales de manejo de geometrías en dos dimensiones. Alberga un conjunto de clases para representar geometrías del tipo punto, línea, polígono y multi-línea, así como una serie de métodos topológicos y de relaciones entre las mismas (unión, intersección, etc.), que pueden combinarse para el desarrollo de aplicaciones.

Capítulo 7

Descripción general de SAPO

En este capítulo se mencionarán las principales funcionalidades y características del software desarrollado, denominado SAPO (*Software de Análisis de Propagación Outdoor*); una herramienta para el cálculo de potencia mediana por sector de señal celular en entornos urbanos y suburbanos de características heterogéneas.

Entre ellas se puede destacar:

- SAPO permite el ingreso de los datos de altura de terreno, edificaciones y manzanas en formatos reconocidos internacionalmente, buscando una caracterización detallada del entorno de propagación. A diferencia de la mayoría de los paquetes de software de predicción, toma en cuenta el trazado de las manzanas para realizar los cálculos de atenuación. A su vez, las edificaciones pueden ser especificadas con un grado de exactitud arbitrario.
- Ante la falta de datos digitales de manzanas o edificaciones, SAPO le brinda la posibilidad al usuario de crearlos mediante una interfaz gráfica.
- El usuario es capaz de crear y editar una red celular de cualquier porte, con un número arbitrario de sitios, radiobases y antenas.
- SAPO implementa diversos modelos de propagación incluyendo algunos modelos tradicionales, otros modernos y un último adicional propuesto por el grupo de proyecto. El usuario tiene la posibilidad de especificar el valor de los parámetros que definen los distintos modelos.
- El modelo de propagación puede variar entre las antenas involucradas en una predicción, permitiendo una mayor exactitud ante un entorno de propagación heterogéneo.
- Los patrones de radiación de una antena pueden ser definidos por el usuario o importados de un archivo obtenido del fabricante.

- Si la predicción involucró más de una antena, SAPO es capaz de verificar si existe interferencia co-canal y determinar el valor de la C/I.
- Se puede identificar el área de cobertura tomando en cuenta no solo la potencia de recepción sino también la C/I. Para ello se verifica que ambos valores superen un umbral configurable por el usuario.
- Al contar con edificaciones el usuario puede determinar aquellas zonas donde existe línea de vista entre la radiobase y el móvil.
- Se brinda la opción de cargar datos de medidas de potencia para una posterior comparación con los resultados de SAPO.
- La interfaz gráfica es amigable, sencilla y proporciona una visualización clara de los datos ingresados y de los resultados obtenidos.

7.1. ¿Qué es un proyecto en SAPO?

El manejo de las herramientas de SAPO se hace en el marco de lo que se denomina un *proyecto*. Un proyecto es una instancia creada por el usuario que funciona como su área de trabajo y contiene toda la información que el mismo desea almacenar. Puede ser guardado a disco en cualquier etapa de su confección, para después abrirlo nuevamente, ya sea para consultarlo como para continuar ingresando y/o modificando información. Para usar las funcionalidades del programa es necesario que haya siempre un proyecto abierto.

7.2. Ingreso de datos del entorno

Previo a la realización del cálculo de la predicción de potencia, es necesario ingresar al software la información topográfica de la zona en cuestión, así como los datos de cómo se conforma la red. Lo primero puede hacerse con diferentes niveles de detalle, de acuerdo a la base de datos que disponga el usuario, aunque se obtendrán mejores resultados cuanto más información del entorno se posea. Sobre todo en un entorno urbano, puede ser muy útil la especificación detallada de las edificaciones, ya que como se vio en las secciones anteriores, las mismas tienen gran influencia en la propagación. Es así que se pueden especificar tres tipos de datos:

- **Datos de Altura de terreno.** Consiste en un mapa de elevaciones, que especifique para toda el área geográfica los valores de altura sobre el nivel del mar. Cuanto mayor sea la resolución de dicho mapa, mayor exactitud podrá obtenerse en los resultados. Esta información es necesaria para la aplicación de todos los modelos, por lo cual es de carácter obligatorio.

- **Datos de trazado de manzanas.** Consiste en la información de la distribución de las manzanas y calles a lo largo del territorio (se considera que el límite entre las manzanas y las calles es el límite de las edificaciones, y no el cordón de la vereda). Estos datos son requeridos por ciertos modelos, por ejemplo, aquellos que incluyan en sus cálculos la orientación de la calle en relación a la dirección de máxima propagación de la antena radiobase, o la distancia del punto en cuestión a las esquinas más cercanas.
- **Datos de edificaciones.** Consiste en la información de ubicación, forma, disposición y altura de las edificaciones presentes. Cierta modelo de propagación puede requerir de dicho nivel de detalle para arrojar resultados confiables. Sin embargo, en otros casos, a falta de información precisa, puede ingresarse un único edificio por manzana que abarque toda el área de la misma y tenga como altura la altura promedio de todas las edificaciones u otro valor que pueda ser representativo.



Figura 7.1: Pantalla principal de SAPO

Esta información es importada al programa desde archivos (los formatos soportados se describirán en el capítulo 9), y en el caso de los datos de edificaciones existe también la posibilidad de ingresarlos mediante una interfaz gráfica incluida en SAPO. Una vez cargada, la información es almacenada en diferentes niveles o capas y desplegada en un mapa digital (ver figura 7.1). En todo momento el usuario tiene la posibilidad de

ver u ocultar cualquiera de las capas que se despliegan en pantalla. Además aparece una barra indicativa de la escala, así como la posición y altura del punto sobre el cual está posicionado el ratón en cada instante.

SAPO trabaja con coordenadas planas (proyectadas), como por ejemplo coordenadas UTM¹, aunque no tienen por qué ser necesariamente globales. Como unidad de distancia se utiliza el metro.

7.3. Creación de una red celular

El segundo requerimiento para poder realizar un cálculo de atenuación es disponer de la topología y características de la red celular. Las antenas trasmisoras dentro de una red pueden poseer similares características, por ejemplo, muchas de ellas pueden tener el mismo patrón de radiación. Lo mismo sucede con los canales de frecuencia, se repetirán a lo largo de la red gracias al reuso de frecuencias. No sería práctico tener que ingresar reiteradas veces la misma información al sistema, sobre todo pensando en que SAPO pretende poder ser usado para redes de cualquier porte. Es por esto que el software está diseñado de forma que el usuario ingrese cierta información y la tenga luego disponible para su uso dentro del proyecto. Esta información incluye:

- **Tipos de antena.** Pueden ingresarse antenas isotrópicas o direccionales. En este último caso, se especifica la ganancia en la dirección de máxima propagación y los datos del patrón de radiación, tanto el horizontal como el vertical (tabla de ángulo y su respectiva ganancia, relativa a la ganancia máxima). Estos datos pueden ser también importados desde un archivo de texto (ver sección 9.4). Para el cálculo de la ganancia en ángulos que no están especificados en el patrón se utiliza interpolación lineal.
- **Canales de frecuencia.** Se especifica el grupo de frecuencias asignado para los canales de comunicación. Si bien para los cálculos de atenuación se usará la frecuencia mayor (criterio conservador), es necesario conocer todas las portadoras a fin de hacer un análisis de posible interferencia co-canal con otras radiobases (válido para sistemas FDMA).
- **Modelos de propagación.** El usuario es capaz de crear un modelo de pérdida de camino basado en una lista de modelos preestablecidos, a los cuales les puede asignar los valores de los parámetros que los definen. Esto permite crear diferentes implementaciones de un mismo modelo, ajustando sus parámetros a las necesidades del proyecto, aunque siempre está disponible la opción de dejar los valores por defecto. Los modelos con los que cuenta SAPO son:
 - Pérdidas de vacío (ver sección 3.1)
 - Propagación en tierra plana (ver sección 3.2.2)

¹ *Universal Transverse Mercator*, sistema de coordenadas planas estandarizado internacionalmente.

- Propagación en tierra plana aproximada (ver sección 3.2.2)
- Modelo Okumura-Hata COST231 (ver sección 5.1.3)
- Modelo de Erceg-SUI (ver sección 5.2)
- Modelo COST231 Walfisch-Ikegami (ver sección 5.3.2)
- Modelo MOPEM (ver sección 5.3.3)
- Modelo propuesto: Vogler-Ikegami (ver sección 5.4)

Los distintos modelos cubren la mayoría de los escenarios de propagación. Los tres primeros sirven principalmente para chequeos básicos porque son modelos muy elementales. Luego, para casos de entornos preferentemente suburbanos en donde no se posea la información de las edificaciones están disponibles los modelos de Okumura-Hata y de Erceg. Los restantes modelos pueden aplicarse a regiones urbanas, si se dispone de la base de datos detallada del entorno. El usuario debe tener en cuenta las hipótesis que cualquiera de dichos modelos asumen y el rango de validez de los parámetros, a fin de elegir el que más se adecúe a su caso particular de estudio. Por ejemplo, el modelo COST231 Walfisch-Ikegami debería aplicarse en un entorno urbano con pocas variaciones de altura de terreno, altura de edificaciones homogénea y radiobase por encima del nivel medio de edificaciones.

SAPO permite crear una red celular de cualquier porte, es decir, compuesta por un número arbitrario de sitios. El concepto de *sitio* es el de un punto del mapa (identificado por sus coordenadas) capaz de alojar una o más radiobases. Es necesario contar con los datos de altura de terreno para poder ingresar un sitio. El concepto de *radiobase* en este contexto vendría a ser esencialmente el de una torre, que se caracteriza por tener una determinada altura y contener un sistema radiante. Cada radiobase puede albergar una cantidad cualquiera de antenas (sectores).

Para ingresar una antena al proyecto es imprescindible disponer de al menos un tipo de antena, un canal de frecuencias y un modelo de propagación, para poder ser asociados a la nueva antena. Además se deben especificar otros parámetros como es la potencia de transmisión y los ángulos de tilt y azimut. Vale la pena detenerse en el hecho de que cada antena de la red tenga asociado un modelo de propagación. Esto implica que se podrán realizar predicciones con varios modelos a la misma vez, lo que le da a SAPO una gran flexibilidad, a diferencia de la mayoría de los paquetes de software existentes que establecen un único modelo de predicción para toda la red. Esto es muy útil por ejemplo, en casos donde las características del entorno sean heterogéneas a lo largo del territorio.

A medida que el usuario va añadiendo elementos al proyecto, un listado de los mismos aparece en un panel ubicado en la parte izquierda de la pantalla, denominado *explorador* (ver figura 7.1). Consiste básicamente en un grupo de nodos dispuestos en forma de árbol que permiten al usuario tener una visión general de la información ingresada y navegar a través de ella. Puede contener hasta tres pestañas, en la primera de ellas figura la estructura de sitios, radiobases y antenas que forman la red celular; en la segunda aparecen los tipos de antenas y los canales de frecuencia; y en la tercer



Figura 7.2: Ubicación de una antena en el contexto de una red y parámetros que la definen

pestaña se listan los modelos de propagación que han sido creados para el proyecto. Cada uno de los elementos anteriormente mencionados se representa en el explorador mediante un nodo con el nombre que asignó el usuario al momento de crearlo; el nombre actúa como identificador único, por lo cual no debe repetirse dentro del proyecto (la interfaz no lo permite). Si el usuario posiciona el ratón en cualquier nodo y hace un *click* con el botón derecho del mismo, se le abre una gama de posibilidades como por ejemplo la de editar la información relativa al elemento asociado con dicho nodo o borrarlo. Por otro lado, en el mapa figura la disposición de los sitios a lo largo del terreno.

7.4. Estimación de potencia mediana de señal

Una vez armada la red celular, se está en condiciones de hacer cálculos de potencia mediana de señal. Para ello el usuario debe elegir entre todas las antenas de la red, cuáles desea involucrar en el cálculo; SAPO no tiene limitaciones en cuanto a la cantidad de antenas, aunque es necesario tener en cuenta que cuanto mayor sea el número de antenas involucradas más tiempo de cálculo se requerirá. Otros factores que inciden en el tiempo de cálculo son la precisión y el radio máximo (en torno al sitio de la antena en cuestión), parámetros configurables por el usuario al momento de correr la predicción. Cuanto menor sea la precisión más resolución tendrán los resultados (se arrojará un mayor número de valores de potencia) pero más tiempo requerirá su obtención. Vale la pena aclarar que pierde sentido utilizar un radio excesivamente grande, ya que si los valores de potencia se vuelven muy pequeños pierde interés conocerlos. La evolución de los cálculos en el tiempo es informada al usuario mediante una barra de progreso; una vez finalizados, se despliegan los datos resultantes en el mapa. En las regiones donde se intersecta el área de cálculo de diferentes antenas, se desplegará el valor de potencia mayor, pues el móvil por lo general establecerá comunicación con la antena de la que reciba una mejor señal. El valor de la potencia en un punto aparece en pantalla cuando

el usuario posiciona el ratón en el mismo. Las predicciones podrán ser guardadas a disco (el formato de los archivos será explicado en 9.5), quedando disponibles para ser visualizadas posteriormente. Cuando los resultados de una predicción están cargados, el usuario tiene la posibilidad de desplegar el resumen de las antenas que participaron en la misma.

7.5. Otras herramientas

7.5.1. El Generador de Edificios

El Generador de Edificios es un módulo que permite al usuario generar y/o editar la información de los edificios que forman parte del mapa por medio de una interfaz gráfica. En base al trazado de las manzanas, el usuario puede agregar formas sobre ellas con una determinada altura; a su vez puede intersectarlas y borrarlas, pudiendo así crear una distribución cualquiera de edificaciones. Éstas son luego guardadas a disco, para su posterior uso dentro del proyecto y eventualmente en otros proyectos. Si el usuario no contara previamente con el trazado de las manzanas en el mapa, la herramienta le permite su incorporación y escritura a disco, previa importación de los datos de las coordenadas de las esquinas (ver sección 9.3).

7.5.2. Cálculo de interferencia co-canal

Una vez obtenidas las estimaciones de potencia, SAPO permite hacer otro tipo de cálculos que pueden resultar de interés al usuario. Si en la predicción se involucró más de una antena, es posible calcular la interferencia co-canal entre ellas. Habrá interferencia en un punto cuando reciba señal proveniente de más de una antena, siempre y cuando dichas antenas compartan la misma frecuencia. La que provee la potencia mayor es la que establece comunicación con el móvil (señal útil); la suma de las potencias restantes constituye la señal interferente. Mediante esta herramienta, el usuario puede desplegar en el mapa los valores de C/I , es decir, el cociente entre la señal útil y la interferencia en los puntos donde esta última exista.

7.5.3. Identificación de área de servicio

Otra de las herramientas disponibles luego de una predicción es la identificación del área de servicio, unión del área de cobertura de todas las radiobases involucradas, que puede visualizarse como una región coloreada en el mapa. Para esto se toma en cuenta que la potencia de recepción esté por encima de la sensibilidad del receptor y que a su vez la C/I supere un valor mínimo aceptable. Estos umbrales, así como la altura del móvil son configurables por el usuario en lo que se denomina el *perfil de usuario* del proyecto.

7.5.4. Identificación de región de línea de vista

Si el usuario dispone de datos de edificaciones puede ser de interés identificar los puntos en el mapa donde hay línea de vista con las antenas radiobases. SAPO permite realizar dicho cálculo involucrando un número cualquiera de antenas, desplegando a su vez los resultados en el mapa. Para ello utiliza el criterio de no obstrucción de la primera zona de Fresnel (ver sección 4.2) mediante un algoritmo que se explicará en futuras secciones.

7.5.5. Análisis del error de predicción

Es importante al realizar una predicción poder compararla con medidas reales que se hayan tomado. SAPO incluye un módulo que permite cargar medidas de potencia (por el formato, ver sección 9.6), realizar la predicción en los puntos correspondientes y compararlas.

El funcionamiento es el siguiente. Primeramente deben cargarse los datos con las coordenadas y la correspondiente medida de potencia. La antena con la que se realizaron las medidas debe estar definida en el proyecto en el que se esté trabajando. Una vez seleccionada dicha antena, se calculan las predicciones en los puntos correspondientes. Una vez finalizada la predicción se muestran la desviación estándar y la media de la diferencia entre el valor predicho y la medida en todos los puntos. También existe la posibilidad de ver una representación gráfica de la comparación. Los datos de las predicciones pueden guardarse a disco (en el mismo formato que las medidas), por lo que pueden volver a consultarse sin necesidad de realizar los cálculos.

Capítulo 8

Arquitectura de software

Un paso esencial de un análisis orientado a objetos es la descomposición del problema en conceptos individuales, pues es la base para el diseño de las clases de software. Una representación de los conceptos más importantes que describen el dominio del problema puede verse en el diagrama UML¹ de la figura 8.1.

8.1. Arquitectura de paquetes

A la hora de desarrollar la herramienta de software, se buscó que la misma cumpliera una serie de condiciones. En lo que se refiere a la arquitectura, se buscó que fuese flexible y con un diseño que facilite la incorporación de nuevas funcionalidades. Teniendo en mente los anteriores conceptos es que se creó una arquitectura modular basada en la división de paquetes (*packages*), que agrupan las clases desde el punto de vista conceptual y funcional. De esta forma también se puede manejar la visibilidad entre las diferentes clases, de acuerdo a si interactúan o no entre sí.

Nueve diferentes paquetes conforman la arquitectura de software. El paquete *principal* es el que controla el flujo de ejecución del programa, *proyecto* el que engloba lo relativo al marco de trabajo del usuario. Para la representación de los componentes de la red celular se creó el paquete *red*. Luego están los paquetes *raster* y *vectorial*, que incluyen las clases necesarias para el manejo interno de la datos GIS, y el paquete *capas*, que implementa la agrupación de dicha información dentro de un mapa a fin de poder ser desplegada en pantalla. El paquete llamado *predicciones* se encarga de hacer todos los cálculos de atenuación, e incluye la implementación de los diferentes modelos de propagación. Finalmente se encuentran el paquete *ifusuario*, que provee una interfaz gráfica mediante la cual el usuario puede interactuar con el programa, y el paquete *archivos*, que se encarga de lo relativo a la lectura y escritura de información a disco.

¹ *Unified Modeling Language*, notación con que se construyen sistemas por medio de conceptos orientados a objetos.

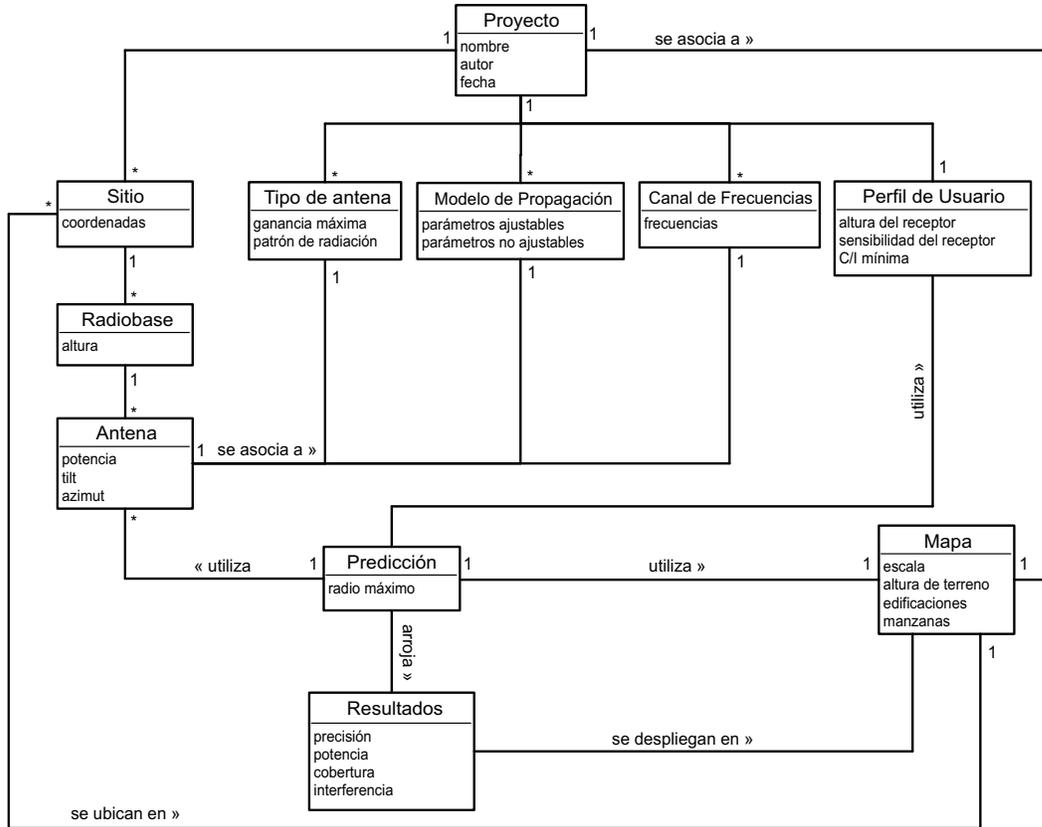


Figura 8.1: Modelo conceptual

8.1.1. El paquete principal

Es el que controla el flujo de ejecución del programa. La clase homónima (*Principal*) (ver diagrama de la figura 8.2) se encarga de comandar todas las acciones que se ejecutan, interactuando con las diferentes entidades que lo componen. Principalmente media entre la interfaz de usuario (el explorador, el mapa, las diferentes ventanas y menús, etc.) y el proyecto, haciendo posible que las acciones tomadas por el usuario se reflejen en la interfaz y la información se procese en el proyecto. Como es la única instancia que conoce todos los agentes debe encargarse de mantener la coherencia entre ellos. Por ejemplo, si se borra un sitio desde el explorador, la clase *Principal* es notificada de dicha acción y propaga la información al proyecto y al mapa, de forma que ellos también lo puedan eliminar.

8.1.2. El paquete proyecto

La representación de un proyecto se hizo mediante la clase *Proyecto* (ver figura 8.3).

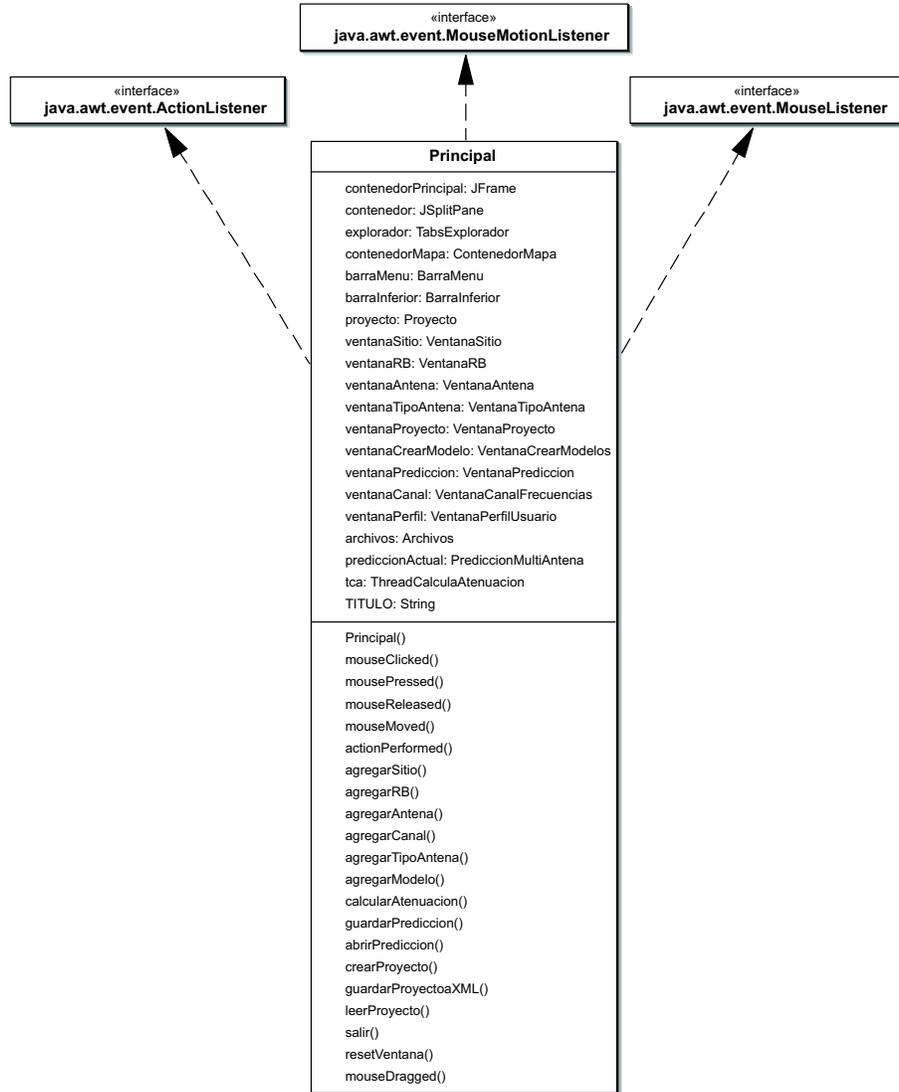


Figura 8.2: Diagrama parcial de la clase Principal

Básicamente un proyecto contiene:

- Datos generales (nombre, fecha, autor y observaciones).
- Un perfil de usuario, que contiene los valores de C/I mínima aceptable, el umbral de cobertura y la altura del receptor.
- El conjunto de modelos de propagación, es decir, implementaciones basadas en la lista de modelos soportados.
- El conjunto de tipos de antenas, en general asociados con un patrón de radiación.

- El conjunto de canales de frecuencias.
- La dirección URL (*Universal Resource Locator*) del archivo que contiene los datos de altura de terreno.
- El URL del archivo que contiene los datos de manzanas.
- El URL del archivo que contiene los datos de edificaciones.
- El conjunto de los sitios. Estos a su vez incluyen las radiobases que contienen las antenas.
- El URL de las carpetas que contienen las predicciones guardadas.

8.1.3. El paquete capas

Como se vio en la sección 6.2, las aplicaciones GIS manejan el concepto de capas (*layers*). En el caso de SAPO, se definen diferentes capas que se superponen para formar el denominado *Mapa*, una entidad de suma importancia pues engloba los datos de la topología del terreno junto con la información de la ubicación de los sitios, haciendo posible el despliegue en pantalla de toda esa información bajo un único sistema de coordenadas.

Para implementar dichas capas se crearon las clases *CapaRaster* y *CapaVectorial*, con algunos métodos útiles para el manejo de cada uno de los tipos de datos GIS explicados en la sección 6.2.1 (ver diagrama 8.4). Cada capa está constituida por una *org.geotools.feature.FeatureCollection*, es decir, un conjunto de features, y debe tener un estilo asociado a fin de poder ser desplegada en pantalla.

El estilo (*org.geotools.styling.Style*) define las reglas que deben seguirse en la representación de los componentes de la capa. Por ejemplo si los mismos son polígonos, establece el color del área interior así como el color y el grosor de las líneas que componen el borde. Los estilos de cada una de las diferentes capas están definidos en un sub-paquete llamado *capas.estilos*. Se creó la interfaz *ElementoCapa* que deberán implementar todos aquellos objetos que pretendan ser añadidos a una capa. Dicha interfaz contiene el método *getFeature*, que debe devolver un feature, capaz de ser agregado a la *FeatureCollection* que constituye la capa. Las clases que implementan dicha interfaz son: Grilla, Manzana, Edificio y Sitio.

8.1.4. El paquete raster

Es necesario determinar cuál de las dos formas de representar la información GIS es la más apropiada para los diferentes datos que se manejan en el programa. Dado que los datos de altura de terreno deben abarcar toda la región de estudio, es razonable representarlos mediante un formato de datos tipo raster. En ese caso,

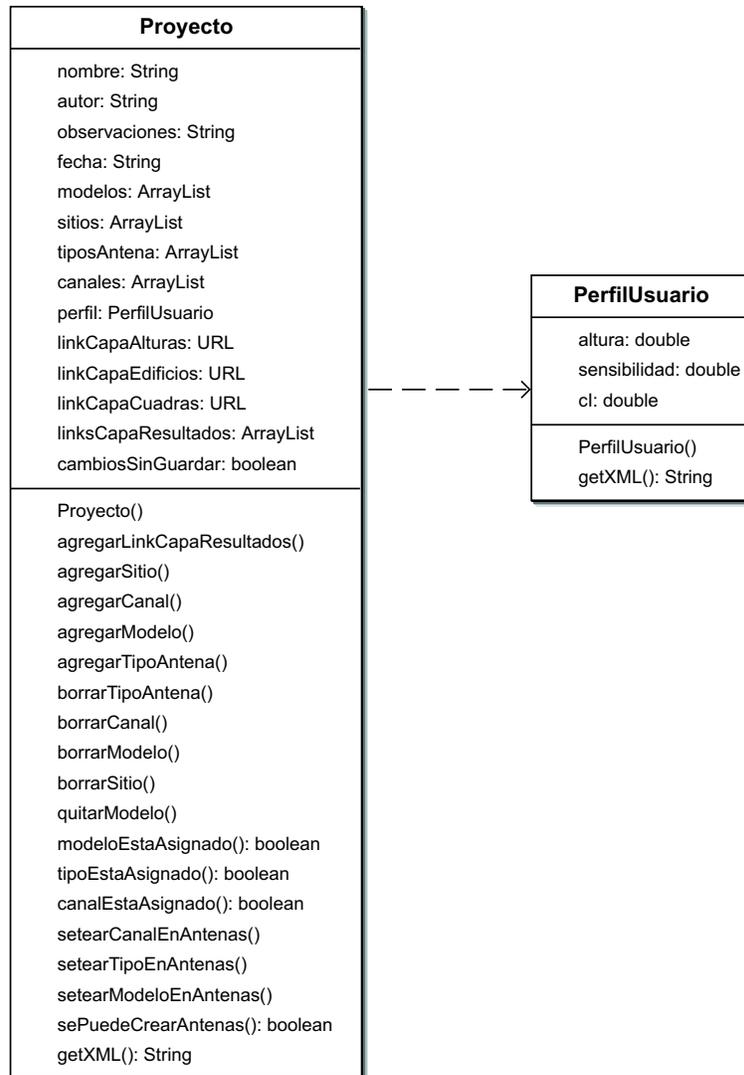


Figura 8.3: Diagrama parcial de clases del paquete proyecto

el valor correspondiente a cada celda almacenará el promedio de alturas de terreno del área geográfica representada por dicha celda. Lo mismo sucede en el caso de las predicciones, salvo que allí el valor de las celdas será la potencia mediana calculada para el sector representado por la celda.

GeoTools dispone de una herramienta para el manejo de datos del tipo raster, que se denomina *org.geotools.gc.GridCoverage*. Un GridCoverage permite almacenar una grilla de datos (usualmente en dos dimensiones), y referenciarlos mediante coordenadas. Está delimitado por un rectángulo (llamado *envelope*), y es capaz de devolver un valor en cada uno de los puntos dentro de dicho rectángulo. Por ejemplo, si el envelope es de 10 m × 10 m y la matriz de datos es de 10 × 10, el área total se dividirá en 100 cuadrados

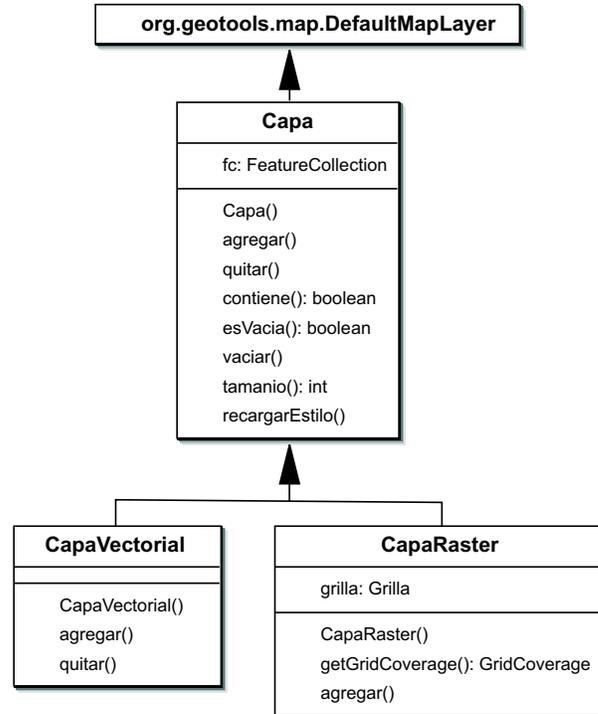


Figura 8.4: Diagrama parcial de clases del paquete capas

de 1 m², y dentro de cada uno de estos cuadrados los puntos del GridCoverage tendrán el mismo valor.

Para la representación de los datos tipo raster se creó la clase *Grilla*, creada para solventar algunas dificultades de acceso a los datos que implicaba el trabajar directamente con el GridCoverage. La misma contiene, entre otros atributos, uno de la clase *java.awt.image.WritableRaster* con los datos y el GridCoverage correspondiente; además provee una serie de métodos útiles e implementa la interfaz *ElementoCapa*, que le permite ser integrado al mapa. No es trivial la creación de un *feature* a partir de datos del tipo raster, ya que es un concepto asociado directamente con una geometría. La solución para poder hacerlo consiste en crear un polígono (más específicamente un rectángulo), que representa el contorno de la grilla, y agregarle un atributo de tipo GridCoverage para así formar el feature necesario para constituir la capa.

8.1.5. El paquete vectorial

El caso de los datos de manzanas y edificaciones es un poco diferente, y en general no suelen almacenarse como raster. En este caso es más conveniente usar algún formato del tipo vectorial, representándolos por medio de geometrías y asociar mediante atributos la información que sea de interés almacenar. Para esto se utilizó la biblioteca JTS (ver

sección 6.2.2).

Para el manejo de datos de edificaciones, se eligió representar las mismas mediante un feature en el cual la geometría es un polígono que corresponde con la proyección del edificio en el plano horizontal, y como atributo un valor numérico que representa la altura. Se está asumiendo que la edificación será un prisma, en el cual tanto la base como el techo son paralelos al plano horizontal y tienen la misma proyección, pudiendo ésta adquirir cualquier forma, no teniendo que ser necesariamente convexa. Esta representación excluye algún tipo de formas irregulares, pero simplifica enormemente el problema, siendo que no es de importancia la forma exacta de las edificaciones. En caso de contar, por ejemplo, con una vivienda de techo a dos aguas, el usuario deberá tomar algún criterio y determinar una altura equivalente.

Para la representación de las manzanas se utilizó una representación mediante polígonos. Estos pueden tener cualquier forma, siendo la única limitación que las aristas (cuadras) sean líneas rectas. El número de vértices es arbitrario. En la figura 8.5 se puede visualizar un ejemplo de un trazado de manzana válido.

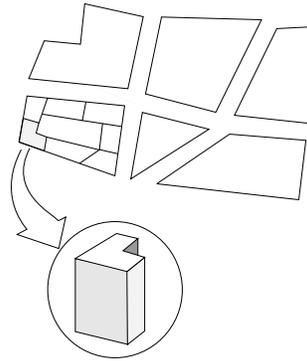


Figura 8.5: Ejemplo de trazado de manzanas y edificaciones aceptado por SAPO

8.1.6. El paquete red

Para la representación de la red celular se dividió el problema en tres niveles de abstracción: el sitio, la radiobase y la antena, de forma de lograr la mayor flexibilidad posible.

Como se explicó en 7.3 cada antena está asociada con un tipo de antena, un modelo de propagación y un canal de frecuencias. En la arquitectura de clases esto se refleja en que la clase *Antena* tiene referencias a instancias de las clases que representan dichos elementos (*TipoAntena*, *Modelo* y *CanalFrecuencias*). En la figura 8.7 puede verse un diagrama con las clases de este paquete, en donde aparecen los atributos y métodos más importantes.

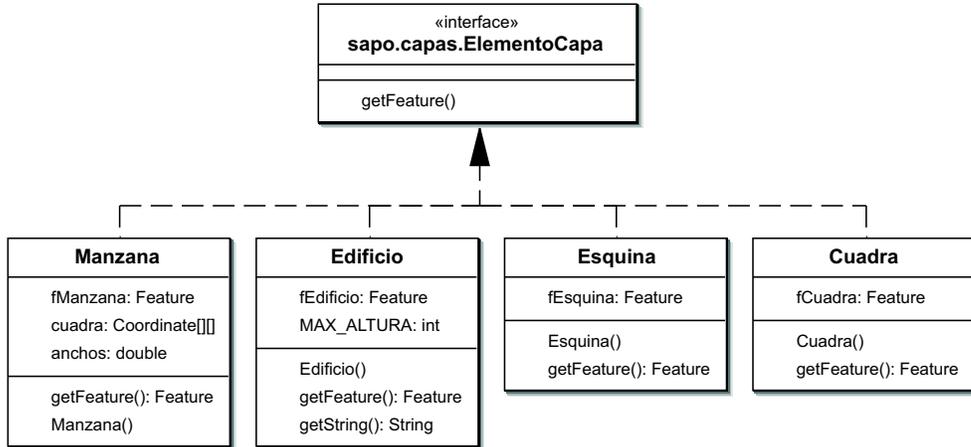


Figura 8.6: Diagrama parcial de clases del paquete vectorial

8.1.7. El paquete predicciones

Dentro de este paquete se encuentra todo lo relativo al cálculo y análisis de predicciones. Para la implementación de los modelos de predicción se buscó un diseño que facilite al desarrollador el agregado de nuevos modelos al programa. Es así que se creó la clase abstracta *Modelo*, de la cual heredan todas las implementaciones particulares (ver figura 8.8). Dicha clase determina todos los atributos y métodos que debe implementar un modelo de propagación para poder integrarse con el resto de la arquitectura. Cada modelo se define mediante dos tipos de parámetros, los parámetros *ajustables* y los *no ajustables*. Los primeros, son aquéllos que el desarrollador considera pueden ser ajustados mediante regresión lineal en el caso de contar con medidas de campo. Básicamente son los que aparecen con una dependencia lineal en la ecuación de pérdida de camino (en dB), y se representan como un arreglo de *doubles*. Luego, el resto de los parámetros son los no ajustables, como por ejemplo el tipo de entorno (urbano, suburbano, etc.), y se representan como un arreglo de *Objects* a fin de dar libertad de usar cualquier tipo de objeto. Se diseñó de esta manera, distinguiendo entre dos tipos de parámetros para facilitar una futura implementación de ajuste de modelos en base a medidas.

Todos los modelos deben disponer de los valores de los parámetros por defecto; luego cada implementación en particular podrá utilizar dichos valores u otros que especifique (siempre y cuando tengan el formato adecuado). Es por esto que existen dos constructores para la clase *Modelo*, uno para cada uno de estos casos. Además deben implementar la creación de la ventana que sirva como interfaz para especificar los parámetros del mismo; dicha ventana debe heredar de la clase abstracta *PanelModelos*, en donde se especifican los métodos que debe implementar.

El método encargado de realizar los cálculos de atenuación de señal es el método *predecir* de la clase *Modelo*. Previo a realizar ningún cálculo invoca al método *verificarDatos*, que se encarga de chequear que el mapa contenga las capas que necesita el

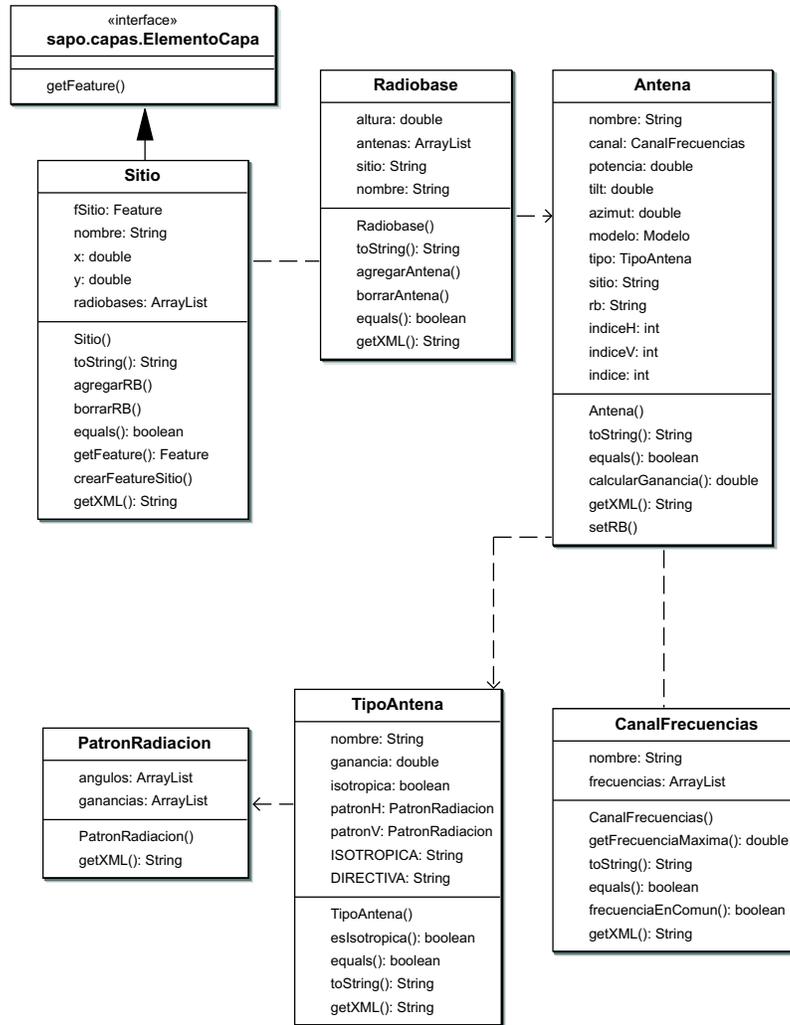


Figura 8.7: Diagrama parcial de clases del paquete red

modelo, y en ese caso obtiene el *areaCalculable* (región en el mapa sobre la cual pueden efectuarse los cálculos; depende del mapa y de la ubicación de la radiobase). Para el manejo de herramientas comunes a todos los modelos se creó la clase *UtilidadesModelos*, que implementa entre otras cosas el cálculo de distancia y de alturas efectivas. Si está habilitada la opción de *usarInterpolación* los valores de altura de terreno se obtienen mediante interpolación bilineal en el *GridCoverage*. *UtilidadesModelos* debe tener en cuenta que existen dos niveles diferentes en los cuales se puede referenciar un punto: mediante su posición (i, j) dentro de la grilla de datos o mediante sus coordenadas “reales” (x, y) en el mapa; el pasaje de un sistema de referencia a otro lo hace mediante una transformación matemática (*org.geotools.ct.MathTransform2D*).

El método *predecir* necesita de los siguientes datos de entrada:

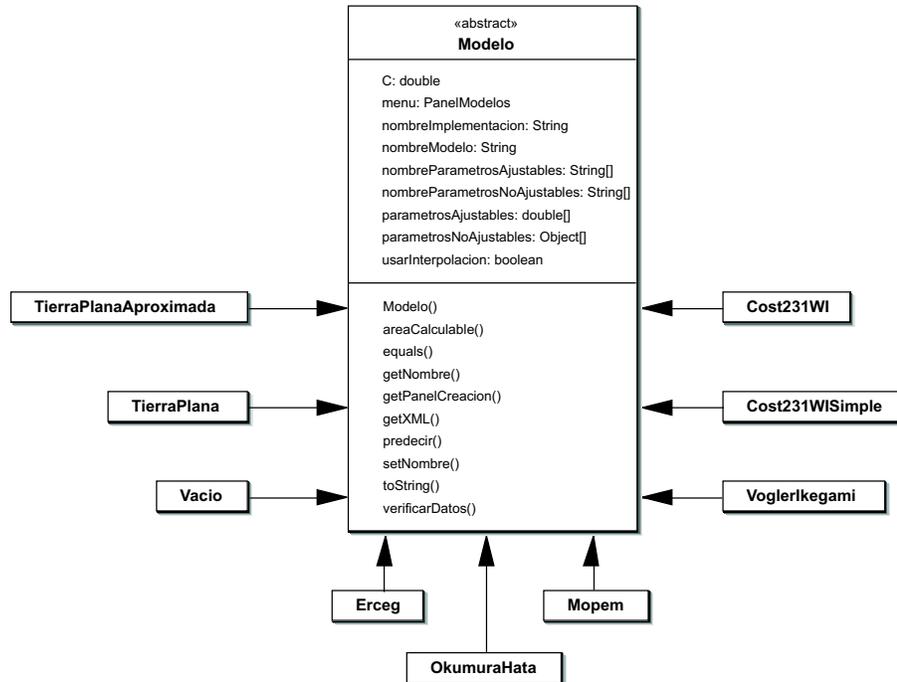


Figura 8.8: Diagrama parcial de la clase Modelo

- El mapa, que contiene las diferentes capas con los datos del entorno
- La antena transmisora, de la cual se obtienen los datos de potencia de transmisión, ganancia y frecuencia.
- El proyecto, a fin de obtener el perfil de usuario, el sitio y la radiobase asociados a la antena transmisora
- El radio máximo en torno a la antena
- La precisión con la que se realizarán los cálculos

Devuelve los resultados mediante un objeto del tipo *PrediccionUniAntena* (ver figura 8.9), que contiene básicamente una Grilla con los valores de potencia y los datos de la antena con que fue realizada. Quien llama a este método es la clase *ThreadCalculaAtenuacion*, creada para que el cálculo de predicción pueda correr en paralelo con el *thread* que mantiene la interfaz gráfica. Esta clase va almacenando los resultados obtenidos con cada una de las antenas para formar una *PrediccionMultiAntena* (ver figura 8.9).

La clase *PrediccionMultiAntena* es la encargada de formar las grillas de potencia a desplegar en pantalla, eligiendo el valor de potencia máximo en los puntos donde tenga información de más de una antena, así como también de crear las grillas de cobertura y de interferencia co-canal.

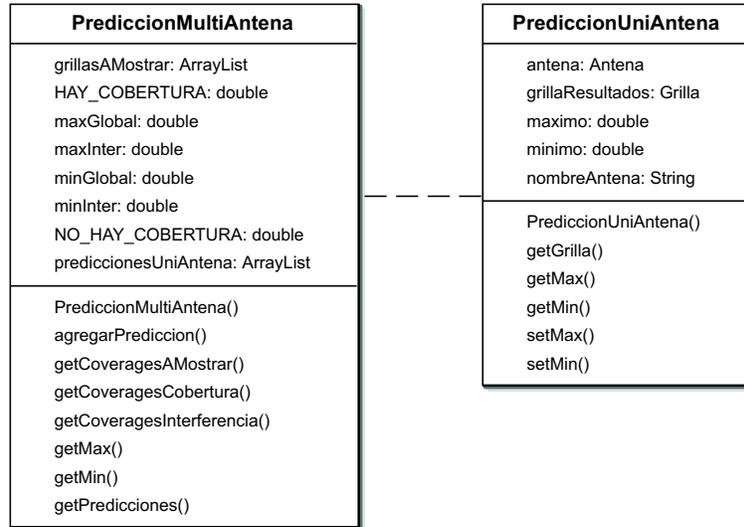


Figura 8.9: Diagrama parcial de clases del paquete predicciones

Las clases *UtilidadesModelosManzanas* y *UtilidadesModelosEdificios* heredan de *UtilidadesModelos* y centralizan los métodos particulares requeridos en la implementación de algunos de los modelos de propagación disponibles en la herramienta (ver figura 8.10). *UtilidadesModelosManzanas* contiene los cálculos asociados a la capa de manzanas, como ser la orientación de las calles, el ancho de las mismas y las distancias a las esquinas. Por su parte, *UtilidadesModelosEdificios* contiene los métodos que necesitarán aquellos modelos que hagan uso de la capa de edificios y dentro de los más importantes se hallan: altura promedio de edificios circundantes al móvil, determinación de obstrucción de la primer elipsiode de Fresnel, y obtención del perfil de alturas entre el móvil y la antena transmisora. Es importante destacar que en caso de querer implementar un nuevo modelo que requiera algún algoritmo particular, bastaría con agregar un método nuevo en las clases anteriormente detalladas.

8.1.8. El paquete ifusuario

Mediante este paquete se provee una interfaz gráfica que interactúa directamente con el usuario del software. Se buscó que la misma sea amigable para el usuario y fácil de usar.

Como se dijo anteriormente, los dos elementos más importantes que conforman la ventana principal del programa son el explorador y el mapa. La implementación del explorador se hizo mediante la estructura de clases que se muestra en la figura 8.11. El mapa está constituido por la siguientes capas:

- Capa de alturas de terreno

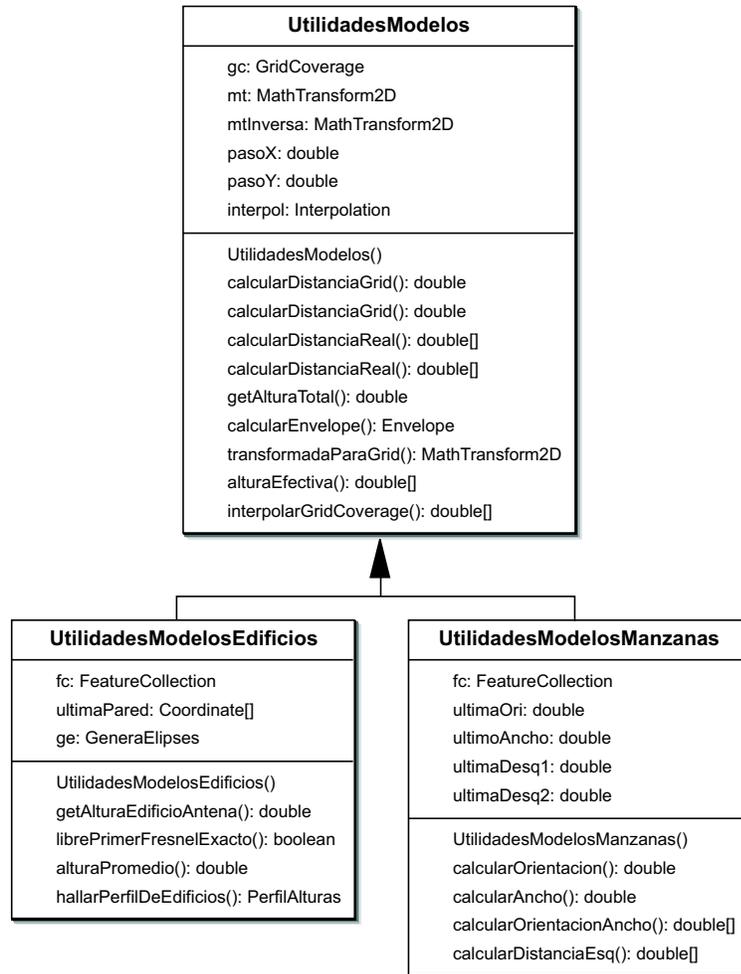


Figura 8.10: Diagrama parcial de clases del paquete predicciones

- Capa de manzanas
- Capa de edificios
- Capa de sitios
- Capa de sitio seleccionado
- Capa de resultados

En el caso del Generador de Edificios se define un nuevo mapa, que carece de la capa de alturas y de sitios e incluye capas destinadas al edificio, la cuadra y la esquina seleccionados.

Existe una clase que es la encargada de la manipulación de las capas, que se llama *ContenedorMapa*. Esta clase interactúa con los otros paquetes, de los que puede recibir

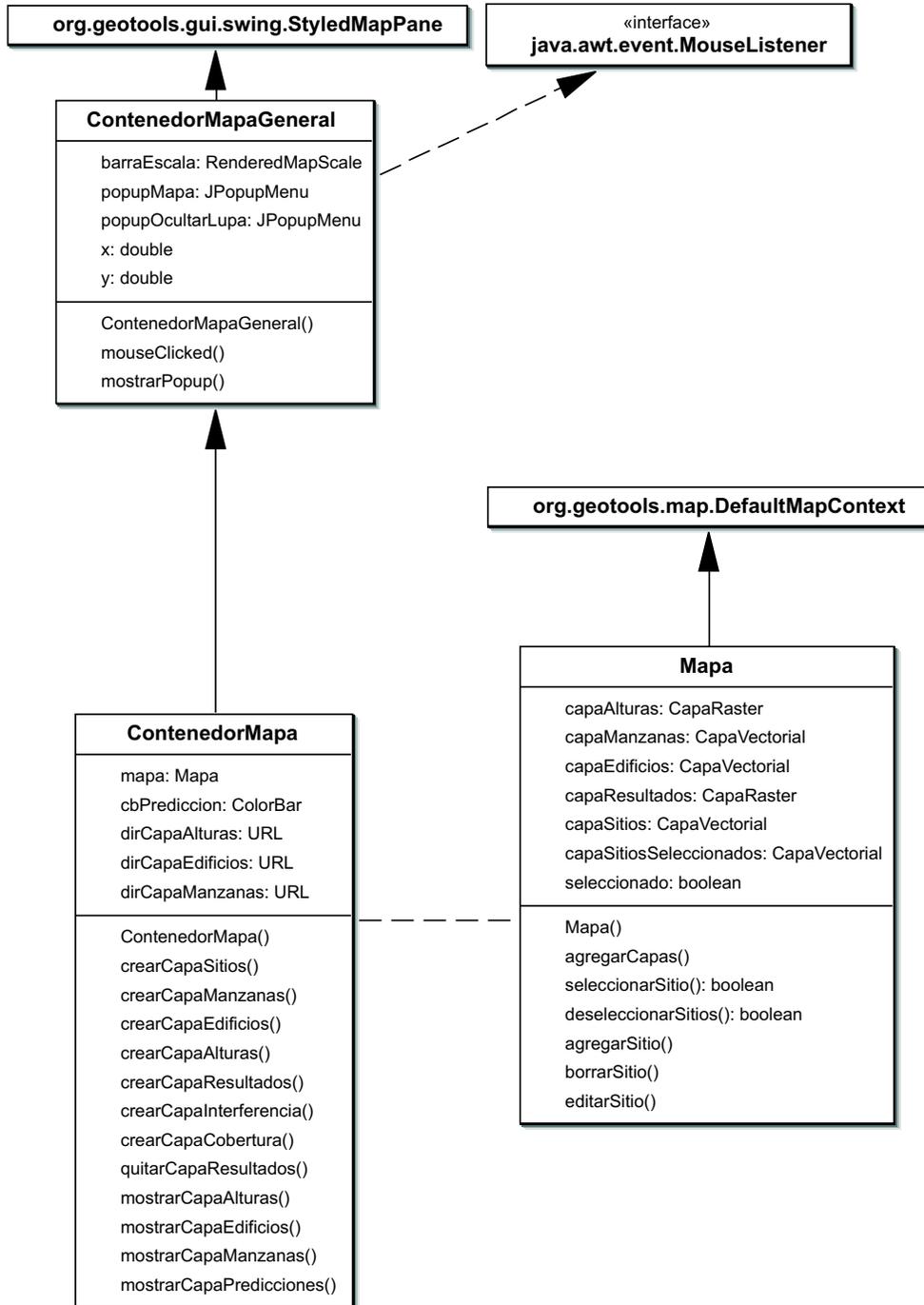


Figura 8.12: Diagrama parcial de clases del paquete ifusuario

En caso de encontrar un error arrojan una excepción e informan al usuario; en otro caso crean el objeto correspondiente, que luego es tomado por la clase Principal, quien

continúa con el procedimiento.

8.1.9. El paquete archivos

El paquete *archivos* se creó con la finalidad de centralizar todo lo relativo a la escritura y lectura de información a disco, de forma que si en un futuro se quisiera ampliar los formatos de archivos soportados alcanzaría básicamente con hacer modificaciones en este paquete. Sirve de interfaz entre los archivos que se leen o escriben y el resto del programa, adaptando la información para que ambos la puedan interpretar. Por ejemplo, la clase *LectorFeatures* permite extraer una *FeatureCollection* o una Grilla de un archivo, que luego se utilizará para crear la capa correspondiente. Otro ejemplo es la clase *ArchivosXML* que se encarga de interpretar el archivo que almacena los datos de un proyecto.

8.2. Comportamiento dinámico

En la figura 8.13 se puede ver los casos de uso más relevantes de SAPO. En los diagramas siguientes se muestra a grandes rasgos la interacción entre los principales paquetes que intervienen en dichos casos de uso. El caso de estimación de una predicción, por ser de especial importancia es representado más en detalle, mediante un diagrama parcial de colaboración de clases (figura 8.18).

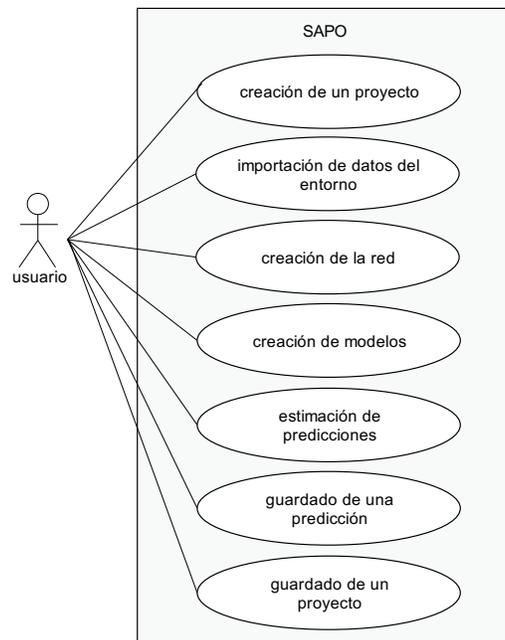


Figura 8.13: Diagrama parcial de casos de uso

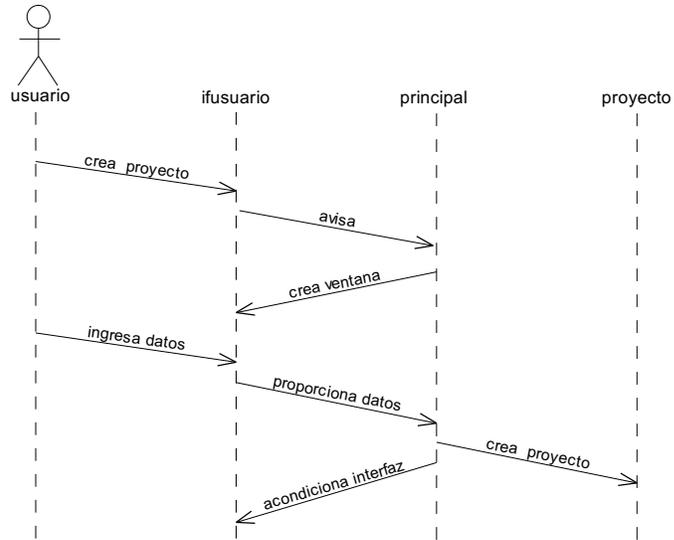


Figura 8.14: Creación de un proyecto

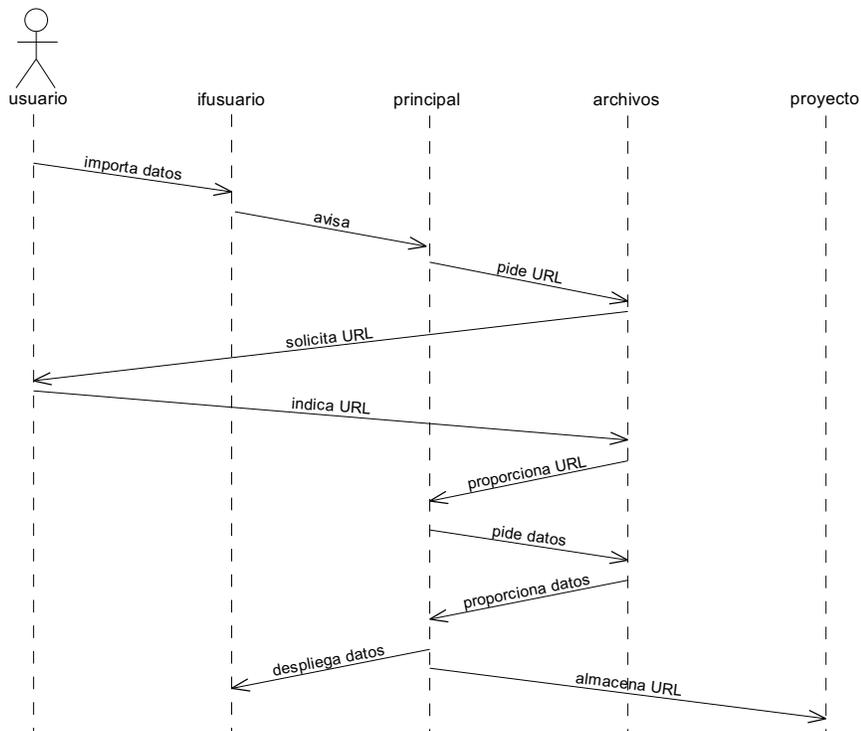


Figura 8.15: Importación de datos de entorno

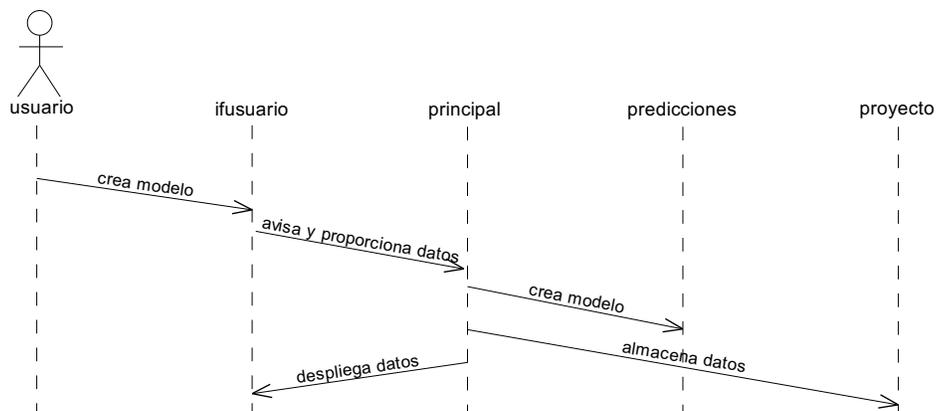


Figura 8.16: Creación de un modelo de propagación

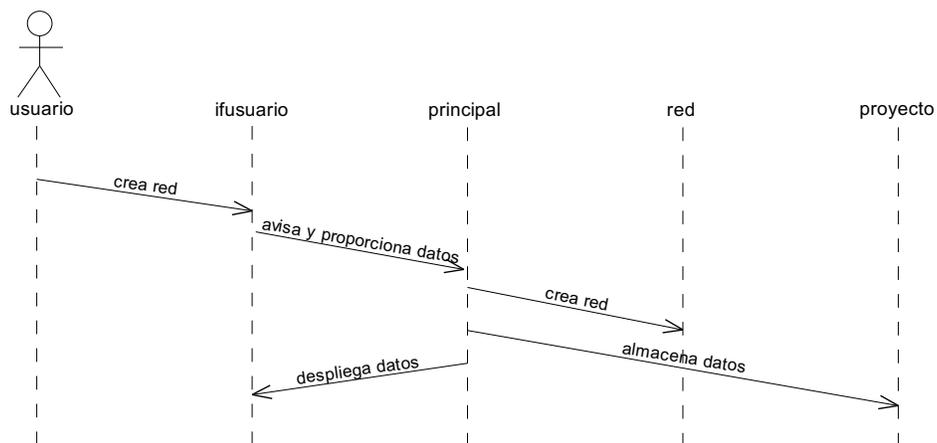


Figura 8.17: Creación de la red

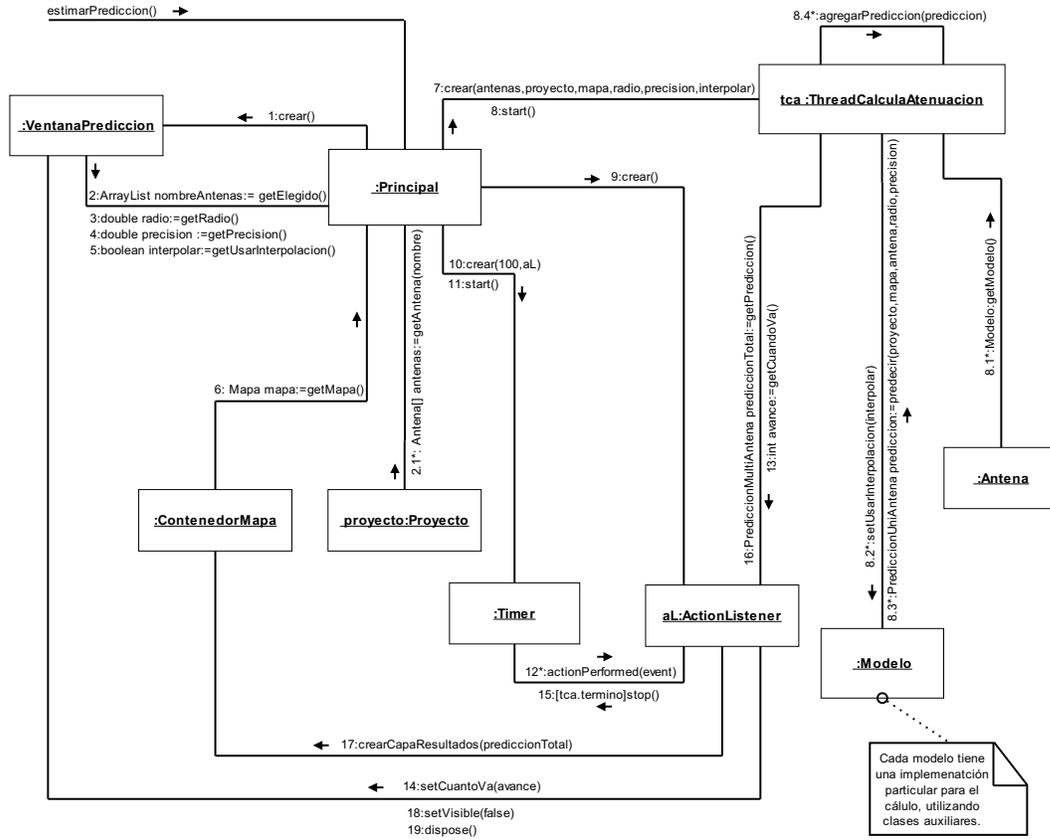


Figura 8.18: Diagrama de colaboración de una predicción

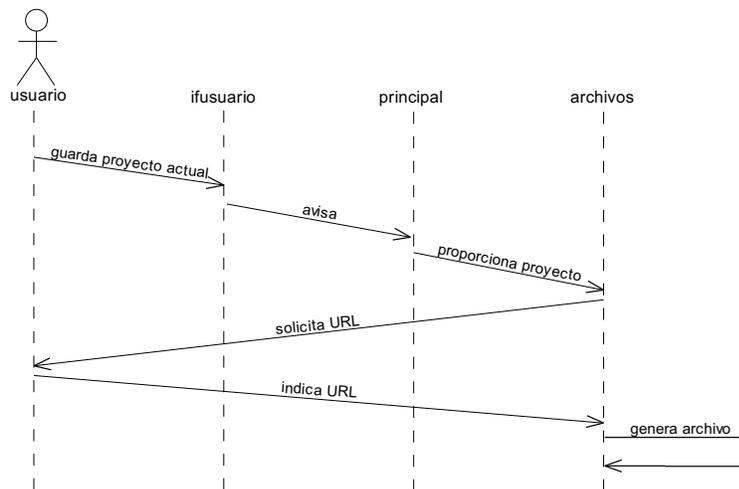


Figura 8.19: Guardado de un proyecto

8.3. Manejo de errores

SAPO, como toda aplicación que interactúa con agentes externos, se encuentra propenso a que se generen errores de distinta índole en tiempos de ejecución. La interacción con el usuario puede provocar situaciones que impidan el correcto funcionamiento del software, y estas situaciones deben ser contempladas a los efectos de impedir la realización de cálculos sobre bases erróneas.

Para esto se utilizó el manejo de excepciones que proporciona Java. Esta técnica, también presente en otros lenguajes, permite controlar el flujo de ejecución del programa ante situaciones anormales y almacenar información de las mismas que pueda ser de ayuda para su solución, otorgándole robustez a los programas. Si se produce un error, la aplicación no debería abortar, sino que debe lanzar una excepción para luego capturarla y resolver la situación.

Se implementaron varias excepciones para servir de contingencia ante diversas situaciones específicas de SAPO, otros casos se cubrieron utilizando excepciones propias del lenguaje, como por ejemplo las relativas a la lectura y/o escritura de archivos (*IOException*). Todas ellas son objetos que heredan de la clase *java.lang.Exception*, y se ubican dentro del paquete que contiene la clase que las genera (es decir, la que contiene el o los métodos que lanzan la excepción).

Por ejemplo, la excepción *ifusuario.menues.RadiobaseMalIngresadaException* es lanzada por la ventana que sirve de interfaz para la creación de una nueva radiobase, en caso que el nombre que ingresa el usuario sea vacío o la altura no sea un valor numérico. Luego al ser creada, si la altura es negativa se genera una *red.RadiobaseMalDefinidaException* y finalmente, cuando la radiobase es agregada al sitio, si en el mismo ya existe otra con el mismo nombre se provoca una *red.RadiobaseRepetidaException*.

La respuesta del programa ante estas situaciones es la de mostrar un mensaje al usuario avisando de las razones que provocaron el error, permitiéndole al mismo repetir el procedimiento.

Capítulo 9

Formato de archivos

En este capítulo se detallan los formatos de archivo utilizados por SAPO para el manejo de datos. Algunos de ellos fueron especificados especialmente para el programa (como por ejemplo el que permite cargar datos de un patrón de radiación), otros, sin embargo, son reconocidos internacionalmente (como por ejemplo los de alturas de terreno), dejando abierta la posibilidad de aumentar la cantidad de formatos soportados en un futuro.

9.1. Archivos de entrada de datos de altura de terreno

Si bien GeoTools dispone de una herramienta para el manejo de datos del tipo raster (GridCoverage), en la distribución de GeoTools 2.0.0 no existe ninguna interfaz que permita la lectura y/o escritura de archivos con este tipo de información. Por este motivo se tuvo que buscar otras herramientas, y se encontró que la distribución 2.1.0 (no existente al momento de comenzar el desarrollo del presente proyecto) sí soportaba algunos formatos de archivo, que se listan a continuación:

- Formato ArcInfo ASCII Grid y GRASS ASCII Grid, soportados tanto para lectura como para escritura, con y sin compresión.
- Formato World (imágenes geo-referenciadas), tanto para lectura como para escritura.
- GeoTIFF (imágenes tiff geo-referenciadas), sólo para lectura y aún en desarrollo.
- WMS (OGC *Web Mapping Server client*), sólo para lectura y aún en desarrollo.

Es así que se evaluó la posibilidad de migrar de una versión de GeoTools a la otra, pero, dadas las grandes diferencias e incompatibilidades entre ambas distribuciones, se llegó a la conclusión de que no valía la pena por la cantidad de tiempo a invertir en

dicha migración, dado lo avanzado de la programación hasta ese momento. La solución se encontró importando de la revisión 2.1.0 únicamente las bibliotecas específicas que permitan satisfacer los requerimientos necesarios. Es de interés, además de ser capaces de leer archivos, poder escribirlos, a fin de guardar los resultados de las predicciones en el mismo formato, como se verá más adelante. Es por esto que se eligió, entre los arriba listados, los formatos ArcInfo ASCII Grid y GRASS ASCII Grid (con y sin compresión) que son de una enorme sencillez. Para su soporte fue necesario importar la biblioteca *org.geotools.data.arcgrid* (gt2-arcgrid-2.1.x.jar) e integrarla para que funcione en conjunto con la distribución 2.0.0. Se encontraron en ciertas clases algunos problemas específicos (en la lectura de archivos con salto de línea, en el establecimiento de los valores máximos y mínimos del raster, etc.) que se pudieron corregir creando clases hijas¹ y sobrescribiendo los métodos necesarios con los arreglos correspondientes. Todo esto fue posible gracias a que se utilizó una herramienta de código abierto, una de las razones más importantes por las cuales se eligió GeoTools, lo que otorga gran flexibilidad.

9.1.1. ASCII Grid

El formato ASCII Grid (.asc o .grid) es un formato definido por la ESRI (*Environmental Systems Research Institute*), el proveedor líder de sistemas GIS a nivel mundial [42]. Fue desarrollado originalmente para ArcInfo, software muy popular a nivel comercial; sin embargo ha sido ampliamente difundido y hoy en día es soportado por un gran número de paquetes de software. Al ser un formato ASCII, es fácilmente legible (puede ser editable mediante cualquier editor de texto); además, al tener la posibilidad de ser comprimido, es capaz de guardar gran cantidad de información en un archivo de tamaño razonable. Consiste en un encabezado que contiene la información geográfica y la resolución, seguido de los datos de altura, que se leen de izquierda a derecha comenzando por la fila que corresponde con el límite más al norte. Aquí se muestra un ejemplo de un encabezado válido:

```
ncols 150
nrows 250
xllcorner -156.08749650000
yllcorner 18.870890200000
cellsize 0.008333300
nodata_value -9999
```

- *ncols* y *nrows* se refieren respectivamente al número de columnas y filas en la grilla; deben estar seguidos por un valor entero.
- *xllcorner* e *yllcorner* corresponden al borde más al este y más al sur de la grilla respectivamente.

¹Se crearon las clases `archivos.ArcGridRasterGeneral` que hereda de `org.geotools.data.arcgrid.ArcGridRaster` y `archivos.GRASSArcGridRasterGeneral` que hereda de `org.geotools.data.arcgrid.GRASSArcGridRaster`

- *cellsize* es la resolución del raster.
- *nodata_value* indica el valor que representa la ausencia de datos. Es opcional, por lo cual no debe asumirse su presencia. El valor por defecto es -9999.

9.1.2. GRASS ASCII Grid

El formato GRASS ASCII grid (.arx) es una variación del anterior, que se diferencia en el encabezado. He aquí un ejemplo del mismo:

```
north: 3451250
south: 3438850
east: 298920
west: 290860
rows: 100
cols: 65
```

- *north*, *south*, *east* y *west* son las coordenadas más al norte, sur, este y oeste de la grilla respectivamente.
- *rows* y *cols* se refieren respectivamente al número de filas y columnas en la grilla; deben estar seguidos por un valor entero.

A diferencia del ASCII Grid este formato no asume celdas cuadradas. Se soporta para ambos formatos compresión con gzip (.gz).

9.2. Archivos de entrada de datos de edificaciones y manzanas

Para manejo de datos vectoriales, uno de los formatos más populares es el *shapefile* (.shp). Es el único formato de este tipo soportado en la distribución utilizada de GeoTools tanto para escritura como para lectura, por lo cual se decidió utilizarlo para los datos de edificaciones y de manzanas. La posibilidad de escribir archivos es de interés a fin de dar herramientas al usuario de crear sus propias bases de datos mediante una interfaz gráfica (el Generador de Edificios).

9.2.1. SHP

Este formato [43] creado por la ESRI, almacena información de un conjunto de *features* geo-referenciados, esto es, geometrías y atributos. Consiste en un archivo principal (.shp), un archivo índice (.shx) y una tabla dBASE² (.dbf). El archivo principal

²Formato de base de datos simple y ampliamente utilizado.

puede tener una cantidad variable de registros, en donde cada uno de ellos describe una geometría (punto, línea o área) mediante las coordenadas de sus vértices. El archivo índice contiene las posiciones de los registros en el archivo principal y la tabla dBASE almacena los atributos, cada uno de ellos tiene una relación unívoca con la geometría a la cual está asociado.

Para ser reconocidos correctamente por SAPO, los SHP deben estar compuestos por features con los atributos que se muestran en la tabla 9.1.

	Nombre	Tipo	Descripción
Datos de edificios	“the_geom”	Polygon	Figura en dos dimensiones que representa la base del edificio. Se define mediante las coordenadas de sus vértices, en metros. Es la <i>default geometry</i> .
	“altura”	double	Valor numérico que representa la altura del edificio en metros.
Datos de manzanas	“the_geom”	Polygon	Figura que representa la manzana. Se define mediante las coordenadas de sus vértices, en metros. Es la <i>default geometry</i> .

Cuadro 9.1: Atributos de los features para representar edificios y manzanas

9.3. Archivos de entrada para generar manzanas

En la sección 7.5.1 se detalló el funcionamiento del generador de datos de disposición y tamaño de edificios. Para utilizar dicha herramienta es necesario tener la disposición y forma de las manzanas. Esta misma herramienta cuenta con la posibilidad de generar las manzanas a partir de un archivo de texto. La idea es especificar las coordenadas de las manzanas y el ancho de las calles, o directamente las coordenadas de las esquinas de las mismas.

En el primer caso, se especifican las coordenadas de las manzanas (es decir, del cruce de las calles que la conforman) y el ancho de la calle correspondiente. Por ejemplo, la especificación de una manzana puede ser:

```
manzana
0 0 100 0 100 100 0 100 0 0
anchos
10 10 10 10
```

Lo anterior resulta en una manzana de cuatro esquinas ubicadas en las coordenadas (5, 5), (95, 5), (95, 95) y (5, 95). Por lo tanto el formato es: la palabra clave `manzana`, en

la siguiente línea las coordenadas de los cruces de las calles que la conforman finalizando con la que comenzó, todas separadas por un espacio. Vale la pena aclarar que el orden de las esquinas debe ser tal que si se unen los puntos en el orden que aparecen, se forme la manzana que se está intentando crear. En la siguiente línea la palabra clave **anchos**, luego de la cual se especifican los anchos de las calles.

Ahora bien, si se cuenta con las coordenadas de las esquinas, se puede especificar dichas coordenadas e ingresar anchos todos iguales a cero. Por ejemplo, si se quiere obtener lo mismo que en el ejemplo anterior basta con escribir:

```
manzana
5 5 95 5 95 95 5 95 5 5
anchos
0 0 0 0
```

9.4. Archivos de entrada para la importación de patrones de radiación

La información de los patrones de radiación horizontal y vertical que conforman los diferentes tipos de antena puede ser ingresada manualmente mediante la interfaz que ofrece SAPO, que consiste en tablas de dos entradas. En la primer columna el usuario debe ingresar los ángulos (comenzando por 0, que corresponde a la dirección de máxima ganancia) y en la segunda las ganancias relativas a la ganancia máxima en dB. Sin embargo, puede ser útil para el usuario importar dichos datos desde un archivo, si el mismo dispusiera de ellos en formato digital. No se encontró un formato de archivo mundialmente utilizado, ya que prácticamente todos los fabricantes de antenas poseen uno propio. Es así que se eligió usar un archivo de texto plano, al cual la mayoría de los formatos se pueden adecuar fácilmente. Se deben especificar dos columnas separadas por un tabulador; la primera línea es ignorada. Un ejemplo sencillo se muestra a continuación.

```
ang    gan
0      0
60     -10
120    -15
180    -25
240    -15
300    -10
```

9.5. Archivos de entrada-salida de predicciones

Para guardar los resultados de las predicciones se optó por utilizar los mismos formatos de archivo que en el caso de los datos de altura de terreno, por ser ambos de tipo raster.

- ASCII grid
- ASCII grid comprimido con gzip
- GRASS ASCII grid
- GRASS ASCII grid comprimido con gzip

Cada predicción está formada por los resultados correspondientes a varias antenas; para el almacenamiento en disco se decidió guardar un archivo por cada una de ellas. Los mismos son guardados en una carpeta con el nombre que el usuario elija para almacenar la predicción, y cada uno lleva el nombre de la antena a la cual está asociado. Al momento de abrir una predicción, el usuario selecciona la carpeta, SAPO lee automáticamente todos los archivos dentro de ella y reconstruye la predicción total, computando los valores que corresponde en todos los puntos del terreno y desplegándolos en pantalla.

9.6. Archivos de entrada-salida para el análisis de error de predicción

En la sección 7.5.5 se especificó el funcionamiento del módulo de análisis de error de predicción. El formato de los datos de las medidas es muy sencillo. Es simplemente un archivo de texto plano donde en cada línea aparece la coordenada x e y del punto donde se tomó la medida de potencia, luego debe aparecer la medida en dB; todo separado por un espacio. Un ejemplo puede ser:

```
455.5 6809.3 -45.1
```

El ejemplo especifica que en la coordenada (455.5, 6809.3) se midió una potencia de recepción de -45.1 dB. El mismo formato se utiliza en la grabación a disco de los cálculos realizados con esta herramienta.

9.7. Archivos de entrada-salida para el manejo de proyectos

Una vez que el usuario crea un nuevo proyecto o área de trabajo en la que va a centrar su análisis de predicción, debe tener la posibilidad de guardar las modificaciones

realizadas para futuros aportes al proyecto en estudio o para simplemente dejar constancia de los resultados de un conjunto determinado de predicciones. De esta forma, al utilizar la herramienta de software SAPO, tendrá tanto la opción de crear un nuevo proyecto como la de abrir un proyecto anteriormente guardado y continuar trabajando en el sin necesidad de redefinir datos de entrada, variables y parámetros. El formato de archivo que se eligió para el guardado de datos fue *XML*, principalmente debido a su gran escalabilidad, flexibilidad y fácil entendimiento al tratarse de un formato basado en texto plano. Si bien se manejó como alternativa en primera instancia guardar directamente los objetos a disco (implementando la interfaz *java.io.Serializable* en cada clase que se quisiese guardar), al trabajar en el marco de un Proyecto resultó más adecuado manejar un lenguaje que permita guardar la información de manera estructurada y permitiendo el acceso al contenido con cualquier editor estándar. Además, en futuras versiones de SAPO, podría lograrse compatibilidad con proyectos guardados en versiones anteriores.

9.7.1. XML

XML, es el *Extensible Markup Language*, y consiste en un conjunto de reglas para definir etiquetas semánticas que permiten organizar un documento en diferentes partes para futuro procesamiento. Es una recomendación de la W3C (*World Wide Web Consortium*) quien lanzó en febrero de 1988 y continúa manteniendo hasta hoy la versión 1.0 como la especificación oficial [44].

XML es un metalenguaje que define la sintaxis utilizada para definir otros lenguajes de etiquetas (`< .. >`) estructurados. Los documentos XML se componen de unidades de almacenamiento llamadas entidades (*entities*), que contienen datos analizados (*parsed*) o sin analizar (*unparsed*). Los datos analizados se componen de caracteres, algunos de los cuales forman los datos del documento y el resto forman las etiquetas. Las etiquetas codifican la descripción de la estructura lógica y de almacenamiento del documento.

Existen dos tipos de documentos XML:

- “Bien formados” (*well-formed*): son todos los que cumplen las especificaciones del lenguaje respecto a las reglas sintácticas y de estructura jerárquica, sin estar sujetos a elementos fijados en un DTD (*Document Type Definition*)³.
- “Válidos” (*valid*): además de estar bien formados, siguen una estructura y una semántica determinada por un DTD (por ejemplo HTML).

En el caso de SAPO, luego de analizadas las exigencias que la herramienta de software impone sobre el formato para guardar un proyecto, se optó por trabajar con documentos XML “bien formados”, tomando en cuenta que el DTD es opcional en la

³Definición del tipo de documento: archivo que encierra una definición formal de un tipo de documento y a la vez especifica la estructura lógica de cada documento

utilización del lenguaje XML y que se adecúa a aplicaciones de mayor complejidad que la que exige SAPO en el guardado de un proyecto.

Se detallan a continuación las principales ventajas del lenguaje XML que influyeron en la elección de dicho formato para guardar un proyecto en SAPO.

- *Texto plano*: Al no tratarse de un formato binario, se pueden crear y editar archivos desde un editor estándar de texto. Esto facilita la búsqueda y la corrección de errores en un programa, y es útil para el almacenamiento de pequeñas a grandes cantidades de datos, lo cual garantiza una completa escalabilidad.
- *Identificación de datos*: XML permite tener conocimiento del tipo de datos almacenado al tener la información identificada mediante etiquetas. De esta forma, los datos podrán ser procesados por diversos programas y utilizados en diferentes aplicaciones.
- *Procesamiento sencillo*: El hecho de que sea obligatorio que los documentos XML estén bien formados hace que sea simple crear un programa para el procesamiento de datos, por lo que existen varios *parsers* para procesar más fácilmente la información.
- *Estructura jerárquica*: Permite que sea más sencillo acceder y modificar la información en el documento dado que los datos se encuentran ordenados.

XML y JAVA

Dado que los documentos XML son documentos de texto plano, pueden ser representados en programas de Java como una combinación de *strings* (secuencia de caracteres). Otros tipos de datos, como ser *int* o *double* pueden convertirse a su representación en *strings* para ser tratados.

Para evitar las dificultades que implica analizar una entrada XML, la mayoría de los programas se apoyan en *parsers* XML para leer los documentos. Un parser es una biblioteca de software capaz de leer un documento y chequear que esté bien formado. Las aplicaciones utilizan los métodos definidos en la API (*Application Performance Interface*) del parser para recibir o solicitar información que el parser obtiene del documento XML. Existen dos grandes APIs estándar para el procesamiento de documentos XML con Java: la *Simple API for XML* (SAX) y la *Document Object Model* (DOM) [45], ambas en diferentes versiones. También existen otras, como ser JDOM, dom4j, ElectricXML, y XMLPULL [45].

Para guardar un proyecto en SAPO se optó por la biblioteca API SAX, principalmente por tratarse de un estándar, por su eficiencia y por su escalabilidad.

SAX, la *Simple API for XML*, es el estándar más reconocido de las APIs de XML. Es la más completa y la más correcta a la vez. Las clases e interfaces en SAX modelan el parser, el flujo de datos desde donde se lee el documento y la aplicación cliente que

recibe los datos del parser. Sin embargo, ninguna clase modela el documento XML en sí mismo, sino que el parser alimenta a la aplicación cliente con el contenido. Esto hace que SAX sea muy rápido y eficiente en el uso de la memoria (ya que no tiene que guardar el documento entero en memoria), lo cual presenta una ventaja frente a otras bibliotecas en lo que se refiere a documentos XML extensos.

XML y SAPO

SAPO le brinda al usuario en todo momento la posibilidad de guardar los cambios efectuados sobre un nuevo proyecto o un proyecto abierto. Para lograr esto, cuando el usuario opta por guardar los cambios, se crea en forma automática un archivo XML que refleja los cambios ingresados.

El documento estará organizado siguiendo una estructura jerárquica yendo del concepto más general que sería un proyecto a lo más particular como podrían ser las características de una antena o los parámetros de un modelo. También se guardarán en el archivo XML los URLs de los archivos con la información de las distintas capas (alturas, manzanas, edificios, predicciones) que el usuario vaya agregando al programa de manera que estén disponibles en forma automática al abrir un proyecto. A continuación se muestra un ejemplo de la composición de un documento XML utilizado para guardar un proyecto muy sencillo.

```
<?xml version="1.0"?>
<Proyecto>
  <Nombre>Munich</Nombre>
  <Autor>Juan Perez</Autor>
  <Observaciones>Este es un proyecto para pruebas.</Observaciones>
  <Fecha>Tue Feb 28 13:16:19 ART 2006</Fecha>
  <LinkCapaAlturas>file:/C:/altMunich30m16II.arc</LinkCapaAlturas>
  <LinkCapaEdificios>file:/C:/edifMunich.shp</LinkCapaEdificios>
  <LinkCapaManzanas>file:/C:/manzanasMunich.shp</LinkCapaManzanas>
  <PerfilUsuario><Altura>1.5</Altura>
    <Sensibilidad>-110.0</Sensibilidad>
    <CI>0.0</CI>
  </PerfilUsuario>
  <Sitio>
    <Nombre>sitio</Nombre>
    <CoordenadaX>1281.36</CoordenadaX>
    <CoordenadaY>1381.27</CoordenadaY>
    <Radiobase>
      <Nombre>torre</Nombre>
      <Altura>13.0</Altura>
      <Antena>
        <Nombre>antena</Nombre>
```

```
<Potencia>8</Potencia>
<Tilt>0.0</Tilt>
<Azimut>0</Azimut>
<ModeloAntena>espacioLibre</ModeloAntena>
<CanalFrecuenciaAntena>munich</CanalFrecuenciaAntena>
<TipoDeAntena>simple</TipoDeAntena>
</Antena>
</Radiobase>
</Sitio>
<Modelo>
  <NombreImplementacion>espacioLibre</NombreImplementacion>
  <Nombre>Propagacion en Vacio ( $L=A*r^n$ )</Nombre>
  <ParametrosAjustables>
    <Nombre>n</Nombre>
    <Valor>2.0</Valor>
  </ParametrosAjustables>
  <ParametrosAjustables>
    <Nombre>A</Nombre>
    <Valor>2.385672579618471E7</Valor>
  </ParametrosAjustables>
</Modelo>
<CanalFrecuencia>
  <Nombre>munich</Nombre>
  <Frecuencia>
    <Valor>947.0</Valor>
  </Frecuencia>
</CanalFrecuencia>
<TipoAntena>
  <NombreTipo>simple</NombreTipo>
  <Tipo>isotropica</Tipo>
</TipoAntena>
</Proyecto>
```

Capítulo 10

Algoritmos y cálculos implementados

En el presente capítulo se detallan las implementaciones hechas en SAPO para diferentes algoritmos utilizados en el cálculo de la potencia mediana de señal, algunos comunes a todos los modelos (como el cómputo de la distancia o de la ganancia), otros más complejos requeridos por modelos particulares. Por ejemplo, el COST231 Walfisch-Ikegami necesita la verificación de línea de vista y el cálculo del ángulo de orientación de la calle; el modelo MOPEM agrega el cálculo de la distancia a las esquinas más cercanas. El método de Vogler exige la resolución de la integral de atenuación por múltiples cuchillos, así como la identificación del perfil de cuchillos a considerar.

El cálculo de la potencia mediana de señal en un punto cualquiera (x, y) del mapa se obtiene aplicando la fórmula:

$$P_r(x, y)(dB) = P_t + G_t(x, y) - PL(x, y)$$

donde $P_r(x, y)$ es la potencia de recepción en el punto (x, y) , P_t es la potencia de transmisión de la antena en dBm, G_t es la ganancia de la antena transmisora (que se calcula según se explicará en la sección 10.2) y PL es la fórmula de pérdida de camino específica del modelo de propagación. La antena receptora se considera isotrópica, por esto su ganancia no se incluye en la ecuación.

10.1. Cómputo de distancia

Todos los modelos tienen dependencia con la distancia. La misma se calcula como (ver figura 10.1):

$$d = \sqrt{d_0^2 + (h_t - h_r)^2} \quad (10.1)$$

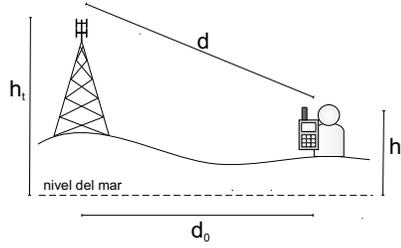


Figura 10.1: Distancia entre la radiobase y el móvil

donde

$$d_0 = \sqrt{(x_t - x_r)^2 + (y_t - y_r)^2} \quad (10.2)$$

y (x_t, y_t) , (x_r, y_r) son las coordenadas de la antena trasmisora y las del móvil respectivamente. Las alturas h_t y h_r se calculan como la suma de la altura del terreno más las alturas de la radiobase y del móvil. En el caso de la altura del transmisor, si está sobre un edificio la altura de éste también es tomada en cuenta.

10.2. Cálculo de ganancia de la antena trasmisora

La ganancia de la antena trasmisora variará de acuerdo a la dirección en donde se encuentre el receptor, salvo el caso en que la antena sea isotrópica. El valor de la ganancia (en dB) en la dirección (α_h, α_v) relativa a la dirección de máxima propagación es:

$$G(\alpha_h, \alpha_v) = G_{max} + G_h(\alpha_h) + G_v(\alpha_v)$$

donde G_h y G_v son ganancias (negativas) relativas a la máxima G_{max} y se obtienen de los patrones de radiación horizontal y vertical respectivamente.

10.2.1. Ángulos relativos a la dirección de máxima propagación

Para cada punto del mapa es necesario determinar los valores de los ángulos relativos α_h y α_v , que pueden observarse en la figura 10.2.

De la misma se deduce fácilmente:

$$\alpha_h = \arcsin\left(\frac{x_r - x_t}{d_0}\right) - azimuth \quad (10.3)$$

$$\alpha_v = \arctan\left(\frac{h_t - h_r}{d_0 \cos \alpha_h}\right) - tilt \quad (10.4)$$

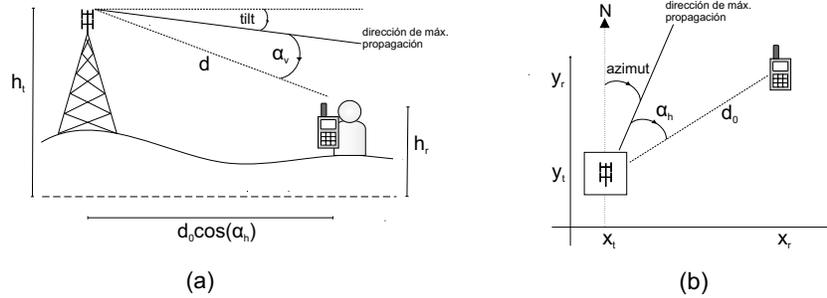


Figura 10.2: Definición de los ángulos relativos vertical y horizontal para el cálculo de la ganancia. (a) Vista lateral (b) Vista superior

d_0 y d se calculan según las ecuaciones (10.2) y (10.1):

$$d_0 = \sqrt{(x_t - x_r)^2 + (y_t - y_r)^2} \quad d = \sqrt{d_0^2 + (h_t - h_r)^2}$$

Cabe aclarar que las ecuaciones (10.3) y (10.4) son válidas para los casos en que la disposición de la radiobase y el móvil es como se muestra en la figura 10.2. Para contemplar los otros casos deben realizarse pequeñas correcciones, que no vale la pena detallar aquí. Como ejemplo puede mencionarse que, si el móvil se ubica al sur de la radiobase ($y_r < y_t$), el ángulo α_h a considerar es el suplementario del expresado en la fórmula (10.3).

todos los casos, deben sufrir pequeñas correcciones (por ejemplo una adición de 180 grados) de acuerdo a los diferentes casos definidos por la posición relativa entre la radiobase y el móvil.

10.2.2. Búsqueda en el patrón de radiación

La información del patrón de radiación consiste en una lista ordenada de ángulos que varían entre 0 y 360 grados, con sus respectivas ganancias relativas (el primer valor es el de 0 grados - 0 dB, que corresponde a la dirección de máxima propagación).

Es necesario determinar qué valor de ganancia tomar en el caso de un ángulo que no se encuentre en dicha lista. Una opción podría ser tomar el valor correspondiente al ángulo más cercano, pero esta posibilidad se descartó por ser poco precisa en caso de contar con un número pequeño de datos, optándose por usar interpolación lineal. Para buscar los valores de ganancia entre los cuales hay que interpolar, se implementó un algoritmo de forma de tratar de hacer rápida la búsqueda en el patrón de radiación, sin tener que recorrer la lista de datos innecesariamente. Para esto se basó en la idea que el cálculo de atenuación se hace punto por punto en el mapa, por lo que los valores de los ángulos no diferirán mucho de un punto a otro. Si en la búsqueda anterior se

determinó que el ángulo estaba entre el índice i e $(i+1)$ de la tabla, se empezará a buscar en ese intervalo, y no desde el principio. En caso de que el ángulo no esté comprendido se determinará si es menor o mayor, luego de acuerdo a eso el índice i se incrementará o decrementará y se volverá a buscar. Este procedimiento se repite hasta encontrar el intervalo en donde interpolar. Hay que tener en cuenta que la búsqueda en el patrón de radiación es circular, o sea, el último dato es seguido del primero, y en ese caso es necesario sumar a aquél 360 grados para evitar discontinuidades al hacer el cálculo de interpolación. Dicho cálculo es:

$$G = G_i + \frac{G_{i+1} - G_i}{\alpha_{i+1} - \alpha_i} \cdot (\alpha - \alpha_i)$$

donde G es la ganancia a calcular para el ángulo α , y, G_{i+1} y G_i son las ganancias en los ángulos α_i y α_{i+1} respectivamente, obtenidas del patrón de radiación.

10.3. Cálculo de alturas efectivas

El modelo de Okumura-Hata utiliza el concepto de alturas efectivas como una forma de tomar en cuenta los efectos de reflexión y dispersión. La definición original de Okumura de altura efectiva consiste en considerar la misma sobre el promedio de alturas del terreno entre 3 km y 15 km desde la radiobase hacia el móvil. Sin embargo se ha mostrado [46] que existen otras definiciones más eficientes. En la implementación de SAPO se decidió utilizar el siguiente criterio; como primera opción se considera la altura efectiva de la radiobase y del móvil como la distancia a la recta resultado de ajustar mediante regresión lineal el perfil de alturas de terreno entre la radiobase y el móvil (recta r en la figura 10.3). Si alguna de las alturas obtenidas se encuentra fuera del rango válido según las hipótesis del modelo, en ese caso se consideran directamente las sobre el nivel del terreno (alturas relativas).

La utilización de este algoritmo es opcional y configurable por el usuario; en caso de no habilitarse las alturas consideradas serán las relativas. Si se cuenta con un terreno llano la aplicación del algoritmo incrementa los tiempos de cálculo y no repercute considerablemente en los resultados.

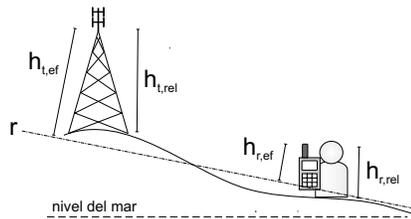


Figura 10.3: Definición de alturas efectivas

10.4. Cálculo del ángulo de orientación y ancho de la calle

Como se vio en el capítulo 5, hay algunos modelos de propagación (COST231-WI, MOPEM, etc.) que consideran la orientación y el ancho de las calles como unos de los tantos factores que inciden en el análisis de predicción. Por tal motivo, se incluyó dentro de la herramienta de software un algoritmo para determinar el ángulo que forma la calle donde está ubicado el móvil con la recta que une a éste con la radiobase, y a su vez el ancho de dicha calle.

El algoritmo planteado requiere la capa de manzanas debido a que se considera una calle al espacio entre dos manzanas adyacentes. Como se vio en la sección 8.1.5, una manzana es representada como una geometría (polígono) y esto permite utilizar las operaciones geométricas disponibles en la biblioteca JTS.

Dada la ubicación del móvil, el primer paso consiste en establecer algunas restricciones para aumentar la eficiencia del algoritmo en lo que se refiere a tiempos de cálculo. Una de ellas es descartar aquellas posiciones del móvil que se encuentren dentro de la superficie de una manzana, teniendo en cuenta que el posterior cálculo de atenuación en dichos puntos no agrega valor a la predicción ya que únicamente se consideran ambientes outdoor. Para ello, se determina si el móvil está contenido dentro de una manzana o no; en el caso de estarlo, no se procede a realizar el cálculo de la orientación y del ancho de la calle en dicho punto.

Otra de las hipótesis consiste en, dada la ubicación del móvil, considerar únicamente las manzanas que se encuentren cercanas a él, dado que si el mismo se halla muy lejos de la calle pierde sentido tomar la misma como referencia para el cálculo de la orientación y del ancho. Para obtener las manzanas más próximas al móvil, se crea un círculo con centro en la ubicación del mismo y radio fijo y se calcula la intersección entre la manzana y el círculo. En todos los casos en que la intersección no sea nula, es decir, que la manzana esté contenida en el área de interés, se considera la respectiva manzana como “cercana al móvil”, y luego es considerada para el cálculo de la orientación y del ancho de la calle.

Tomando como base las hipótesis anteriormente descritas, se procede a buscar la cuadra que esté a una menor distancia del móvil dentro de todas las que forman parte de las manzanas cercanas a él. Para realizar esta medida el algoritmo recorre todas las cuadras de las manzanas “cercanas” hasta quedarse con la que diste en una menor medida de la ubicación del móvil. Si se observa la figura 10.4, la menor distancia desde el móvil a alguna de las manzanas cercanas a él está dada por d .

Ángulo de orientación de la calle

Una vez obtenida la cuadra más próxima al móvil, resta calcular el ángulo que forma ésta con la recta que une a la radiobase con el móvil a fin de conocer la orientación de la calle. Partiendo de la base que existen dos posibles valores de ángulos como resultado

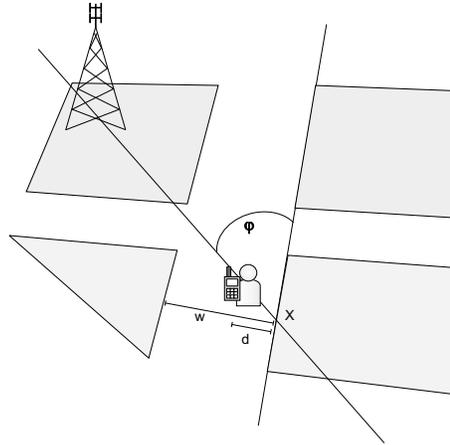


Figura 10.4: Orientación de la calle donde se encuentra el móvil respecto a la radiobase

de dicha intersección, se toma como criterio elegir el menor de ellos (representado por φ en la figura 10.4) de tal forma que siempre sea menor a 90° .

Ancho de la calle

Para determinar el ancho de la calle, el próximo paso es hallar el punto más cercano de la “cuadra más cercana” (punto X en la figura 10.4) para así obtener luego la pendiente de la recta que une al móvil con dicho punto. Con el valor de la pendiente y el punto X , se procede a crear un semirrecta con origen en X y tamaño fijo (lo suficientemente grande para asegurar la intersección con cuadras enfrentadas de la misma calle). Luego, se recorren nuevamente las manzanas cercanas, se obtiene el punto de intersección entre la semirrecta y cada una de las cuadras de dichas manzanas y se mide la distancia entre dicho punto y el punto X . La distancia mínima obtenida al finalizar el recorrido será el ancho de la calle (w) donde está ubicado el móvil.

10.5. Cálculo de la distancia a una esquina

El modelo de propagación para entornos urbanos de pequeñas microceldas (MO-PEM) incorpora en el cálculo de atenuación la distancia desde el móvil a las esquinas (d_{esq1}, d_{esq2}) como fue detallado en la sección 5.3.3. Por esta razón, se desarrolló un algoritmo que dada la ubicación del móvil, la ubicación de la radiobase y el trazado de manzanas, devuelve las distancias a las dos esquinas de la cuadra más próxima al móvil.

Para lograr esto, se toman las mismas hipótesis que para el cálculo de orientación: se descartan las posiciones del móvil que se hallan dentro de la superficie de la manzana

y se consideran para el cálculo únicamente las manzanas próximas al móvil (resultantes de la intersección con un círculo de centro en el móvil y radio fijo).

Al igual que para el algoritmo de cálculo de orientación se procede a continuación a encontrar la cuadra más próxima dentro de todas las manzanas cercanas pero además interesa ahora la manzana que contiene dicha cuadra. Una vez obtenida la cuadra más cercana, se mide la distancia del móvil a la misma y se halla el punto más cercano perteneciente a la cuadra (X).

Teniendo en cuenta que al ser una cuadra un segmento de recta es posible obtener las coordenadas de sus extremos, resultaría lógico pensar que restaría medir la distancia de X a los dos extremos de la cuadra más cercana para culminar con el algoritmo. Sin embargo, este procedimiento llevaría a resultados erróneos ya que como se describió en la sección 8.1.5, cada manzana es representada por un polígono con un número arbitrario de vértices y no siempre éstos se corresponden con esquinas de la misma. Por lo tanto, se optó por considerar una esquina a aquel punto perteneciente a dos cuadras adyacentes que conforman un ángulo mayor a 30° entre sí (ver figura 10.5).

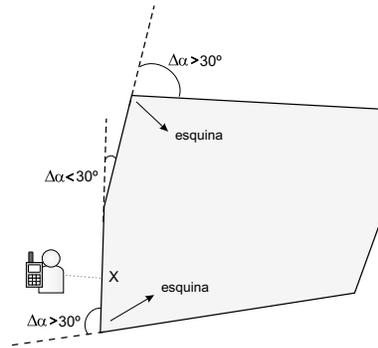


Figura 10.5: Determinación de las esquinas de una manzana

Es así que para obtener las esquinas más próximas al móvil, se partió de la cuadra más cercana ya obtenida y se fue calculando el ángulo entre cada cuadra y la siguiente hasta que este resultara mayor a 30° . A continuación se describe el cálculo del ángulo entre dos cuadras consecutivas:

$$\alpha_i = \arctan\left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}\right)$$

$$\alpha_{i+1} = \arctan\left(\frac{y_{i+2} - y_{i+1}}{x_{i+2} - x_{i+1}}\right)$$

$$\Delta\alpha = \alpha_{i+1} - \alpha_i$$

donde (x_i, y_i) y (x_{i+1}, y_{i+1}) son las coordenadas de la primera cuadra, (x_{i+1}, y_{i+1}) y (x_{i+2}, y_{i+2}) las coordenadas de la siguiente y $\Delta\alpha$ el ángulo entre ambas. Cuando $\Delta\alpha$

resulte mayor a 30° se detendrá la iteración y la esquina estará dada por (x_i, y_i) . Cabe destacar que esta misma iteración se reitera luego en el otro sentido para encontrar la segunda esquina más próxima al móvil $((x_{i2}, y_{i2}))$.

Una vez obtenidas las esquinas resta calcular la distancia entre X y (x_i, y_i) y entre X y $((x_{i2}, y_{i2}))$ (d_{esq1} y d_{esq2}).

10.6. Consideración del factor de seguridad en variables aleatorias

El modelo de Erceg es el único que dispone de variables aleatorias en su fórmula de pérdida de camino, variables lognormales que define mediante los valores de media y varianza. Por ejemplo, sea un parámetro cualquiera y definido como:

$$y = \mu + x\sigma \quad \text{donde } x \text{ es } N[0, 1]$$

En estos casos se optó por usar un criterio conservador, si y aporta positivamente a la atenuación se tomará como:

$$y = \mu + N\sigma$$

donde N es un número entero al que llamamos *factor de seguridad*. Este valor es configurable por el usuario, de acuerdo a qué tan conservador el mismo desee ser. Por ejemplo, con $N = 1$ tendrá un 68.27% de probabilidad de estar por debajo el valor de y , con $N = 2$ la probabilidad ascenderá a 95.5% y con $N = 3$ a 99.73%.

10.7. Verificación de línea de vista

Como se vio en la sección 4.2, la existencia o no de línea de vista entre dos antenas no depende únicamente de que la línea que las une esté libre de obstáculos. Se debe verificar que los mismos no penetren en la elipse de revolución definida por focos en ambas antenas y radio $\lambda/2$. Por lo tanto, el software debe ser capaz de verificar si la intersección entre el volumen ocupado por dicha elipse de revolución y los obstáculos presentes en el entorno es vacía o no.

Dado que el software se desarrolló para entornos urbanos y suburbanos, únicamente fueron considerados obstáculos a las edificaciones presentes. Es decir, se despreció la posibilidad de que el terreno por sí solo obstaculice la visión de una antena. Verificar que únicamente el terreno obstaculice o no la visión es una complicación innecesaria para el entorno considerado, ya que la mayoría se encuentra edificada y por lo tanto considerada.

Otra hipótesis adicional, como se explicó en la sección 8.1.5, es que los posibles obstáculos son prismas rectos, todos con bases horizontales (ver figura 10.6).

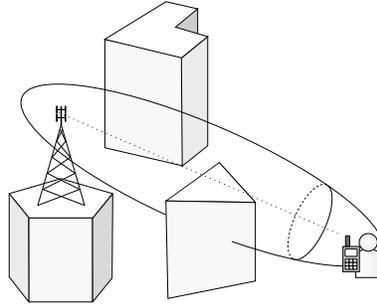


Figura 10.6: Ejemplo de disposición de edificaciones y la elipsoide a tomar en cuenta para la verificación de LOS

Aunque estas hipótesis simplifican el problema, la complicación principal reside en que el techo puede tomar cualquier forma, inclusive no convexa, y obviamente sus caras pueden tener cualquier orientación respecto a la recta que une ambos focos del elipsoide, que como se verá más adelante tiene una importancia fundamental. Antes de continuar, vale la pena aclarar que de ahora en adelante cuando se refiera a las edificaciones, éstas serán únicamente las candidatas a intersectar con la elipse de revolución. Por candidatas se consideran aquellas edificaciones que se encuentren a una distancia menor del segmento que une los focos que el eje menor de la elipsoide. En realidad, y para simplificar esta búsqueda inicial de candidatos, se medirá la distancia entre las edificaciones y la recta en el plano horizontal (es decir en la proyección).

La primera y más simple solución sería poder verificar directamente si alguna de las edificaciones presentes intersecta con la elipse de revolución. Para poder realizar esto, se debería contar con un biblioteca que maneje formas en tres dimensiones. Como se vio, la biblioteca JTS, aunque es una biblioteca sumamente completa y poderosa, únicamente realiza operaciones entre geometrías en el plano. Por lo tanto, esta primera solución es inviable y se deben buscar soluciones que únicamente utilicen operaciones entre geometrías en dos dimensiones.

Una solución de este tipo bastante frecuente es la de suponer que las paredes de las edificaciones son únicamente cuatro, están alineadas con la recta que une los focos o perpendiculares a ella, y además la proyección del techo y el segmento que forman los focos sobre el plano horizontal se intersectan. Si tal fuera el caso, la solución sería bastante sencilla. El primer paso sería encontrar la intersección entre el plano vertical que pasa por el segmento y las edificaciones. Esto definiría un perfil de alturas; luego habría que verificar que no existe ningún punto en dicho perfil de alturas que se encuentre dentro de la elipse formada por la intersección entre dicho plano y la elipse de revolución (ver figura 10.7). Pero las simplificaciones supuestas son demasiado restrictivas. Por ejemplo, si existe una edificación que no corta el segmento, su elipse no sería la misma que para el resto. Pero aún peor, si las paredes estuvieran alineadas en cualquier sentido, podría suceder que la zona más comprometida (y con la cual debería realizarse el perfil) no sea la que se intersecta con el segmento. Algo similar sucedería

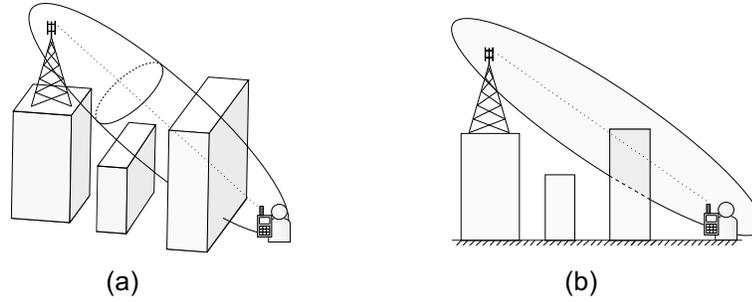


Figura 10.7: Ejemplo de edificaciones de base rectangular alineadas con el eje mayor de la elipsoide. (b) Perfil de alturas equivalente

si las edificaciones tomaran cualquier forma, por ejemplo cóncava.

La solución desarrollada para el problema es la siguiente. Cada cara de cada prisma define un plano. La intersección de dicho plano con la elipse de revolución define una elipse. Si esta elipse se intersecta con la cara, entonces el prisma se intersecta con la elipse de revolución y por lo tanto no existe línea de vista. En caso contrario se continúa con las sucesivas caras del prisma y con todos los prismas presentes. Si ninguno de los prismas intersecta la elipse de revolución, entonces existe línea de vista.

Esta solución, aunque robusta, presenta dos problemas. El primero y más crítico es el tiempo de cálculo. Por cada punto donde se quiera verificar la existencia de línea de vista se deben hallar los parámetros que definen la elipsoide de Fresnel, luego por cada pared de cada edificio presente se debe intersectar la elipsoide con el plano definido por la pared y hallar la elipse así definida, y por último se debe verificar si dicha elipse se intersecta o no con la pared. El segundo contratiempo es que intersectar una elipsoide con un plano arbitrario no es un problema sencillo (la forma de hallar dicha intersección puede verse en el anexo A) que conlleva tres rotaciones si además la elipsoide también es arbitraria. Esto degrada aún más la performance temporal del algoritmo.

10.8. Resolución de la integral de Vogler

En la sección 4.3.1 se presentó la solución propuesta por Vogler para el cálculo de atenuación por múltiples cuchillos, quien plantea que la misma puede ser obtenida mediante la resolución de la integral (4.3). Para dicha resolución no se aplicará el método propuesto por el propio Vogler, sino que se evaluará la integral directamente utilizando técnicas numéricas (basándose en [47]), por considerarse un método más sencillo.

Si realizamos el siguiente cambio de variable:

$$u_m = x_m - \beta_m$$

La integral (4.3) se transforma en:

$$A_N = C_N \pi^{-N/2} e^{\sigma_N} \int_0^\infty \cdots \int_0^\infty e^A (\cos B - j \sin B) du_1 \cdots du_N$$

donde

$$A = \sum_{m=1}^{N-1} \left[2\alpha_m u_m u_{m+1} - u_m^2 - \sqrt{2} u_m b_m \right] - u_N^2 - \sqrt{2} u_N b_N$$

$$B = \sum_{m=1}^N \left[\sqrt{2} u_m b_m + b_m^2 \right]$$

El parámetro b_m se define como β_m/\sqrt{j} ; por lo tanto a partir de ahora se evaluará la importancia de un cuchillo directamente por su b_m asociado.

Antes de aplicar los métodos numéricos elegidos al caso de esta integral en particular, sería conveniente realizar una breve explicación de los mismos, ver los conceptos detrás de ellos, algunas propiedades y algunas implementaciones particulares.

10.8.1. Estimación Numérica: Métodos QMC y RQMC

Método QMC

Supongamos que queremos estimar la siguiente integral:

$$\mu = \int_{[0,1]^t} f(u) du$$

Este es un caso bastante general, pues casi cualquier región de integración se puede llevar fácilmente al cubo unitario de dimensión t con algún cambio de variable.

La primer idea sería utilizar métodos numéricos de integración clásicos como una aproximación de Riemman. El problema es que la mayoría de estos se vuelven poco prácticos cuando la dimensión t se vuelve más grande que, por poner un ejemplo, cuatro o cinco. El estimador clásico para realizar integrales de mayor dimensión es el promedio de f evaluado en algún conjunto $P_n = \{u_0, \dots, u_{n-1}\} \subset [0, 1]^t$,

$$Q_n = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} f(u_i)$$

Y el error de estimación resulta: $E_n = Q_n - \mu$

El método de *Monte Carlo* (MC) consta en elegir el conjunto P_n aleatoriamente con distribución uniforme en $[0, 1]^t$. Esto es una aplicación directa de la *Ley Fuerte de los*

Grandes Números: μ es la esperanza de $f(X)$, siendo X una variable aleatoria uniforme en el cubo unitario. Si estamos en las hipótesis de dicho teorema (VA iid de varianza finita), entonces se cumple que la media convergerá casi seguramente a la esperanza. Además, utilizando el *teorema central del límite* se tiene que $\sqrt{n}(Q_n - \mu)/\sigma \rightarrow N(0, 1)$ en distribución a medida que $n \rightarrow \infty$, por lo que el error de estimación converge como $|E_n| = O_p(\sigma/\sqrt{n})$, sin importar t .

¿Pero es lo más inteligente elegir los puntos de la secuencia de manera aleatoria? Los métodos QMC (*Quasi Monte Carlo*) son aquéllos que utilizan secuencias P_n cuyos puntos están “más regularmente” distribuidos en $[0, 1]^t$ para intentar disminuir el error $|E_n|$ y mejorar la convergencia de $O_p(1/\sqrt{n})$ (ver figuras 10.8 y 10.9). La definición de “más regularmente” se hace utilizando la noción de *discrepancia* ($D(P_n)$) entre la distribución empírica de los puntos de P_n y la distribución uniforme en $[0, 1]^t$. Existen varias formulaciones para la medida de esta discrepancia, aunque aquí sólo se introducirá una de ellas, la denominada *Star-Discrepancy*. Ésta es la más sencilla, pues no es más que la distancia de Kolmogorov-Smirnov entre la distribución empírica de P_n ($\hat{F}_n(x)$) y la distribución de una VA uniforme en el hipercubo unitario ($F(x)$). Es decir:

$$\hat{F}_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} I(x_i \leq x)$$

$$F(x) = F(x_1, \dots, x_t) = \min(1, x_1, \dots, x_t)$$

La *Star-Discrepancy* se define como:

$$D_n^* = \sup_x \left| \hat{F}_n(x) - F(x) \right|$$

Además, a partir de la discrepancia y alguna medida de la regularidad de f se pueden establecer cotas máximas para el error de integración de la forma:

$$|E_n| \leq V(f)D(P_n)$$

Donde $V(f)$ mide la variabilidad de la función. Un ejemplo de estas desigualdades es la de Koksma-Hlawka, donde $D(P_n)$ es la *star-discrepancy* y $V(f)$ es la variación total de f en el sentido de Hardy y Krause (que intuitivamente es el largo de los segmentos monótonos de f). De todas formas, estas desigualdades tienen el problema de ser muy difíciles de calcular y aunque dan cotas muy precisas para el peor caso, para las funciones más “típica” la cota está muy por encima del error real [48]. De todas formas, en la mayoría de los problemas se reduce el error $|E_n|$, y en ocasiones por grandes cantidades, comparado con el caso de MC.

Existen dos grandes familias de construcción de secuencias de baja discrepancia¹: *digital nets* e *integration lattices*. Las primeras construyen las denominadas (t, m, s) -*nets*,

¹Una secuencia de baja discrepancia (*low-discrepancy sequence*) es aquélla que tiene una discrepancia mucho menor que para una secuencia típica de valores aleatorios.

y su principal característica es que si una secuencia de n puntos tiene baja discrepancia, entonces también la tendrá la misma secuencia con $n - 1$ puntos. Ejemplos de estas secuencias son las de Halton, Sobol, Faure y la de Niederreiter [49]. Con estas secuencias se logran velocidades de convergencia del orden de $O(n^{-1}(\ln n)^t)$, que mejora asintóticamente la performance en relación al método de MC. Las *lattice rule* son secuencias

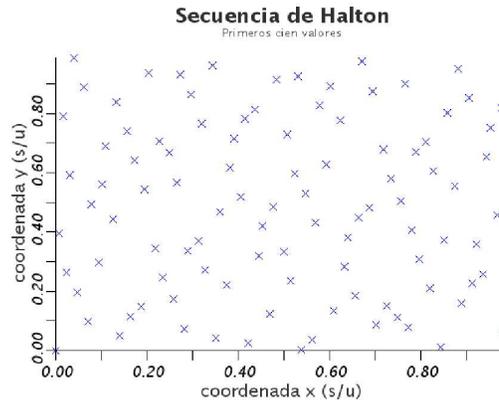


Figura 10.8: Secuencia de Halton.

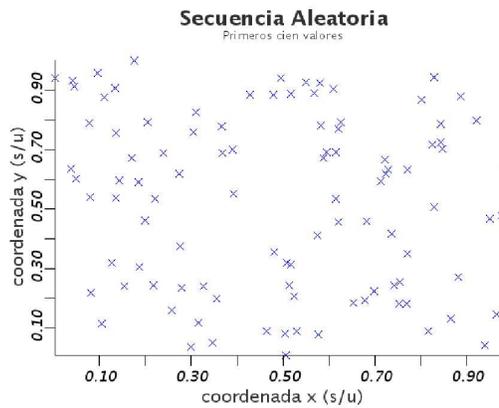


Figura 10.9: Secuencia de números aleatorios.

construidas por la intersección entre el cubo unitario y una *integration lattice* (subconjunto de \mathbb{R}^t cerrado en la suma y la resta y que contiene a \mathbb{Z}^t como subconjunto). Un caso especial de ellas es la secuencia de Korobov, donde el i -ésimo punto se construye de la siguiente manera:

$$u_i = \frac{i}{n}(1, a, a^2, \dots, a^{t-1}) \bmod 1$$

n es la cantidad de puntos y a es un valor entero arbitrario. El valor de a es muy importante; por ejemplo, el máximo común divisor entre n y a debe ser 1 para evitar valores repetidos en la secuencia. Pero además, es conveniente que la proyección de la secuencia sobre distintos subespacios de \mathbb{R}^t de menor dimensión tenga también la mayor cantidad posible de puntos y la menor discrepancia posible. L'Ecuyer y Lemieux construyeron tablas con valores de n y a que cumplen dichas propiedades [48].

Método RQMC

Si tenemos una secuencia de baja discrepancia y le sumamos un valor fijo a todos sus puntos de la forma:

$$u_i^* = (u_i + c) \text{ mod } 1$$

la discrepancia en esta nueva secuencia P_n^* se mantiene pues la estructura se mantiene; es así que surge la idea de los métodos RQMC (*Randomized Quasi Monte Carlo*). Si c en la ecuación anterior es una VA uniforme en $[0, 1]^t$, se podrían hacer varias realizaciones QMC con P_n^* obtenidos a partir de distintos valores de c sorteados aleatoriamente, y al promediar los valores obtenidos bajaría aún más la varianza del estimador.

Volviendo a la integral de Vogler, faltaría poner los límites de integración en el hipercubo unitario y se estaría en condiciones de aplicar los métodos recién explicados. Para ello hace falta un último cambio de variable.

$$u_m = \frac{x_m}{1 - x_m}$$

$$\Rightarrow A_N = C_N \pi^{-N/2} e^{\sigma_N} \int_0^1 \cdots \int_0^1 e^A (\cos B - j \sin B) \frac{dx_1}{(1 - x_1)^2} \cdots \frac{dx_N}{(1 - x_N)^2}$$

donde

$$A = \sum_{m=1}^{N-1} \left[2\alpha_m \frac{x_m}{1 - x_m} \frac{x_{m+1}}{1 - x_{m+1}} - \left(\frac{x_m}{1 - x_m} \right)^2 - \sqrt{2} \frac{x_m}{1 - x_m} b_m \right] - \frac{x_N}{1 - x_N} - \sqrt{2} \frac{x_N}{1 - x_N} b_N$$

$$B = \sum_{m=1}^N \left[\sqrt{2} \frac{x_m}{1 - x_m} b_m + b_m^2 \right]$$

10.8.2. Algoritmo para la evaluación de la integral

En definitiva, para la evaluación de la integral y en una primera instancia, el procedimiento es el siguiente. Se genera una secuencia de Korobov (con los valores recomendados de $n = 4093$ y $a = 1397$ o $n = 2039$ y $a = 1487$). A partir de ella se generan, por ejemplo, 10 secuencias mediante el método RQMC con las cuales se obtienen 10 estimaciones de la integral. El promedio de dichas estimaciones será lo que se tome como el valor definitivo de la integral (los resultados para un ejemplo sencillo se pueden

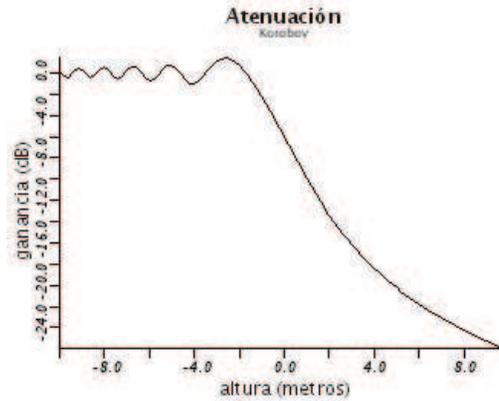


Figura 10.10: Resultado del algoritmo inicial para $r=[50\ 50]$, $h=[0\ 0]$ y $f=800$ Mhz. (r es el vector de separaciones y h es el vector de alturas)

apreciar en la figura 10.10). Pero hay un problema; Vogler [12] advierte que cuando algún obstáculo es demasiado pequeño (su b asociado es muy pequeño), su serie necesita de muchos términos para converger. En este caso, esto se traduce a que cuando algún obstáculo es despreciable se necesitaría un n muy grande (ver figura 10.11). Por

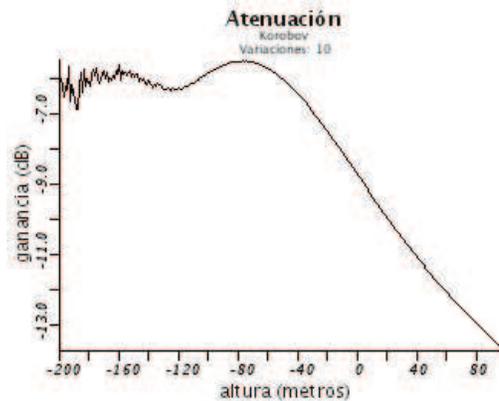


Figura 10.11: Un ejemplo donde uno de los cuchillos se vuelve despreciable ($r=[10000\ 5000\ 10000]$, $h=[0\ 0]$ y $f=100$ Mhz).

lo tanto cuando el b asociado a algún cuchillo es negativo, habrá que verificar que el método sea confiable. El algoritmo diseñado es el siguiente:

1. Se calcula el valor de la integral mediante el método RQMC ya comentado.
2. Se construye un intervalo de confianza para la media con las distintas estimaciones obtenidas en el paso anterior, con determinado nivel de confianza (por ejemplo,

95 %).

3. Considerando que el radio del intervalo de confianza es una medida de la incertidumbre sobre el valor de la media (es decir, lo que se desea estimar), si dicho radio es mayor que un porcentaje arbitrario de la media (por ejemplo, 10 %), entonces se determina cuál es el cuchillo de menor importancia (menor b), se quita del perfil y se vuelve al paso 1 con este nuevo perfil.

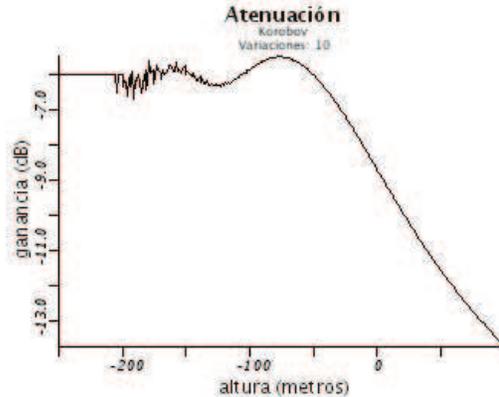


Figura 10.12: Un ejemplo donde uno de los cuchillos se vuelve despreciable y se aplica el algoritmo ($r=[10000\ 5000\ 10000]$, $h=[0\ 0\ 0]$ y $f=100$ Mhz).

Este algoritmo en la práctica ha funcionado satisfactoriamente. Aunque hay valores que se fijan muy “artesanalmente” (por ejemplo el margen sobre la media y el nivel de confianza), se han encontrado valores que por lo general funcionan (comparar, como ejemplo, figura 10.13 con la que aparece en [50]).

Otras técnicas más estrictas desde el punto de vista matemático podrían haber sido utilizadas. Por ejemplo, se podría haber hecho un test de hipótesis sobre la media para verificar que sea la correcta. Esto es, se realiza una primera tirada de estimaciones con el método RQMC con la cual se construye el intervalo de confianza, luego se realiza otra tirada distinta y se verifica que esta nueva media esté dentro del intervalo de confianza. Esto es más correcto que lo realizado, pero tiene dos inconvenientes. El primero y más importante es que toma más tiempo pues hay que realizar dos tiradas del método RQMC. El otro problema surge cuando la integral converge al valor correcto en todas las tiradas, en cuyo caso el intervalo de confianza queda muy pequeño y es muy difícil que la nueva media también esté en dicho intervalo. O sea, descarta cuchillos cuando debería finalizar.

Por lo tanto, los parámetros que definen el término L_{msd_Vogler} (ver la fórmula que aparece en la sección 5.4) son el nivel de confianza del test de hipótesis, el máximo margen de error en porcentaje de la media y la cantidad de repeticiones que se desea hacer del método RQMC. Además, para acelerar los cálculos se agrega una cantidad de cuchillos máxima a ser considerada.

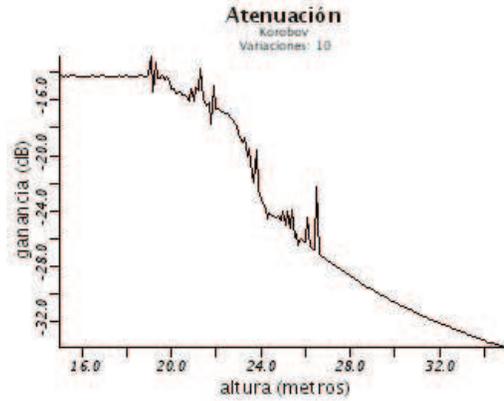


Figura 10.13: Ejemplo con la siguiente configuración: $r = [15 \ 15 \ 10 \ 10 \ 15 \ 15]$, $h = [20 \ 20 \ 20 \ 20 \ 20 \ 20]$ y $f=1800$ Mhz).

Para verificar que el método funcione correctamente, se compararon los resultados obtenidos con resoluciones analíticas de la integral de Vogler realizadas por él mismo en casos particulares sencillos (tres cuchillos alineados con el transmisor y el receptor con distancias entre ellos variable). Los resultados pueden verse en la figura 10.14, donde se pueden apreciar que el error es despreciable en todos los casos.

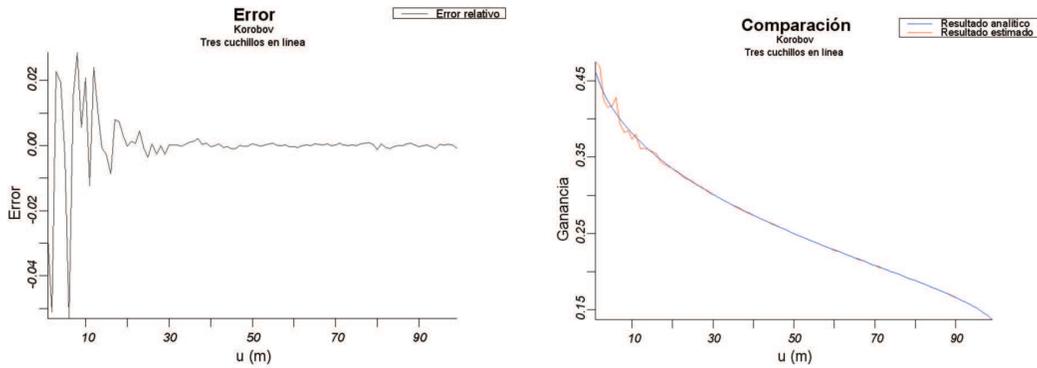


Figura 10.14: Comparación entre analítica y estimación con $r=[100-u, u, u, 100-u]$

10.9. Algoritmo de búsqueda del perfil

Como se vio en la sección 5.4 es necesario encontrar el perfil de alturas dada la ubicación del móvil y la base, y la disposición y forma de las edificaciones presentes. Se entiende por perfil a un conjunto de pantallas (semiplanos) paralelas entre el transmisor y el receptor. Por lo tanto, éste queda completamente definido por la altura de cada

elemento del perfil (que incluye además de las pantallas, el receptor y el transmisor) y la distancia entre ellos (ver la figura 4.6 en la sección 4.3.1). Con dicho perfil se calculará la integral de Vogler (sección 4.3.1) y se estimará el parámetro b del modelo de Walfisch-Ikegami (sección 5.3) y MOPEM (sección 5.3.3).

Los edificios que serán tomados en cuenta para el perfil serán únicamente aquellos que tengan alguna influencia no despreciable en la atenuación, es decir, estén a menos de un determinado porcentaje del primer radio de Fresnel de la línea que une el transmisor y el receptor. Si se quieren únicamente aquellas edificaciones que estén a menos del $p\%$ del primer radio de Fresnel, se debe multiplicar el radio de la primera elipsoide de Fresnel por el factor $(\frac{p}{100})^2$ y hallar la elipsoide con este nuevo radio. Esto se deduce fácilmente de las siguientes ecuaciones:

$$r_1 = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} = \sqrt{\frac{2r d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

$$\Rightarrow \frac{p}{100} r_1 = \sqrt{\frac{2r (\frac{p}{100})^2 d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

donde r es el radio de la primera elipsoide de Fresnel.

Está claro que la altura de un elemento del perfil coincidirá con su altura relativa respecto al terreno más la altura de dicho terreno. Por lo tanto, identificados los elementos del perfil y sus alturas, resta asignarles una posición dentro del mismo.

No existe consenso sobre como asignar posiciones dentro del perfil. Por ejemplo, es muy utilizado ubicar la pantalla en el centro del edificio [51]. Esta puede no ser la ubicación más representativa, ya que puede suceder que sea una de las esquinas del edificio la que intersectó al elipsoide. Tratando de evitar estos casos, el algoritmo adoptado fue el siguiente. En la búsqueda de aquellos edificios que intersectan en la primera elipsoide de Fresnel reducida, se pueden hallar cuáles paredes del mismo son las que intersectan al elipsoide. Se tomará el punto de la recta que une el transmisor y el receptor que esté más cercano a dichas paredes y se promediarán coordenada a coordenada. El resultado del promedio, será el punto que se tome para ubicar la pantalla en el perfil.

Capítulo 11

Ejemplos de aplicación

Habiéndose detallado las funcionalidades de SAPO y los conceptos teóricos de planificación celular que permiten entender sus posibles aplicaciones, se mostrarán a continuación algunos ejemplos prácticos de utilización de la herramienta.

Se analizarán en primer lugar las variantes que podrá manejar el usuario en el momento de correr una predicción y qué efecto tendrán éstas sobre los valores de potencia mediana de señal resultantes. Para ello se considerará únicamente la capa de alturas del terreno y se mostrarán los resultados obtenidos al realizar predicciones con más de una antena (cobertura, interferencia, etc), al variar los parámetros de una antena (potencia, tilt, azimut, etc) y al variar los modelos de propagación más elementales. Luego, se considerará una zona de estudio de mayor complejidad, donde se tomarán en cuenta además de la capa de alturas, las manzanas y las edificaciones, de forma de ilustrar algunas de las potencialidades de SAPO.

11.1. Cálculos asociados a una predicción

Como primer ejemplo de aplicación se considerarán dos radiobases con antenas isotrópicas ubicadas geográficamente en distintos sitios de una superficie ondulada. En la práctica, este escenario correspondería a una zona rural dada la ausencia de edificaciones y calles.

En la figura 11.1 se muestra el resultado de una predicción al asociarle a ambas antenas el modelo de Okumura-Hata COST231 (considerando alturas efectivas) con una frecuencia de transmisión de 900 MHz. Observando dicha figura y tomando en consideración los parámetros involucrados en el cálculo de la pérdida de camino del modelo de Okumura-Hata COST231, se puede verificar que es notoria la dependencia del valor de la potencia mediana de señal con la distancia, con la altura del terreno y con las alturas del transmisor y receptor. La antena ubicada en la figura a la derecha se encuentra a una mayor altura respecto a la otra y esto se refleja en la obtención

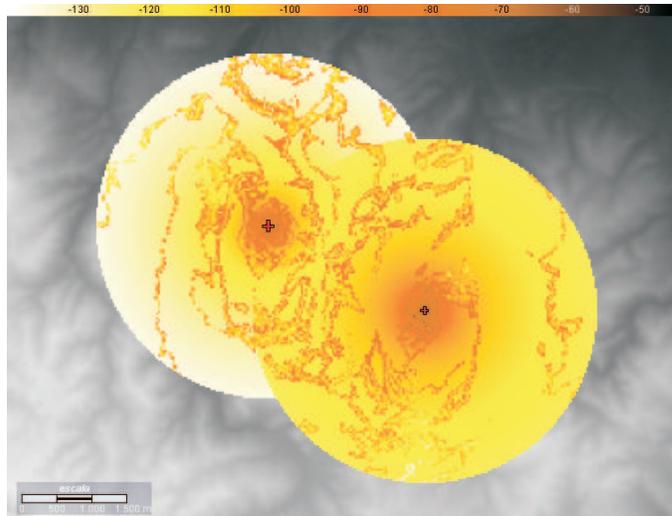


Figura 11.1: Valores de potencia

de mayores valores de señal en la zona de estudio, los cuales decrecen a medida que se alejan de las radiobases. Se puede observar también que en aquellos puntos donde existe intersección entre los radios de cálculo de ambas antenas, el valor de potencia desplegado es el mayor. Un valor aproximado de la potencia puede estimarse al observar la barra superior que muestra la escala en dB.

Como se describió en la sección 7.5, otros cálculos pueden resultar útiles al trabajar con más de una antena, como ser la interferencia co-canal entre ellas o el área de cobertura conformada por la totalidad de las antenas involucradas en la predicción. Tomando el mismo ejemplo que se describió anteriormente, se muestra en la figura 11.2 la CIR resultante entre las dos antenas luego de realizada la predicción.

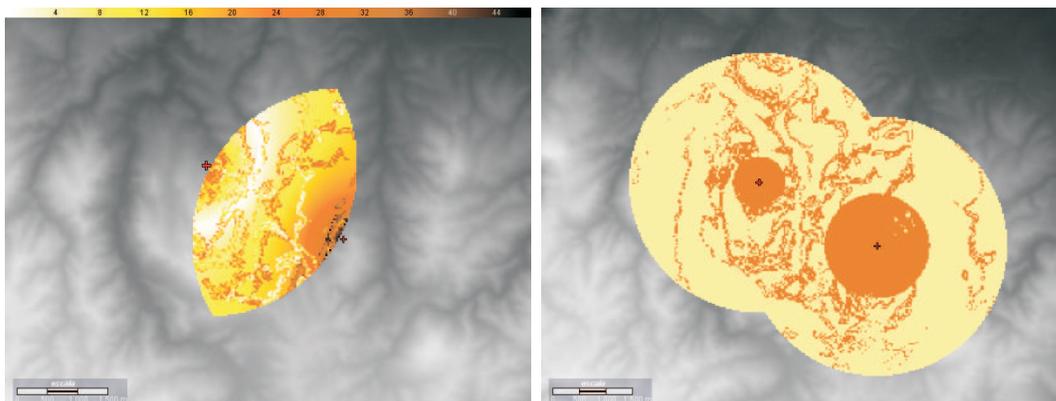


Figura 11.2: CIR y cobertura

En la imagen derecha de la figura 11.2 se despliegan aquellos valores de potencia que quedaron por encima del umbral definido en la sensibilidad del receptor (color naranja) y de acuerdo al valor de C/I mínima definida previamente en el perfil de usuario. A esta región es a lo que se considera área de servicio, y también se despliegan aquellos valores donde se considera que el móvil no captará señal (color amarillo).

11.2. Variación de las características de una antena

También se mencionó en el capítulo 7, que al crear una red celular, el usuario tiene la posibilidad de definir las características de las antenas que la van a conformar. Dentro de estas características se encuentran: la potencia radiada, el tipo de antena (isotrópica o direccional), el canal de frecuencias, el tilt y el azimut. La variación de cualquiera de estos parámetros tendrá un efecto directo en el resultado de la predicción de potencia mediana de señal, lo cual se ilustrará en los ejemplos siguientes.

En primer lugar, tomando una antena del tipo isotrópica y asociándole el modelo de Okumura-Hata, se observa en la figura 11.3 que al aumentar la potencia de la misma (ilustración de la derecha) se obtienen valores de potencia mayores en la zona de estudio luego de realizada la predicción, lo cual se traduce en una mayor cobertura en ausencia de otras antenas interferentes. A su vez, como era de esperarse al tratarse de una antena isotrópica, se observa que la irradiación es homogénea en todas las direcciones.

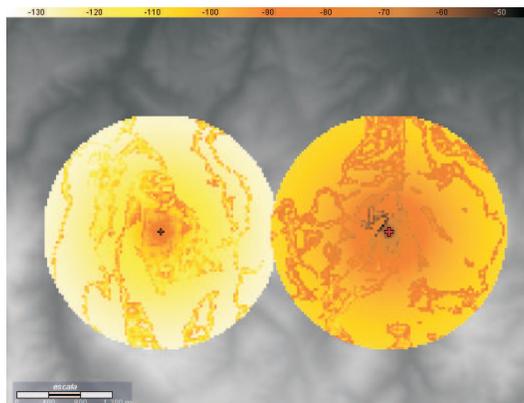


Figura 11.3: Variación de la potencia con una antena isotrópica

En segundo lugar, si se consideran ahora antenas del tipo direccionales y se les asocia el modelo de propagación en vacío, se obtendrán los resultados ilustrados en la figura 11.4. La radiación en este caso deja de ser homogénea y los valores de potencia de señal resultantes son mayores en las direcciones donde la ganancia relativa de la antena es mayor. En este ejemplo, las dos antenas tienen el mismo patrón de radiación, pero distintos valores de tilt y azimut. El efecto del azimut es evidente y el efecto del tilt, que es mayor en la antena a la izquierda, se refleja en una mayor concentración

de la potencia en la proximidad de la misma. En la imagen de la derecha se aprecia la C/I para este caso. La relación frente espalda trae como consecuencia que la C/I en la cercanía de la antena de la derecha sea mucho mayor.

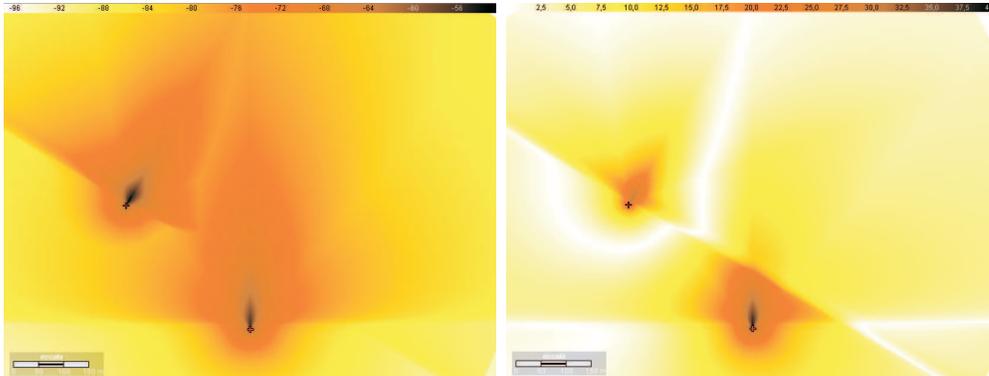


Figura 11.4: Variación del azimut y del tilt en dos antenas direccionales (potencia y C/I)

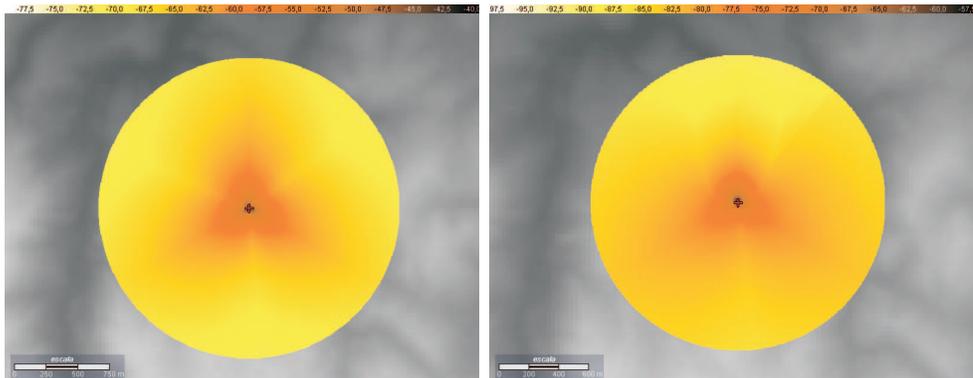


Figura 11.5: Radiobase con tres antenas y modelos distintos

En la figura 11.5 puede verse una predicción con tres antenas directivas ubicadas en la misma radiobase, con las mismas características con la excepción del azimut que vale 0, 120 y 240 grados respectivamente. En la imagen de la izquierda las tres antenas tienen asociado el modelo de vacío, mientras que en la de la derecha se asoció a la antena de azimut 0 grados el modelo de Okumura-Hata para áreas abiertas, a modo ilustrativo de cómo los modelos en una predicción de SAPO pueden variar incluso dentro de una misma radiobase. Puede verse que los resultados cambian levemente, las antenas que conservan el modelo de vacío predominan frente a la otra.

11.3. Variación de los modelos de propagación

Considerando ahora una superficie suavemente ondulada, nuevamente sin la presencia de manzanas ni edificaciones, se efectuará una breve comparación del comportamiento de los modelos disponibles en el software que podrían emplearse en este escenario (modelo de Erceg, tierra plana aproximada, y modelo de Okumura-Hata COST231, sin utilización de alturas efectivas). En la figura 11.6 se muestra el resultado de las predicciones al implementar dichos modelos, mientras que en la figura 11.7 se realiza una comparación de los mismos con el modelo de propagación en espacio libre en un set de medidas particular. De las gráficas comparativas se puede deducir, como era predecible, que la atenuación en casos reales, donde influyen además de la frecuencia y la distancia, otros factores como las alturas del transmisor y receptor, siempre es mayor a la que predice el modelo de propagación en espacio libre. En el caso del modelo de aproximación a tierra plana, se puede apreciar que la potencia predicha cerca de la radiobase es mayor que para el de vacío. Esto es debido a que dicho modelo no toma en cuenta la frecuencia, que en este caso es un factor muy importante en la atenuación.

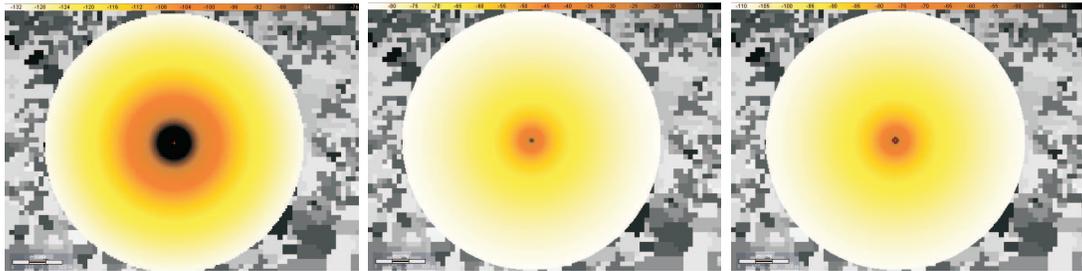


Figura 11.6: Valores de potencia mediana de señal. (a)Erceg (b)Tierra Plana (aproximación) (c)Okumura-Hata COST231

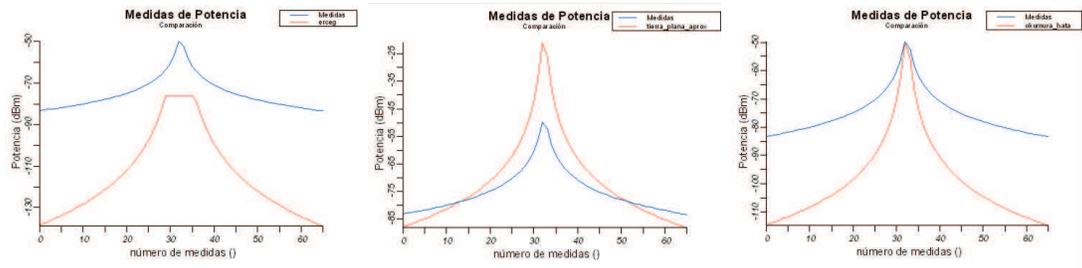


Figura 11.7: Comparación de modelos con propagación en espacio libre. (a)Erceg (b)Tierra Plana (aproximación) (c)Okumura-Hata COST231

Considerando el mismo terreno, pero esta vez tomando en cuenta la presencia de las manzanas y las edificaciones, se muestra en la figura 11.8 una predicción a modo de ejemplo, que involucra tres antenas diferentes, algunas de ellas sobre edificaciones. Los

modelos utilizados son Okumura-Hata-COST231, Erceg y Walfisch-Ikegami.



Figura 11.8: Ejemplo de una predicción con varios modelos en un entorno urbano

11.4. Verificación de línea de vista

Como se describió en la sección 7.5, otra funcionalidad disponible en la herramienta de software es la de determinar aquellos puntos donde existe línea de vista entre la radiobase y el móvil en caso de disponer de datos de edificaciones. Esto puede observarse en la figura 11.9, donde se identifican con color naranja los puntos que cumplen con la condición. La antena se encuentra en el sitio donde está la cruz, a 12 m de altura sobre el edificio.

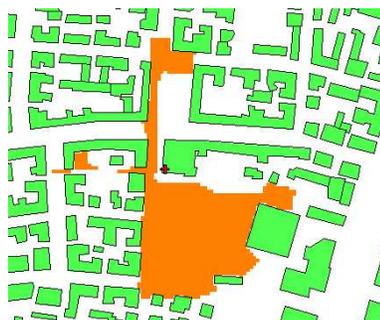


Figura 11.9: Verificación de línea de vista

Parte IV

Validación y Conclusiones

Capítulo 12

Validación

Toda herramienta, al finalizarse las distintas etapas de su desarrollo, debe ser evaluada en su performance o calidad, de forma tal de asegurar el correcto funcionamiento de la misma. En el caso de una herramienta de software, usualmente se comparan en las mismas condiciones, los resultados que arroja con aquellos de programas que tengan las mismas funcionalidades. En este caso, como se explicó en la sección 1.1, las herramientas de software con funcionalidades similares a SAPO son de costos muy elevados, únicamente las poseen operadores de telefonía celular y no es fácil lograr que accedan a que el software sea utilizado por terceros. Otra posibilidad es la de utilizar una versión de prueba sin costo de dichos softwares. De las herramientas mencionadas en la sección 1.1, únicamente AWE Communications ofrece una versión de prueba de su programa ProMan [2]. El problema es que incluye únicamente dos de los modelos implementados en SAPO (Okumura-Hata-Cost231 y Walfisch-Ikegami), y además de forma distinta. Por ejemplo, el modelo de Walfisch-Ikegami no toma en cuenta la orientación de las calles.

El grupo de proyecto gestionó y realizó una pequeña pasantía en ANCEL en la cual le fue permitido manejar el software que ellos utilizan, pero lamentablemente no fue posible obtener datos de predicciones y su topografía asociada para poder compararlas con los resultados de SAPO. De todas formas, la experiencia fue enriquecedora pues al usar dicho software se obtuvieron muchas ideas, tomando sus mejores aspectos y mejorando sus limitaciones. Las carencias más importantes que se encontraron fueron la imposibilidad de utilizar más de un modelo al realizar una predicción con varias antenas y la no consideración de datos topográficos como el trazado de las manzanas.

En el presente proyecto se optó por utilizar otro posible método de validación que consiste en contrastar lo predicho por SAPO contra medidas reales. Aunque es más difícil saber si atribuirle el error al software o al modelo de propagación aplicado, existen referencias que ayudarán a distinguir entre estos casos, como se verá más adelante.

12.1. Obtención de las medidas reales

El grupo de trabajo COST 231, durante la revisión de los modelos desarrollados, llevó a cabo un conjunto de medidas de atenuación en parte del centro de Munich, Alemania. Dichas medidas fueron usadas en el reporte final para medir la exactitud de algunos de los modelos desarrollados y otros del tipo *ray-tracing* a manera de contraste. Para que la comunidad científica tenga la oportunidad de comparar sus propios modelos contra medidas reales sin tener la necesidad de realizar una costosa (tanto en tiempo como en dinero) campaña de medidas, las hizo disponibles en una página web, en conjunto con los datos topográficos correspondientes a la zona [52].

Los datos se encuentran en formato ASCII y están separados en tres secciones. La primera contiene la información de la altura y disposición de cada edificio, así como la altura del terreno subyacente al mismo. La segunda contiene las coordenadas de los puntos donde se realizaron las medidas de atenuación, cada uno con un identificador, y la última contiene la medida de atenuación en cada coordenada. Es decir, no se cuenta con la información de cota del terreno en toda la zona ni de disposición de las manzanas en forma directa.

Para hallar la cota del terreno en todo punto, es necesario asignar un valor de altura en aquellos puntos donde no haya edificaciones. La convención en GeoTools es que el valor asignado en la grilla corresponde con el valor en el centro del rectángulo, por lo que se decidió asignar el valor de altura correspondiente al edificio más cercano a dicho punto. Aunque se podrían haber realizado algoritmos más sofisticados (como interpolar valores), la distancia entre cualquier punto y algún edificio es siempre lo suficientemente pequeña para que la diferencia entre ambos sea despreciable. En la construcción del trazado de las manzanas se utilizó un método simple pero efectivo; una vez visualizados los edificios era a simple vista evidente la disposición de las manzanas, por lo que simplemente se construyó a mano. Algoritmos más complicados, pero automáticos, hubiesen podido utilizarse, pero el tiempo que consumiría tanto implementarlos, utilizarlos como validarlos sería mucho mayor que el que llevó este método “artesanal”.

Las medidas se tomaron en tres recorridos distintos, identificados como *route00* (970 puntos), *route01* (355 puntos) y *route02* (1031 puntos). El resultado de la construcción de los datos topográficos, así como los tres caminos pueden apreciarse en la figura 12.1. Curvas con los valores de las medidas se pueden apreciar en la figura 12.2, donde se muestra la atenuación en función de cada coordenada, siguiendo el sentido del recorrido.

Existen además comparaciones entre los modelos analizados en el informe de COST231 [16] y estas medidas. El mismo contiene una tabla con la varianza y media del error en la predicción de los distintos modelos, así como gráficas comparativas entre las distintas predicciones y las medidas reales. En particular están revisados el modelo de Walfisch-Ikegami (sección 5.3) y el modelo Uni-Valencia [53][54][55] basado en el trabajo de Saunders y Bonar [47] que utiliza el método de Vogler para estimar la difracción por múltiples cuchillos.

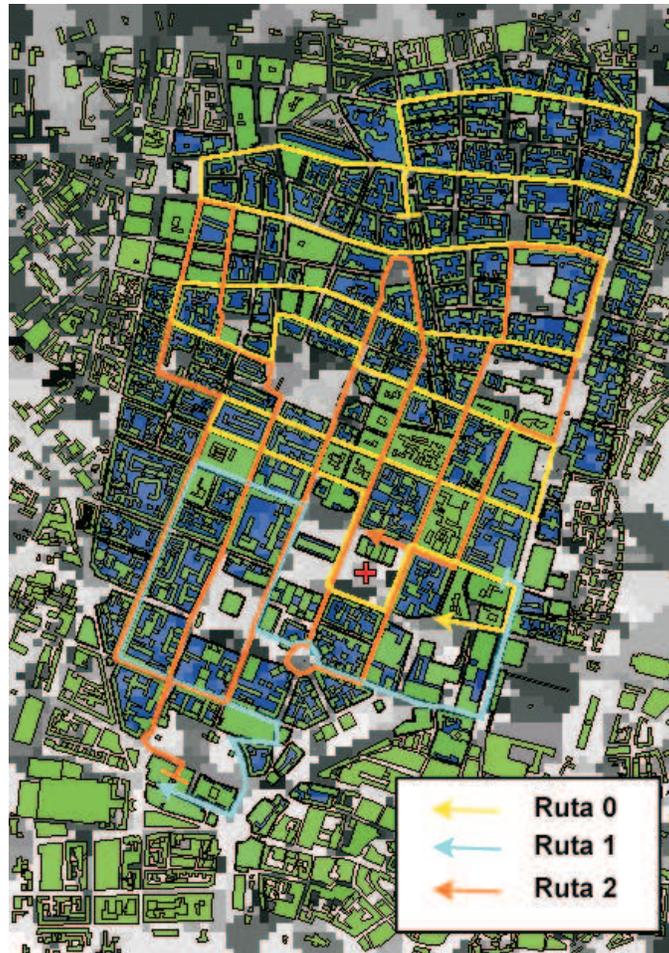


Figura 12.1: El entorno donde se realizaron las medidas y los tres recorridos

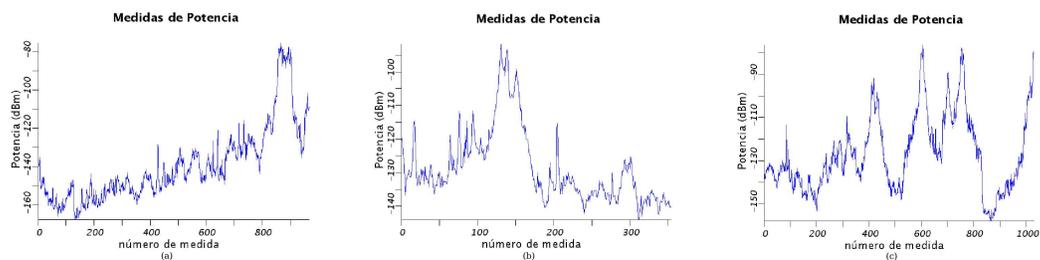


Figura 12.2: Las medidas de las distintas rutas. (a)route00 (b)route01 (c)route02

12.2. Breve descripción del entorno y las medidas

Los datos cubren un un área total de 2400 m x 3400 m. La altura del terreno va desde 505 m hasta 521 m con una media de 514 m y la altura de las edificaciones varía desde 1m hasta 99 m con una media de 19 m. Es decir, hay una gran variabilidad en la altura de los obstáculos, aunque el terreno se puede considerar llano. En la zona de los recorridos, el trazado de las manzanas es bastante regular.

El transmisor se encuentra en las coordenadas (1281.36, 1381.27) (la cruz roja en la figura 12.1), donde el origen se encuentra en la esquina inferior izquierda y las unidades son metros. La altura del mismo sobre el terreno subyacente es de 13 m (es decir, se encuentra por debajo de las edificaciones circundantes) y cuenta con una antena isotrópica que transmite a 947 MHz. Por último, el receptor también cuenta con una antena isotrópica y tiene una altura relativa de 1.5 m.

Los puntos donde se tomaron las medidas se encuentran separados en su mayoría 13m aproximadamente y la atenuación se obtuvo de hacer la media por sector en un área de aproximadamente 10 m [16]. Como se puede ver en las curvas de la figura 12.2 es bastante claro cuáles medidas corresponden a la zona donde existe línea de vista entre el receptor y el transmisor, que coinciden con los picos en la potencia de recepción. Todas las rutas tienen alguna parte con línea de vista, aunque la ruta 2 tiene más de una.

12.3. Performance de los modelos

En esta sección se analizará la performance de los modelos implementados en el software en las distintas rutas. Se intentará verificar el correcto funcionamiento de SA-PO comparando sus resultados contra referencias de los propios autores del modelo o revisiones que se hayan hecho acerca de su exactitud. Los índices utilizados son la media y la desviación estándar de la diferencia entre las medidas reales y las estimaciones. Este último indicador es muy importante, pues el ajuste de un modelo con baja varianza es muy sencillo (simplemente un término independiente), mientras que uno de alta varianza es mucho más complicado. Vale la pena aclarar que modelos sencillos como el de vacío no serán analizados aquí por su inaplicabilidad al entorno.

12.3.1. Okumura-Hata-COST231

El primero y más sencillo de los modelos es el de Okumura-Hata-COST231. Para la comparación se utilizó una implementación con los parámetros por defecto para el caso de ciudad grande, tipo de área urbana, frecuencia menor que 1500 Mhz y sin utilizar alturas efectivas pues el terreno es bastante regular. Si bien el modelo fue diseñado para ser utilizado en macroceldas, donde la altura del transmisor está por encima de los edificios circundantes (al contrario del entorno de estudio), se comparó el modelo

con las medidas reales. Fue una sorpresa encontrar que las predicciones arrojadas por el modelo son similares a las medidas, sobre todo en la ruta 2. Los datos sobre el error para cada ruta se pueden ver en el cuadro 12.1.

Ruta	μ (dB)	σ (dB)
<i>route00</i>	10.32	9.53
<i>route01</i>	4.95	6.74
<i>route02</i>	3.62	8.86

Cuadro 12.1: Media y desviación estándar del error para el modelo de Okumura-Hata-COST231

Si se analiza con mayor detenimiento la comparación, se puede verificar que las predicciones son mejores cuanto más cercano esté el móvil a la base. El modelo, al estar diseñado para radiobases por encima de los edificios, no toma en cuenta la mayor atenuación debida a las edificaciones circundantes a la base más altas que ésta, por lo cual tiende a subestimar las pérdidas. Esto queda más claro si se observa la gráfica comparativa entre las medidas y las predicciones en el camino 0 (ver figura 12.3). Se puede apreciar como al comienzo, cuando la cantidad de edificaciones entre el móvil y la base es mayor, la subestimación es mayor que sobre el final (salvo en aquellos puntos correspondientes a la zona con línea de vista), donde las edificaciones son menos y por lo tanto la atenuación en ese sentido es menor y la predicción más precisa.

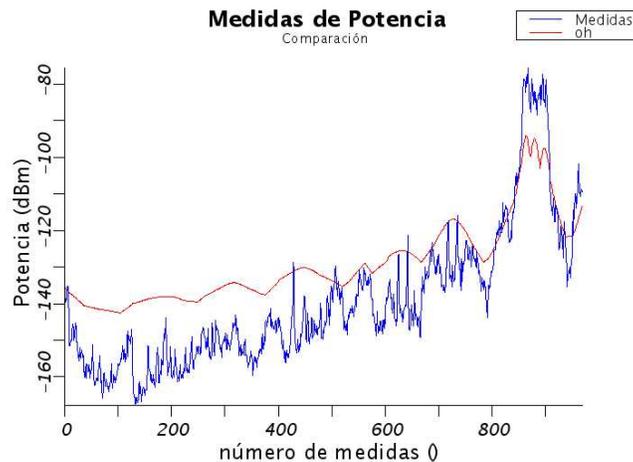


Figura 12.3: Comparación entre las medidas y las estimaciones para la ruta 0 del modelo Okumura-Hata-COST231

12.3.2. Erceg-SUI

También se aplicó el modelo de Erceg en la zona de estudio como parte del proceso de prueba y validación de SAPO. Si bien el modelo fue desarrollado para entornos

suburbanos puede ser también aplicado en entornos urbanos, como ya se mencionó en 5.2. El mismo incluye el caso en que la altura de la radiobase es baja, por lo cual en ese aspecto se estaría dentro de las hipótesis, aunque la altura del móvil se encuentra por debajo del rango recomendado para el modelo.

Los datos de media y varianza del error obtenido de comparar los resultados con las medidas para los parámetros por defecto de las zonas A y B pueden verse en la tabla 12.2. En los parámetros aleatorios del modelo se usó un factor de seguridad de 1.

Ruta	cat. A		cat. B	
	μ (dB)	σ (dB)	μ (dB)	σ (dB)
<i>route00</i>	-0.78	6.24	0.07	6.26
<i>route01</i>	-2.69	5.70	-1.92	5.71
<i>route02</i>	-3.92	6.37	-3.15	6.37

Cuadro 12.2: Media y desviación estándar del error para el modelo de Erceg

Se obtuvieron resultados muy favorables (mejores que en el caso de Okumura-Hata); se lograron errores con menor varianza con los parámetros del tipo de terreno A, que es el que modela las condiciones menos favorables para la propagación. Cabe destacar que los tiempos de ejecución de los cálculos para este modelo son muy cortos dada la simplicidad de su implementación. Esto lo hace un modelo muy efectivo, ya que el compromiso exactitud-tiempo es muchas veces difícil de equilibrar. En la gráfica comparativa de la figura 12.4 puede verse los resultados para la ruta 1 con tipo de terreno A. Se aprecia cómo la predicción ajusta muy bien a las medidas, pero no acompaña las pequeñas variaciones de las mismas; esto es porque el modelo no toma en cuenta la altura del terreno (considera alturas relativas) ni los edificios.

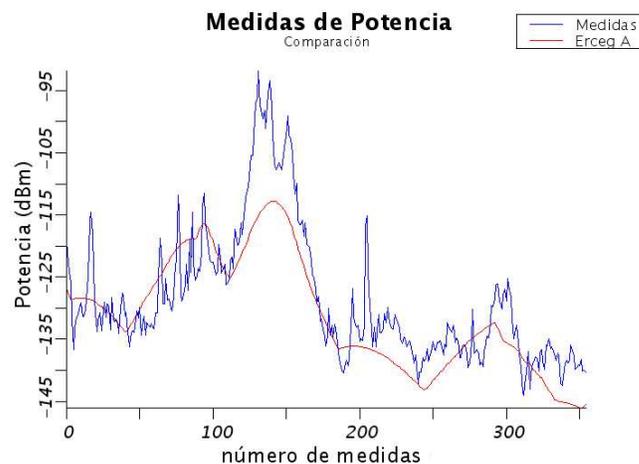


Figura 12.4: Comparación entre las medidas y las estimaciones para la ruta 1 del modelo de Erceg

Lamentablemente no se cuenta con reportes de otras fuentes de resultados de la aplicación de este modelo en la zona de Munich. Solamente a fin de tener una vaga idea de cómo puede ser su performance en una región urbana y verificar que no sea muy diferente a la obtenida, se consultó un trabajo de investigación [19] en donde se presentan resultados de aplicar el modelo en Cambridge, UK, con los parámetros de la zona tipo B a una frecuencia de 3.56 GHz. Allí se obtuvo un error de media 4.2 y varianza 10.1, valores del orden de los obtenidos por SAPO con los datos de Munich.

12.3.3. COST231-Walfisch-Ikegami

El siguiente modelo a analizar es el de Walfisch-Ikegami. A diferencia del modelo de Okumura-Hata-Cost231, este modelo sí incluye correcciones para tomar en cuenta el caso en que la antena transmisora se encuentre por debajo de las edificaciones circundantes. De todas formas, en el informe de COST231 se advierte acerca de la inexactitud del modelo en dicho caso, y si además se toma en cuenta que fue diseñado para altura de edificaciones regular, es de esperar que la predicción no sea la más exacta. Los resultados para una implementación del modelo con los parámetros por defecto para el caso de centro metropolitano se pueden apreciar en el cuadro 12.3. Para una mejor evaluación del error cometido por el modelo, se puede apreciar en la figura 12.5 la comparación entre las medidas y la estimación para el caso de la ruta 2.

Ruta	μ (dB)	σ (dB)
<i>route00</i>	-2.16	9.06
<i>route01</i>	-7.48	9.67
<i>route02</i>	-6.02	10.91

Cuadro 12.3: Media y desviación estándar del error para el modelo de Walfisch-Ikegami

Comparando lo obtenido con los resultados del modelo de Okumura-Hata-COST231, en cuanto a la media se mejora en la primera ruta, aunque en las dos siguientes es mayor en valor absoluto. Esto se explica por el hecho que el modelo de Okumura en algunas secciones de dichos caminos subestima la pérdida y en otros la sobreestima. Esto hace que el error se compense y resulte menor en esos caminos, y en el caso del camino 0, donde siempre subestima (ver figura 12.3), el error medio es mucho mayor. Si se hace este análisis con el valor absoluto del error en cada punto, la media en la ruta 0 sigue siendo mejor con el modelo de Walfisch-Ikegami y en el resto de las rutas son muy similares.

En cuanto a la varianza, el modelo de Walfisch-Ikegami tiene una performance apenas mejor en el camino 0 y algo peor en el resto. Esto es debido al hecho que depende no sólo de la distancia, sino del ancho y orientación de la calle, alto de los edificios y separación entre los mismos. Estos parámetros se calculan en cada punto con los algoritmos ya comentados (ver el capítulo 10) y puede que varíen de un punto a otro.

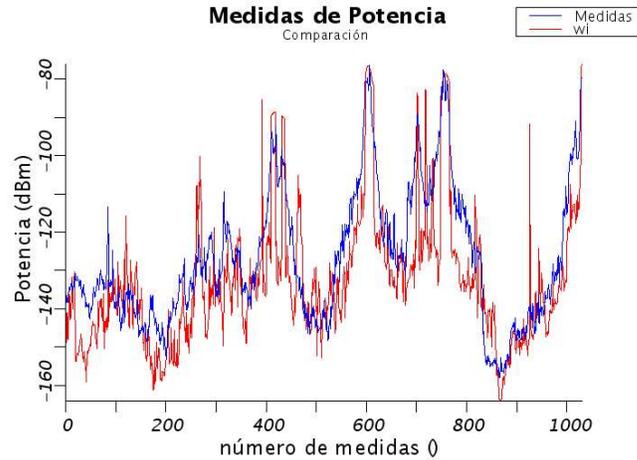


Figura 12.5: Comparación entre las medidas y las estimaciones para la ruta 2 del modelo de Walfisch-Ikegami

En el informe final de COST231 [16] se presentan valores de la media y la varianza del error cometido por este modelo para las tres rutas, así como gráficas comparativas. Sin embargo, el modelo que se utilizó para las comparaciones difiere en el utilizado en SAPO pues supone valores constantes para el ancho de calles, separación entre edificios y altura de los mismos en todos los puntos (altura de edificios 20 m, ancho de calles 13 m y separación entre edificios 26 m). Además, no verifica la existencia de línea de vista y supone que el terreno es de altura constante. Por ello, para la validación del modelo se incluyó en el software otra versión del mismo que mantiene los parámetros topográficos fijos. En la tabla 12.4 se puede apreciar como la media resultó muy similar en todos los casos, aunque la varianza resulta un poco mayor en las predicciones de SAPO que las que aparecen en el informe. Esto es debido a dos factores principalmente: SAPO toma en cuenta la altura del terreno y también toma en cuenta la existencia de línea de vista.

Ruta	μ_{SAPO} (dB)	σ_{SAPO} (dB)	$\mu_{COST231}$	$\sigma_{COST231}$
<i>route00</i>	-8.97	8.99	-10.8	7.7
<i>route01</i>	-15.94	8.02	-15.4	5.9
<i>route02</i>	-15.39	9.54	-16.3	7.3

Cuadro 12.4: Media y desviación estándar del error para el modelo de Walfisch-Ikegami según SAPO y y el informe de la COST231

Además, las gráficas comparativas entre las medidas reales y lo obtenido según el modelo que aparecen en el informe son muy similares a las gráficas de la figura 12.6. Los datos exactos de la predicción en cada punto no están disponibles en el informe, por lo que un análisis más detallado de las diferencias no es posible.

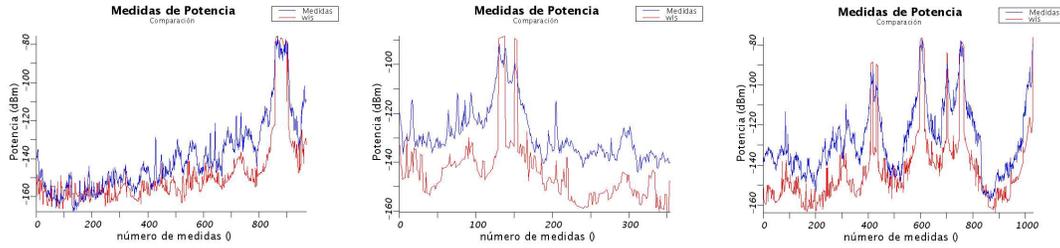


Figura 12.6: Las medidas en las tres rutas y su respectiva estimación según SAPO para el modelo de Walfisch-Ikegami simplificado

Otra conclusión que puede surgir del análisis de esta implementación simplificada del modelo, es que el cálculo de los parámetros topográficos en todos los puntos, aunque aumenta el tiempo que consume realizar una predicción, es un factor importante en la exactitud.

12.3.4. MOPEM

La creación del modelo de propagación para entornos urbanos de pequeños macroceldas (MOPEM) se basó en una zona urbana de Montevideo a una frecuencia en el entorno de 900 MHz, lo cual a priori indicaría similares características al escenario aquí presente en el estudio de propagación en el centro de Munich. Sin embargo, una diferencia no menor es que en el modelo Mopem la altura de la radiobase se considera mayor que las alturas de las edificaciones circundantes, hipótesis que no se cumple siempre en el caso de Munich. De todas formas, se procedió a realizar la comparación con las medidas reales imponiendo que el término en la ecuación de L_{msd} que realiza la diferencia entre la altura de la radiobase y el promedio de las alturas de los edificios circundantes (ver sección 5.3.3) sea cero cuando la altura de la radiobase sea menor a éstas.

En la tabla 12.5 se resumen los resultados de la implementación del modelo con los parámetros por defecto en las tres rutas del centro de Munich y para una mejor evaluación del comportamiento se puede visualizar en la figura 12.7 la comparación de la estimación con las medidas reales en la ruta 0. Se observa al igual que en el caso de COST231-WI una sobreestimación de las pérdidas en los trayectos involucrados respecto a las medidas reales. Partiendo de la base que no se está dentro de las hipótesis del modelo (la altura de la radiobase es menor a la de los edificios circundantes), y que tampoco se considera un factor correctivo para estos casos, se puede concluir que los resultados fueron bastante favorables.

Si se compara el comportamiento con los resultados obtenidos con el modelo COST231-WI, en el cual se basa Mopem, se observan valores muy similares en lo que respecta a la varianza, pero una media mayor en el error. Sin embargo, es importante destacar que Mopem, a diferencia de éste, no realiza la distinción entre los casos LOS y NLOS,

Ruta	μ (dB)	σ (dB)
<i>route00</i>	-7.93	9.25
<i>route01</i>	-10.43	9.39
<i>route02</i>	-11.66	10.32

Cuadro 12.5: Media y desviación estándar del error para el modelo de Mopem

lo cual mejoraría los resultados en la presente zona de estudio, aunque se traduciría también en mayores tiempos de cálculo.

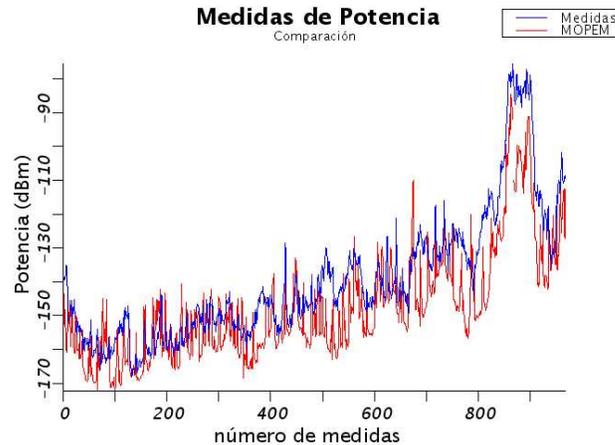


Figura 12.7: Comparación entre las mediciones y las estimaciones para la ruta 0 del modelo de Mopem

Finalmente, tomando como referencia los resultados de aplicar el modelo en la zona donde se ajustó, donde se obtuvo un error de 0 dB y una varianza de 5.1 dB, se observa una diferencia significativa en la media del error mientras que el valor de la varianza no se encuentra tan alejado. Estas diferencias son fácilmente atribuibles a que el entorno del centro de Munich difiere de aquel donde se ajustó el modelo a pesar de tratarse ambos de entornos urbanos, y se le suma a esto el hecho de que la radiobase en el escenario original se encontraba por encima de las edificaciones circundantes.

12.3.5. Vogler-Ikegami

El modelo más complejo es el modelo propuesto que se denominó Vogler-Ikegami. El mismo únicamente hace una suposición y es que el mecanismo dominante de propagación es sobre los techos de los edificios. Esta hipótesis, como se mencionó en la sección 5.4, es inherente a suponer que las edificaciones pueden ser sustituidas por pantallas infinitas, pues se está despreciando la propagación por difracción en los lados de las mismas. Por ello, la atenuación en aquellos casos donde la radiobase esté por debajo de

las edificaciones será sobreestimada, sobre todo en los puntos más cercanos a la misma, pues allí el aporte de la difracción por los lados de las edificaciones es especialmente significativo al total de la potencia.

Para el entorno de estudio, es de esperar que en el funcionamiento “normal” del modelo, la atenuación sea sobreestimada. La implementación utilizada para la validación se realizó con los valores por defecto para los términos debidos a la atenuación desde la última edificación hasta el móvil (los pertenecientes a L_{rts}), y se irán variando los parámetros para el cálculo de la integral de Vogler (ver sección 10.8.2) de manera de ver los efectos que tienen los mismos sobre el resultado de la predicción.

Para comenzar, los parámetros de la integral se asignaron en aquellos valores que dieron buenos resultados en el cálculo de la integral de Vogler (10 repeticiones, 0.95 de margen de seguridad, 10% de tolerancia de error y una cantidad máxima de 8 edificaciones). En este caso, la cantidad de cuchillos despreciados es mínima, por lo tanto, y por lo dicho anteriormente, la pérdida de camino será sobreestimada. Ahora bien, como se puede apreciar en la figura 12.8, la sobreestimación no es mayor cerca de la radiobase que lejos de la misma. De esto se puede concluir que la propagación por difracción en los lados de las edificaciones es importante, tanto en la lejanía de la radiobase como cerca de la misma, en los casos en que la antena se encuentre por debajo de las edificaciones circundantes.

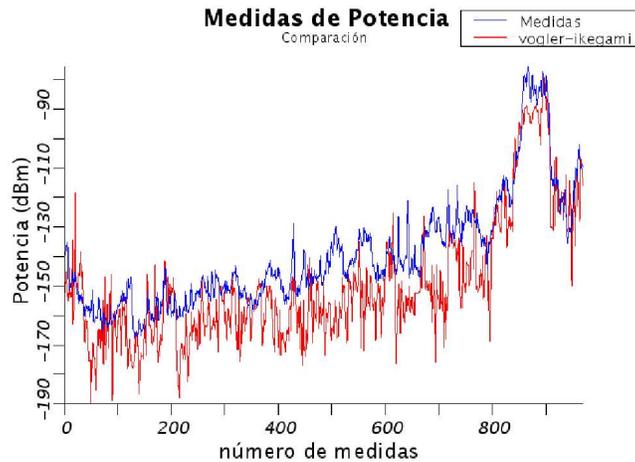


Figura 12.8: Las medidas en la ruta 0 y la predicción según el modelo de Vogler-Ikegami con 0.95 de margen de seguridad y 10% de tolerancia

En la tabla 12.6 se puede apreciar los valores de la media y la varianza del error para esta primera implementación del modelo de Vogler-Ikegami. Por lo dicho, la media resultó alta y negativa. La varianza resultó algo mayor que para los modelos anteriores, en este caso debido a que el cálculo determinístico de la atenuación por difracción en múltiples cuchillos resulta bastante variable de punto a punto.

Ruta	μ (dB)	σ (dB)
<i>route00</i>	-9.99	10.41
<i>route01</i>	-6.78	10.33
<i>route02</i>	-10.16	12.02

Cuadro 12.6: Media y desviación estándar del error para el modelo de Vogler-Ikegami en una implementación inicial

Ahora bien, si asignamos valores de manera que la cantidad de cuchillos considerada sea menor, el resultado mejora. Se puede por ejemplo tomar un margen de seguridad más cercano a uno, combinado con una tolerancia del error menor. Si por ejemplo los asignamos a 0.99 y 1%, el resultado de la predicción mejora tanto en media como en varianza.

Para profundizar aún más la validación de este modelo, se compararon las predicciones realizadas en la implementación con los valores recién mencionados y el modelo Uni-Valencia, que también utiliza el método de Vogler para calcular la atenuación por múltiples cuchillos. Este modelo considera además la propagación por los lados de las edificaciones, aunque en las predicciones que se obtuvieron del mismo [16] no se utilizó esta capacidad, por lo que la comparación entre Vogler-Ikegami y éste es más apropiada. Para la implementación de Vogler-Ikegami ya mencionada, la comparación entre la media y la varianza del error cometido por ambos modelos se puede apreciar en la tabla 12.7. En todos los casos, tanto la media como la varianza son muy similares para ambos modelos. A su vez, en el informe de COST231 [16] también se muestran las gráficas de las predicciones con este modelo, las cuales son muy similares a las que

Ruta	μ_{VI} (dB)	σ_{VI} (dB)	$\mu_{Uni-Valencia}$	$\sigma_{Uni-Valencia}$
<i>route00</i>	0.98	10.73	0.2	8.7
<i>route01</i>	-2.39	8.17	-6.6	7.0
<i>route02</i>	-3.17	10.58	-7.4	10.3

Cuadro 12.7: Media y desviación estándar del error para el modelo de Vogler-Ikegami y Uni-Valencia

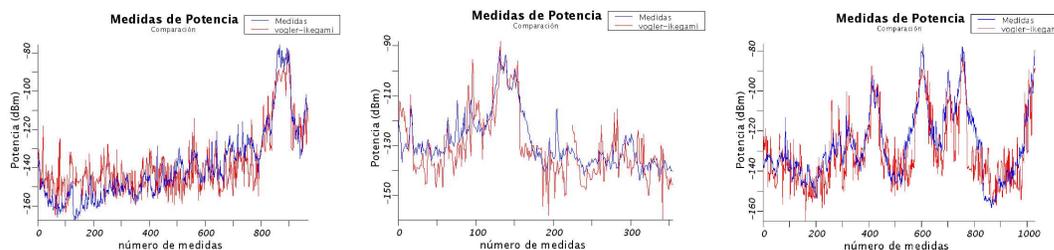


Figura 12.9: Las medidas en las tres rutas y su respectiva estimación según SAPO para el modelo de Vogler-Ikegami con 0.99 de margen de seguridad y 1% de tolerancia

se muestran en la figura (ver figura 12.9).

12.4. Conclusiones de la validación

La conclusión más importante es que, dado que en todos los modelos probados el error se mantuvo dentro de lo razonable, el software es confiable y preciso. En lo que a rapidez se refiere, en los modelos que podrían denominarse “sencillos” (Vacío, Okumura-Hata-Cost231, Erceg, etc.) el cálculo de la predicción es casi instantáneo. En los modelos más complejos (Walfisch-Ikegami, MOPEM o Vogler-Ikegami) los tiempos comienzan a ser un factor negativo, sobre todo en el caso de Vogler-Ikegami, donde la predicción puede llegar a tardar más de una hora. A forma de comparación, en la tabla 12.8 se pueden apreciar para los modelos validados, los valores de media y varianza del error así como el tiempo que tomó realizar la predicción en la ruta correspondiente. Las predicciones se realizaron sobre un equipo con procesador Pentium IV de 2.8GHz, 512MB de RAM, sistema operativo Linux Mandrake 10.0 Official y la versión 1.5.0_03-b07 de Java.

μ (dB)					
	OH	Erceg	WI	MOPEM	VI
<i>route00</i>	10.32	-0.78	-2.16	-7.93	0.98
<i>route01</i>	4.95	-2.69	-7.48	-10.43	-2.39
<i>route02</i>	3.62	-3.92	-6.02	-11.66	-3.17
σ (dB)					
	OH	Erceg	WI	MOPEM	VI
<i>route00</i>	9.53	6.24	9.06	9.25	10.73
<i>route01</i>	6.74	5.70	9.67	9.39	8.17
<i>route02</i>	8.86	6.37	10.91	10.32	10.58
t					
	OH	Erceg	WI	MOPEM	VI
<i>route00</i>	< 0' 1"	~ 0' 1"	2' 20"	3' 50"	50' 00"
<i>route01</i>	< 0' 1"	~ 0' 1"	0' 40"	0' 45"	8' 00"
<i>route02</i>	< 0' 1"	~ 0' 1"	2' 40"	2' 50"	35' 00"

Cuadro 12.8: Media y desviación estándar del error, y tiempo de predicción de SAPO en las tres rutas para los modelos validados

Vale la pena hacer la salvedad de que el entorno de propagación utilizado para la validación no es el que se tuvo en consideración cuando se crearon algunos de los modelos, sobre todo en lo referente al ambiente de microceldas (altura de transmisor por debajo de las edificaciones circundantes). En particular, el único modelo que fue diseñado para radiobases de altura baja fue el de Erceg y esto se vio reflejado en los buenos resultados obtenidos. Si se tuviera que elegir un modelo de propagación para una primera estimación en un entorno genérico, sin duda la opción sería este último,

no solo por su exactitud, sino también por su simplicidad, reflejado esto último en los tiempos de cálculo despreciables.

Por otro lado, características de SAPO como hallar el perfil de alturas, el ancho de las calles y el alto de los edificios en cada punto, resultó en que el modelo de Walfisch-Ikegami hiciera predicciones más exactas que en el caso de suponer valores fijos promedio para los mismos. Esto obviamente tiene un costo en la performance temporal, pues el modelo simplificado demora muy pocos segundos en realizar la predicción en cada ruta.

Por último, el modelo más completo y a la vez más lento en realizar las predicciones es el de Vogler-Ikegami. El entorno óptimo para la evaluación del modelo es de macroceldas, pero lamentablemente no pudieron obtenerse medidas de atenuación con su correspondiente topografía realizadas en dicho escenario. De todas formas, se obtuvieron en la presente validación muy buenos resultados, indicio de que modelo será muy exacto en entornos más propicios.

La cualidad que separa éste del resto de los modelos es que es determinístico, con un fondo teórico que lo respalda. Esto permite hacer un análisis del error desde el punto de vista de la propagación y no únicamente matemático. Es decir, se vio que la falla del modelo estaba en la suposición implícita de que el mecanismo dominante de propagación es sobre los techos de las edificaciones circundantes. Un camino para mejorarlo es agregar un término en el cálculo de la atenuación que tome en cuenta la difracción por los lados de las edificaciones. A su vez, dicha cualidad permite obtener conclusiones acerca de los mecanismos de propagación propiamente dichos. Por ejemplo, la aplicación de este modelo permitió verificar que la propagación por los lados de las edificaciones es importante tanto cerca como lejos de la radiobase.

Capítulo 13

Conclusiones

En el presente proyecto se logró el desarrollo de una herramienta de software precisa que no solo abarca las funcionalidades originalmente planteadas, sino que se fueron implementando nuevas ideas a medida que se avanzaba en el proyecto.

Desde el punto de vista de la ingeniería de software, se destaca la flexibilidad, siendo muy sencilla la implementación de nuevos modelos, el agregado de nuevas funcionalidades o la incorporación de soporte de otros formatos de datos. A su vez, la validación realizada de la misma arrojó resultados positivos, lo que permite garantizar su confiabilidad. Desde el punto de vista funcional, la herramienta es de muy sencillo uso y cuenta con una interfaz gráfica amigable al usuario que proporciona una visualización clara de los datos ingresados y de los resultados obtenidos.

Una ventaja con la que cuenta SAPO con respecto a otros paquetes de software de predicción, es que considera la mayor cantidad posible de información del entorno (altura de terreno, edificaciones y trazado de manzanas) lo que le permite lograr una mayor exactitud en entornos heterogéneos. Esto a su vez se ve reforzado por el hecho de tener la capacidad de asignarle modelos distintos a las diferentes antenas presentes en la red. Los modelos implementados en el software son variados, pudiéndose además crear diferentes implementaciones de un mismo modelo, redefiniendo los parámetros que lo caracterizan. Esto trae como ventaja que todos los escenarios de propagación, desde los más heterogéneos a los más sencillos, pueden ser analizados con la herramienta.

Otro elemento diferenciador de SAPO frente al resto de las herramientas disponibles a nivel comercial, es contar con el modelo Erceg-SUI (modelo reciente y actualmente muy difundido), el modelo MOPEM (resultado de un proyecto de fin de carrera de la UdelaR) y uno propuesto por el grupo de proyecto especialmente diseñado para entornos urbanos de características heterogéneas, denominado Vogler-Ikegami.

SAPO permite estimar la potencia de recepción tomando en cuenta un número arbitrario de antenas a la misma vez y en aquellas zonas donde las predicciones se solapan calcula la interferencia co-canal. Toda esta información es tomada en cuenta al momento de estimar el área de servicio, otra de las funcionalidades disponibles. Los

patrones de radiación de una antena pueden ser definidos por el usuario o importados de un archivo obtenido del fabricante.

Otra facilidad que enriquece al software es la verificación de la existencia de línea de vista entre el móvil y la radiobase en caso de contar con edificios. Los datos de edificaciones son manejados por la herramienta de manera precisa, no solo para esto último, sino también por ejemplo para el cálculo del perfil de alturas entre la radiobase y el móvil.

Una herramienta esencial que le permite al usuario el análisis del error cometido en sus predicciones es la comparación con datos de medidas reales, las cuales se pueden importar de un archivo de texto. El análisis consiste en mostrar el valor de la media y la varianza de la diferencia entre los valores predichos y las medidas y es posible también obtener gráficas comparativas.

Entre las ideas desarrolladas que no estaban en el planteo original del proyecto, que distinguen a SAPO y la hacen una herramienta más completa, se destaca por un lado la posibilidad de crear y editar datos digitales de disposición y forma de edificaciones mediante una interfaz gráfica específica para ello. Por otro lado, se propuso un nuevo modelo de propagación para entornos urbanos, híbrido entre un método determinístico y uno semiempírico, que levanta las hipótesis más restrictivas del modelo de Walfisch-Ikegami. Éstas son la altura de edificaciones homogéneas y la existencia de un gran número de las mismas entre el móvil y la radiobase. El resultado fue que las predicciones realizadas por este modelo son mucho más exactas que las obtenidas con el modelo de Walfisch-Ikegami.

Finalmente, cabe mencionar que la realización del presente proyecto significó un crecimiento personal y académico para sus integrantes. Uno de los principales desafíos fue, en la etapa inicial, tener que hacer un replanteo de los objetivos. Al comienzo, se consideró la posibilidad de tomar medidas de potencia en una zona suburbana del país a fin de obtener un modelo de propagación que se ajuste lo más posible a las mismas y su posterior implementación en software. Se realizaron gestiones con ANCEL para la realización de la campaña de medidas, pero resultaron infructuosas por motivos puramente institucionales. Por ello es que se optó, en lugar del ajuste del modelo, centrar el proyecto en el desarrollo de una herramienta de software más completa. El desafío fue entonces enfrentar un problema amplio y ser capaces de dividirlo en problemas individuales más tratables, a la vez resolviéndolo dentro de un tiempo limitado. Fue fundamental para esto un buen trabajo en equipo, el manejo adecuado de los tiempos y la repartición de tareas, lo cual llevó a un buen término del proyecto.

13.1. Líneas de trabajo futuro

Toda herramienta de software siempre puede ser mejorada y ampliada. En el caso de SAPO existen varios aportes que podrían realizarse en una primera instancia, como los que se listan a continuación:

- Ajuste de modelos de propagación. La interacción del programa con medidas reales se limita únicamente al reporte del error cometido por la predicción de los modelos. El diseño está pensado para que la inclusión de un módulo para el ajuste de parámetros de los modelos con dichas medidas sea sencillo.
- Análisis de fading. SAPO únicamente predice el valor de la media por sector de la potencia de recepción. Un análisis completo incluye un estudio del fading, el cual podría ser incorporado a la herramienta en el futuro.
- Análisis específicos para determinadas tecnologías. La herramienta hasta ahora se limita a un análisis de capa física. Dado el crecimiento del tráfico en las redes celulares de hoy en día, tanto de voz como de datos, sería interesante y útil la inclusión de un módulo de análisis de capacidad de tráfico cursado por la red. También queda abierta la opción de extender el análisis de interferencia co-canal a otros tipos de interferencia más dependiente de la tecnología, como la de canal adyacente.
- Hacer una experimentación más profunda del modelo Vogler-Ikegami. Esto incluye el agregado de un término que tome en cuenta la difracción por los lados de las edificaciones.
- Validar el software en otros entornos, sobre todo el modelo propuesto a fin de comprobar su mayor exactitud.
- Ampliación de las funcionalidades GIS de SAPO. Existen limitantes inherentes a la biblioteca utilizada para el manejo de datos del tipo GIS, como ser la cantidad de formatos de archivo soportados. Una posible solución es migrar a la última distribución estable de GeoTools, lo cual se traduce en un arduo trabajo, pues la gran mayoría de las clases de SAPO deben ser modificadas.
- Mejorar los tiempos de cálculo. JAVA no es el lenguaje más eficiente en cuanto a velocidad de cálculo. Un posible paliativo es implementar algunos de los algoritmos en otros lenguajes más rápidos (como C) y mantener la implementación de la interfaz en JAVA.

Parte V

Anexos

Apéndice A

Intersección de una elipsoide con un plano

En este anexo se hará el desarrollo de cómo hallar la intersección entre una elipsoide alineada con los ejes y un plano cualquiera. Luego se verá cómo utilizar dicho resultado para hallar la intersección entre una elipse de revolución arbitraria y un plano perpendicular al plano xy (que es lo necesario para resolver el problema planteado en la sección 10.7).

La ecuación de una elipsoide alineada con los ejes es:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (\text{A.1})$$

A.1. Verificación de la intersección entre un plano y la elipsoide

El primer paso para hallar la intersección de la elipsoide con un plano arbitrario es verificar que la misma efectivamente exista, para lo cual se deben hacer algunas consideraciones previas.

En general, para cualquier superficie definida por la ecuación $F(x, y, z) = 0$, el plano tangente en el punto $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ perteneciente a la superficie es:

$$\frac{\partial F}{\partial x}(x - \bar{x}) + \frac{\partial F}{\partial y}(y - \bar{y}) + \frac{\partial F}{\partial z}(z - \bar{z}) = 0$$

Donde cada derivada parcial se evalúa en $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$.

Para el caso de una elipsoide ε , $F(x, y, z) = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} - 1$, por lo que el plano tangente resulta:

$$\frac{2\bar{x}(x - \bar{x})}{a^2} + \frac{2\bar{y}(y - \bar{y})}{b^2} + \frac{2\bar{z}(z - \bar{z})}{c^2} = 1$$

Esta ecuación en vista de (A.1), se reduce a:

$$\frac{\bar{x}x}{a^2} + \frac{\bar{y}y}{b^2} + \frac{\bar{z}z}{c^2} = 1 \quad (\text{A.2})$$

Sea un punto $P = (\xi, \eta, \varsigma)$ que se encuentra en el plano tangente definido por (A.2). Por lo tanto, P puede estar fuera o sobre ε ; y si se encuentra fuera la recta que une P con $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ es tangencial a ε en $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$. Sustituyendo en (A.2) resulta:

$$\frac{\bar{x}\xi}{a^2} + \frac{\bar{y}\eta}{b^2} + \frac{\bar{z}\varsigma}{c^2} = 1$$

Por lo tanto, cada recta que pasa por P que es tangencial a ε , la intersecciona en $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$, que además de pertenecer a ε pertenece al plano

$$\frac{\xi x}{a^2} + \frac{\eta y}{b^2} + \frac{\varsigma z}{c^2} = 1 \quad (\text{A.3})$$

que es claro que siempre se intersecciona con ε .

Para cualquier punto P (tanto fuera, sobre o dentro de la elipsoide), se define el *plano polar* a la elipsoide ε tal como aparece en (A.3); el punto P se denomina *polo* de dicho plano. En el caso particular que el polo pertenezca a ε , entonces por (A.2) y (A.3) el plano polar será tangencial a ε en P .

Ahora bien, un plano arbitrario de ecuación

$$lx + my + nz = f \quad (\text{A.4})$$

es el plano polar del punto $P = (\xi, \eta, \varsigma)$, donde la ecuación (A.4) es f veces la ecuación (A.3), por lo que el punto P puede escribirse de la forma:

$$P = (\xi, \eta, \varsigma) = \left(\frac{a^2 l}{f}, \frac{b^2 m}{f}, \frac{c^2 n}{f} \right)$$

El punto P está fuera de ε si y sólo si su plano polar se intersecciona con ε . Por lo tanto, el plano (A.4) intersecciona la ε sí y sólo si:

$$1 < \left(\frac{\xi}{a} \right)^2 + \left(\frac{\eta}{b} \right)^2 + \left(\frac{\varsigma}{c} \right)^2 = \left(\frac{al}{f} \right)^2 + \left(\frac{bm}{f} \right)^2 + \left(\frac{cn}{f} \right)^2$$

En definitiva, el plano (A.4) intersecciona ε , si y sólo si

$$a^2 l^2 + b^2 m^2 + c^2 n^2 > f^2$$

y es tangente a ella sí y sólo sí

$$a^2l^2 + b^2m^2 + n^2c^2 = f^2$$

Pero si dividimos la ecuación (A.4) por $h = \sqrt{l^2 + m^2 + n^2}$ si $f \geq 0$ y en caso contrario por $-h$, el plano pasa a ser igualmente especificado por la ecuación escalada:

$$\lambda x + \mu y + \nu z = h \quad (\text{A.5})$$

donde

$$\lambda = \frac{l}{k}, \quad \mu = \frac{m}{k}, \quad \nu = \frac{n}{k}, \quad h = \frac{f}{k}$$

De esta forma, h es el largo del vector normal al plano desde el origen, y además dicho vector tiene la dirección del vector unitario (λ, μ, ν) . Ahora el punto P puede volver a ser especificado por:

$$P = (\xi, \eta, \varsigma) = \left(\frac{a^2\lambda}{h}, \frac{b^2\mu}{h}, \frac{c^2\nu}{h} \right)$$

por lo que el plano (A.5) intersecta ε si y sólo si

$$h^2 < a^2\lambda^2 + b^2\mu^2 + c^2\nu^2$$

Ésta es la condición que se utilizó para verificar si un plano normal al vector $h \times (\lambda, \mu, \nu)$ intersecta al elipsoide ε . De ahora en adelante, se supondrá que se trabaja con planos que intersectan la elipsoide.

A.2. Intersección entre una elipsoide y un plano arbitrario

La intersección entre la elipsoide y el plano será una curva que podrá caracterizarse por una ecuación en dos de las coordenadas (por ejemplo, x e y), y la tercera coordenada se podrá despejar de éstas. La ecuación en dos coordenadas será la proyección sobre el plano definido por ambos ejes de coordenadas (por ejemplo, el plano $x - y$) de la curva intersección. Será ésta la curva de interés, por lo que habrá que tener el cuidado de elegir dichas coordenadas de manera tal que la proyección conserve lo más posible la forma original de la curva. Es decir, se debe elegir la tercera coordenada como aquella cuyo eje forme el menor ángulo con la normal al plano; de esta forma, el plano será lo más paralelo posible al plano de las otras dos coordenadas. Para el ejemplo estudiado, supondremos que el eje z es quien forma el menor ángulo con la normal.

Por lo tanto, despejando de (A.5):

$$z = \frac{h - \lambda x - \mu y}{\nu}$$

Sustituyendo en (A.1) resulta la ecuación en $x - y$ de la cónica resultado de la intersección:

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0$$

donde

$$\begin{aligned} A &= \frac{\nu^2 c^2}{a^2} + \lambda^2 & B &= 2\lambda\mu & C &= \frac{\nu^2 c^2}{b^2} + \mu^2 \\ D &= -2h\lambda & E &= -2h\mu & F &= h^2 - \nu^2 c^2 \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

Como A y C son ambas mayores que cero, y dado que todos los puntos de la cónica están en la elipsoide y por lo tanto están acotados, la intersección es necesariamente una elipse.

El centro (v, w) de dicha elipse se puede hallar como la solución del sistema:

$$\begin{cases} 2Av + Bw = -D \\ Bv + 2Cw = -E \end{cases}$$

por lo que:

$$v = \frac{BE - 2CD}{4AC - B^2} \quad w = \frac{BD - 2AE}{4AC - B^2}$$

A.3. Aplicación al problema de línea de vista

Hasta ahora, se ha trabajado con una elipsoide de dimensiones genéricas, aunque alineada con los ejes. El problema original era con una elipse de revolución (es decir, sus dos ejes menores iguales) y orientada arbitrariamente. La primer diferencia simplifica el problema, pues la elipsoide puede rotarse según el eje mayor sin que la misma sufra cambios. Como se verá más adelante, se aprovechó esta propiedad para colocar el plano interseccionante en una posición conveniente. Por el contrario, la segunda diferencia obliga a redefinir el sistema de coordenadas de manera que los dos focos pertenezcan a uno de los ejes, y el centro de la elipsoide sea el origen. Dado que la elipse de revolución puede rotarse según el eje mayor sin que sufra cambios, los otros dos ejes pueden fijarse arbitrariamente. Lo que se hizo, fue colocar uno de ellos paralelo al plano interseccionante (y por ende el otro eje queda fijado), que como se verá simplifica muchísimo la determinación de las dimensiones, y por lo tanto la parametrización de la elipse resultado de la intersección.

Por lo tanto se necesita expresar el plano interseccionante y los puntos que conforman la pared del edificio en este nuevo sistema de coordenadas. Una manera de hacer esto es aplicarle a los puntos las mismas operaciones que llevaron de la elipsoide original a la nueva elipsoide alineada. En la implementación del algoritmo, se alineó el eje mayor de la elipsoide con el eje y (la elección fue completamente arbitraria). Veamos entonces

como llevar una elipsoide de focos (x_1, y_1, z_1) y (x_2, y_2, z_2) a otra con centro en el origen y focos $(0, \hat{y}_1, 0)$ y $(0, \hat{y}_2, 0)$.

El primer paso es trasladar la elipsoide de manera tal que su centro coincida con el origen de coordenadas. Para ello, se halla el centro de la elipsoide:

$$c = (x_0, y_0, z_0) = \left(\frac{x_1 + x_2}{2}, \frac{y_1 + y_2}{2}, \frac{z_1 + z_2}{2} \right)$$

Luego se debe rotar α según el eje z de manera tal que los focos queden dentro del plano $z - y$. α se puede calcular proyectando los polos al plano $x - y$ como (forzando al notación, llamaremos (x_1, y_1, z_1) y (x_2, y_2, z_2) a los focos luego de haber sido trasladados):

$$\alpha = \text{atan} \left(\frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \right)$$

Cualquier rotación puede expresarse como la multiplicación del vector de coordenadas por una matriz. En este caso, el vector resultado de dicha operación es:

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \cos \alpha - y \sin \alpha \\ x \sin \alpha + y \cos \alpha \\ z \end{pmatrix}$$

El tercer paso es rotar β según el eje x de manera que finalmente los focos pertenezcan al eje y . El ángulo β puede obtenerse del resultado de haber rotado los focos:

$$\beta = -\text{atan} \left(\frac{z_2 - z_1}{(x_2 - x_1) \sin \alpha + (y_2 - y_1) \cos \alpha} \right)$$

Nuevamente, obtengamos el resultado de dicha rotación sobre el vector recién obtenido:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \cos \alpha - y \sin \alpha \\ x \sin \alpha + y \cos \alpha \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \cos \alpha - y \sin \alpha \\ (x \sin \alpha + y \cos \alpha) \cos \beta - z \sin \beta \\ (x \sin \alpha + y \cos \alpha) \sin \beta + z \cos \beta \end{pmatrix}$$

Con estas tres transformaciones ya se logra alinear la elipsoide con los ejes. Como se dijo, ahora se puede rotar según el eje y , que la elipsoide no sufriría cambios. Para obtener cuál es el valor más conveniente para la rotación, se obtendrá primeramente el resultado de estas operaciones sobre el plano.

El plano original es aquél que contiene la pared del edificio (o la recta que pasa por una de las bases de dicha pared) y es perpendicular al plano $x - y$. El resultado de trasladar dicho plano, será otro perpendicular al plano $x - y$ pero que contiene a la recta trasladada. La recta original se puede parametrizar como:

$$y = mx + N$$

Y la traslación de dicha recta se puede escribir como:

$$y = mx + N + y_0 - mx_0$$

La traslación en el eje z es ignorada, pues el plano es paralelo a éste. La nueva recta la reescribiremos de la forma:

$$y = mx + n$$

donde: $n = N + y_0 - mx_0$

Cualquier plano puede caracterizarse por el vector normal que parte del origen (salvo el caso particular en que el plano pase por el origen) y para hallar el plano resultante de rotar con centro en el origen el plano original, basta realizar las mismas operaciones sobre dicho vector. En este caso en particular, el vector normal al plano es también el normal a la recta. Por lo tanto, sus coordenadas se pueden hallar resolviendo el siguiente sistema:

$$\begin{cases} y = mx + n \\ y = -\frac{1}{m}x \\ z = 0 \end{cases}$$

Lo que resulta en el vector normal:

$$\left(\frac{-n}{m^2 + 1}m, \frac{n}{m^2 + 1}, 0 \right) = \frac{n}{m^2 + 1}(-m, 1, 0)$$

En el caso particular en que la recta sea paralela al eje y , m tiende a infinito. El vector normal en ese caso resulta:

$$(x + x_0, 0, 0)$$

donde x es la coordenada x de cualquier punto de la pared en cuestión.

Ahora se puede hallar el vector normal del plano rotado según los ángulos ya vistos:

$$\frac{n}{m^2 + 1}(-m \cos \alpha - \sin \alpha, \cos \beta(-m \sin \alpha + \cos \alpha), \sin \beta(-m \sin \alpha + \cos \alpha))$$

Que en el caso particular en que m sea infinito resulta:

$$((x + x_0) \cos \alpha, x \sin \alpha \cos \beta, x \sin \alpha \sin \beta)$$

Pero intersectar este plano con la elipsoide resultaría una elipse demasiado genérica. Lo conveniente es utilizar la rotación según el eje y (que como se vio no afecta la elipsoide) para que el plano quede paralelo a uno de los ejes. En esta implementación en particular, se escogió el eje x arbitrariamente para dicho eje. Veamos entonces

qué ángulo γ debe ser rotado el plano para que el resultado sea paralelo al eje x , o sea, la coordenada x de su vector normal se anule.

$$\begin{aligned} & \frac{n}{m^2 + 1} \begin{pmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -m \cos \alpha - \sin \alpha \\ \cos \beta (-m \sin \alpha + \cos \alpha) \\ \sin \beta (-m \sin \alpha + \cos \alpha) \end{pmatrix} = \\ & = \frac{n}{m^2 + 1} \begin{pmatrix} \cos \gamma (-m \cos \alpha - \sin \alpha) - \sin \gamma \sin \beta (-m \sin \alpha + \cos \alpha) \\ \cos \beta (-m \sin \alpha + \cos \alpha) \\ \sin \gamma (-m \cos \alpha - \sin \alpha) + \cos \gamma \sin \beta (-m \sin \alpha + \cos \alpha) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Para que la primera coordenada se anule, se debe cumplir lo siguiente:

$$\frac{\sin \gamma}{\cos \gamma} = \tan \gamma = \frac{-m \cos \alpha - \sin \alpha}{-m \sin \alpha + \cos \alpha} \frac{1}{\sin \beta}$$

y en el caso que m valga infinito:

$$\tan \gamma = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha \sin \beta}$$

En definitiva, el vector normal al plano resulta:

$$(0, \cos \beta (-m \sin \alpha + \cos \alpha), \sin \gamma (-m \cos \alpha - \sin \alpha) + \cos \gamma \sin \beta (-m \sin \alpha + \cos \alpha)) = (0, j, k)$$

La ecuación de dicho plano resulta:

$$\begin{aligned} & (y - j)j + (z - k)k = 0 \\ & \Rightarrow jy + kz = j^2 + k^2 \\ & \Rightarrow \frac{j}{\sqrt{j^2 + k^2}} y + \frac{k}{\sqrt{j^2 + k^2}} z = \sqrt{j^2 + k^2} \end{aligned}$$

Sustituyendo en la ecuación (A.5) se obtienen los siguientes valores:

$$\lambda = 0, \quad \mu = \frac{j}{\sqrt{j^2 + k^2}}, \quad \nu = \frac{k}{\sqrt{j^2 + k^2}}, \quad h = \sqrt{j^2 + k^2}$$

La ecuación de la elipse de revolución con su eje mayor alineado al eje y es:

$$\frac{x^2}{b^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1$$

Supongamos que la normal forma el menor ángulo con el eje z (o sea, que $\text{abs}\left(\frac{j}{k}\right) <$

1). Sustituyendo en (A.6) resulta:

$$\begin{aligned} A &= \nu \frac{b^2}{b^2} + \lambda^2 = \frac{k^2}{j^2 + k^2} & B &= 0 & C &= \nu^2 \frac{b^2}{a^2} + \mu^2 = \frac{k^2}{j^2 + k^2} \frac{b^2}{a^2} + \frac{j^2}{j^2 + k^2} \\ D &= 0 & E &= -2h\mu = -2j & F &= h^2 - \nu^2 b^2 = j^2 + k^2 - \frac{k^2}{j^2 + k^2} b^2 \end{aligned}$$

Para el caso que la normal forme el menor ángulo con el eje y , las cuentas resultan bastante similares, por lo que no vale la pena reproducirlas aquí. De todas formas, $B = 0$ y $D = 0$ por lo que lo formulado de aquí en adelante es exactamente igual para ese caso, sustituyendo la variable y por z .

Por lo tanto la ecuación de la elipsoide se reduce a:

$$Ax^2 + Cy^2 + Ey + F = 0$$

con centro en $(0, \frac{-E}{2C})$. Esta es la ecuación de una elipse con uno de sus ejes alineado con el eje y . Para encontrar el largo de los ejes hace falta resolver las siguientes dos ecuaciones:

$$\begin{aligned} x = 0 &\Rightarrow Cy^2 + Ey + F = 0 \Rightarrow b_E = y + \frac{E}{2C} = \frac{\sqrt{E^2 - 4CF}}{2C} \\ y = -\frac{E}{2C} &\Rightarrow Ax^2 + C\frac{E^2}{4C^2} - E\frac{E}{2C} + F = 0 \Rightarrow Ax^2 - \frac{E^2}{4C} - F \\ &\Rightarrow a_E = x = \sqrt{\frac{1}{A} \left(\frac{E^2}{4C} - F \right)} \end{aligned}$$

Por lo que ya se puede parametrizar la elipse resultado de la intersección como:

$$\begin{cases} x = a_E \sin(t) \\ y = -\frac{E}{2C} + b_E \cos(t) \\ t \in [0, 2\pi) \end{cases}$$

Lo que resta hacer es encontrar las coordenadas de un punto arbitrario en esta base, para poder hallar las coordenadas de los vértices de las paredes:

$$\begin{pmatrix} \cos \gamma (\hat{x} \cos \alpha - \hat{y} \sin \alpha) - \sin \gamma [(\hat{x} \sin \alpha + \hat{y} \cos \alpha) \sin \beta + \hat{z} \cos \beta] \\ (\hat{x} \sin \alpha + \hat{y} \cos \alpha) \cos \beta - \hat{z} \sin \beta \\ \sin \gamma (\hat{x} \cos \alpha - \hat{y} \sin \alpha) + \cos \gamma [(\hat{x} \sin \alpha + \hat{y} \cos \alpha) \sin \beta + \hat{z} \cos \beta] \end{pmatrix}$$

donde

$$\hat{x} = x + x_0 \quad \hat{y} = y + y_0 \quad \hat{z} = z + z_0$$

En definitiva, habiendo calculado los parámetros de la elipse de revolución original (a , b y focos), se halla el centro y se calculan α y β . Luego, con cada pared de cada edificio, se halla m y n y con ellos calculamos γ . Después, se encuentran j y k . Dependiendo de la relación entre ellos, se proyecta al plano $x - y$ o al plano $x - z$. Por último, se hallan los parámetros a_E y b_E y el centro de la elipse de intersección en el plano correspondiente. Por último, se halla la proyección de la pared expresada en las nuevas coordenadas sobre el plano correspondiente. Como la pared y la elipse pertenecen al mismo plano, la pared y la elipse se intersectarán si y sólo si se intersectan sus intersecciones. Éste es el algoritmo utilizado para verificar si hay línea de vista.

Bibliografía

- [1] Ericsson TEMS Cellplanner Universal 6.0. http://www.ericsson.com/products/hp/TEMS_Cellplanner_Universal_6_0_pos.shtml [visitada en marzo de 2005].
- [2] AWE Communications ProMan. <http://www.awe-communications.com> [visitada en marzo de 2005].
- [3] Teleworx Xcalibur. <http://www.teleworx.com/produx/xcalibur.html> [visitada en marzo de 2005].
- [4] Expert Wireless Solutions MaXPlan. <http://www.expertwireless.com/prod03.htm> [visitada en marzo de 2005].
- [5] G. Jorcín, A. Jorge y J. Zavodnikoff. “Caracterización del fading en Montevideo”. *Proyecto de fin de carrera, Facultad de Ingeniería, UDELAR*, Julio 2002.
- [6] J.D. Parsons. *The Mobile Radio Propagation Channel*. John Wiley & Sons Ltd, second edition, 2000.
- [7] M. Abramowitz e I. A. Stegun. *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. Dover, New York, ninth dover printing, tenth gpo printing edition, 1964. ISBN 0-486-61272-4.
- [8] K. Bullington. “Radio propagation at frequencies above 30 mc.”. *Proc IRE*, 35(10):1122–1136, 1947.
- [9] J. Epstein y D.W. Peterson. “An experimental study of wave propagation at 850 mc”. *Proc IRE*, 41(5):595–611, 1953.
- [10] J. Deygout. “Multiple knife-edge diffraction of microwaves”. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 14(4):480–489, 1966.
- [11] L. E. Vogler. “An attenuation function for multiple knife-edge diffraction”. *Radio Science*, 17(6):1541–1546, Noviembre-Diciembre 1982.
- [12] L. E. Vogler. “The attenuation of electromagnetic waves by multiple knife-edge diffraction”. *NTIA Rep. 81-86*, 1981.
- [13] K. Furutsu. “On the theory of radio wave propagation over inhomogeneous earth”. *Journal of Research*, 67D(1):39–62, Enero-Febrero 1963.

-
- [14] Y. Okumura, E. Ohmori, T. Kawano y K. Fukuda. "Field strength and its variability in the VHF and UHF land mobile radio service". *Review of the Electrical Communications Laboratory*, 44(1):825–873, Setiembre-Octubre 1968.
- [15] M. Hata. "Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services". *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, 29(3):317–325, Agosto 1980.
- [16] COST 231. "Digital mobile radio towards future generation systems". Technical report, 1999.
- [17] V. Erceg, L.J. Greenstein, S.Y. Tjandra, S.R. Parkoff, A. Gupta, B. Culik, A.A. Julius y R. Bianchi. "An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments". *IEEE Journal on Selected Areas of Communications*, 17(7):1205–1211, Julio 1999.
- [18] V. Erceg, K.V.S. Hari, M.S. Smith, D.S. Baum, K.P. Sheikh, C. Tappenden, J.M. Costa, C. Bushue, A. Sarajedini, R. Schwartz, D. Branlund, T. Kaitz y D. Trinkwon. "Channel models for fixed wireless applications". *IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group*, Julio 2001.
- [19] V.S. Abhayawardhana, I.J. Wassell, D. Crosby, M.P. Sellars y M.G. Brown. "Comparison of empirical propagation path loss models for fixed wireless access systems". *61st IEEE Vehicular Technology Conference*, 1:73–77, Mayo-Junio 2005.
- [20] T.S. Chu y L.J.Greenstein. "A quantification of link budget differences between the cellular and PCS bands". *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 48(1):60–65, Enero 1999.
- [21] W.C. Jakes y D.O. Reudink. "Comparison of mobile radio transmission at UHF and X-band". *IEEE Trans. Veh. Technol.*, VT-16:10–13, Octubre 1967.
- [22] Sprint Stanford University G2 MMDS channel models. *Stanford University Seminar, CA.*, Agosto 2000.
- [23] J. Walfisch y H.L. Bertoni. "A theoretical model of UHF propagation in urban environments". *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, 36(12):1788–1796, Diciembre 1988.
- [24] S. Kosono y K. Watanabe. "Influence of environmental buildings on UHF land mobile radio propagation". *IEEE Trans. Commun.*, COM(25):1133–1145, 1977.
- [25] F. Ikegami, D. Yoshida, T. Takeuchi y M. Umehira. "Propagation factors controlling mean field strength on urban streets". *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, AP(32):822–829, 1984.
- [26] J.Casaravilla, G.Dutra y N. Pignataro. "Modelo de propagación para entornos urbanos de pequeñas macroceldas". *Proyecto de fin de carrera, Facultad de Ingeniería, UDELAR*, 2002.
- [27] Geographic Information System. <http://www.gis.com> [visitada en noviembre de 2004].

-
- [28] GML4J Home Page. <http://gml4j.sourceforge.net> [visitada en diciembre de 2004].
- [29] WKB4J. <http://wkb4j.sourceforge.net> [visitada en diciembre de 2004].
- [30] GeoServer. <http://docs.codehaus.org/display/GEOS/Home> [visitada en diciembre de 2004].
- [31] DeGree. <http://deegree.sourceforge.net> [visitada en diciembre de 2004].
- [32] uDig. User-friendly Desktop Internet GIS. <http://udig.refractor.net> [visitada en diciembre de 2004].
- [33] The Jump Project. <http://www.jump-project.org> [visitada en diciembre de 2004].
- [34] OpenMap. Open Systems Mapping Technology. <http://openmap.bbn.com> [visitada en diciembre de 2004].
- [35] MapObjects - Java Edition. Mapping and GIS Components for the Java Developer. <http://www.esri.com/software/mojava/> [visitada en diciembre de 2004].
- [36] GeoTools, The open source Java GIS toolkit. <http://www.geotools.org> [visitada en diciembre de 2004].
- [37] JTS Topology Suite. <http://www.vividsolutions.com/jts/main.htm> [visitada en diciembre de 2004].
- [38] Open Geospatial Consortium specifications. <http://www.opengis.org> [visitada en noviembre de 2004].
- [39] “JTS Topology Suite Technical Specifications.” Version 1.4. *Vivid Solutions*, Octubre 2003.
- [40] B. Eckel. *Thinking in Java*. Prentice-Hall, second edition, Junio 2000. ISBN 0-13-027363-5.
- [41] C. Larman. *UML y Patrones: Introducción al análisis y diseño orientado a objetos*. ISBN 970-17-0261-1.
- [42] ESRI. The GIS Software Leader. <http://www.esri.com> [visitada en diciembre de 2004].
- [43] “ESRI Shapefile Technical Description”. *An ESRI White Paper*, Julio 1998.
- [44] “Extensible Markup Language (XML) 1.0”. Third edition. *W3C Recommendation*, Febrero 2004.
- [45] Elliotte Rusty Harold. *Processing XML with JAVA*.
- [46] R. Faub y A. Wasch T. Kurner. “A hybrid propagation modelling approach for DCS1800 macro cells”. *IEEE VTC'96*, pages 1628–1632, Abril-Mayo 1996.

-
- [47] S. R. Saunders y F. R. Bonar. “Prediction of mobile radio wave propagation over buildings of irregular heights and spacings”. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 42(2):137–144, Febrero 1994.
- [48] P. L’Ecuyer y C. Lemieux. “Variance reduction via lattice rules”. *Management Science*, 46(9):1214–1235, Setiembre 2000.
- [49] McLeish. “Computer intensive methods for stochastic models in finance”. *Course Notes*, 2004.
- [50] S. R. Saunders y C. Tzaras. “Rapid, uniform computation of multiple knife-edge diffraction”. *Electronic Letters*, 35(3):237–239, Febrero 1999.
- [51] L. Piazzzi y H.L. Bertoni. “On screen placement for building representation in urban environments considering 2D multiple diffraction problems”. *IEEE VTC’99*, 4:1977–1981, Setiembre 1999.
- [52] COST231 - Vector Building and GSM Measurement Data of Munich. Mannesmann Mobilfunk GmbH, Germany; <http://www.ihe.uni-karlsruhe.de/forschung/cost231/cost231.en.html> [visitada en Noviembre de 2005].
- [53] P. Möller y F. Alonso N. Cardona. “Applicability of Walfisch-type urban propagation models”. *Electronics Letters*, 31(23), Noviembre 1995.
- [54] F. Navarro y P. Möller N. Cardona. “Applicability of Walfisch-type urban propagation models”. *COST 231 TD*, 94(134), Setiembre 1994.
- [55] N. Cardona y D. J. Cichon P. Möller. “Investigations in a new developed urban propagation model”. *COST 231 TD*, 94(135), Setiembre 1994.