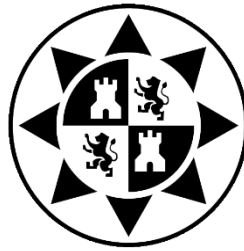


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



**Proyecto Fin de Carrera**

# Aplicación de la extensión de análisis geostadístico de ArcGIS a la estimación de cobertura radioeléctrica



AUTOR: María García García  
DIRECTORES: Leandro Juan Llácer  
Domingo Javier Pardo Quiles  
Julio / 2018

<b>Autor:</b>	María García García
<b>E-mail del Autor:</b>	maria101010@hotmail.es
<b>Directores:</b>	Leandro Juan Llácer Domingo Javier Pardo Quiles
<b>E-mail de los Directores:</b>	<a href="mailto:leandro.juan@upct.es">leandro.juan@upct.es</a> <a href="mailto:domingo.pardo@upct.es">domingo.pardo@upct.es</a>
<b>Título del TFG:</b>	Aplicación de la extensión de análisis geostadístico de ArcGIS a la estimación de cobertura radioeléctrica.
<b>Resumen:</b>	<p>Este proyecto se basa en la estimación de cobertura radioeléctrica a partir de la extensión de análisis geostadístico de ArcGIS. Una vez comprendido el funcionamiento básico de ArcGIS, se desea generar un mapa de cobertura estimado mediante RADIOGIS, con el fin de incorporar esta cobertura generada en el entorno de Matlab para poder hallar un archivo .dbf con los puntos de potencia que se quieran recoger del entorno <i>indoor</i> en el que se está trabajando.</p> <p>Una vez obtenido el archivo con los puntos de potencia, este se implementará sobre un Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS) como es ArcGis 9.1. Utilizando la extensión 'Geostatistical Analyst' se obtendrá un mapa de cobertura radioeléctrica predicho a partir del archivo de puntos conseguido mediante Matlab.</p> <p>Para finalizar, se obtendrá la diferencia entre el mapa de cobertura de potencia originado en RADIOGIS y el mapa de cobertura predicho, esto se realizará a partir de la extensión de ArcGIS 9.1 denominada Spatial Analyst.</p>
<b>Titulación:</b>	Grado en Ingeniería en Sistemas Telecomunicación
<b>Departamento:</b>	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
<b>Fecha de Presentación:</b>	Julio 2018

*Me gustaría dedicar este TFG a mis padres y a mi hermano por brindarme la oportunidad de estudiar esta magnífica carrera.*

## Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a Leandro Juan Llácer y a Domingo Javier Pardo Quiles por la confianza depositada en mí para la realización de este proyecto, espero haber cumplido con lo esperado, también agradecer toda la ayuda que me han dado, porque sin ellos no hubiera podido llegar hasta aquí.

En segundo lugar, quiero dar las gracias a mis padres, Gabriel y Ana por el apoyo a lo largo de estos 4 años, por estar siempre a mi lado, por levantarme en mis caídas y por enseñarme que hay que luchar por lo que uno quiere. A mi hermano Enrique por esas risas incontrolables que me hacía tener, por confiar en mí.

En tercer lugar, quiero agradecer a mis abuelos, María y Benito por darme suerte en cada uno de mis exámenes, por mirarme y decirme que valía. A mi abuela Ana por aportarme su sabiduría y a mi abuelo Enrique por ser la estrella más luminosa que hay en el cielo.

A mis amigos de Cartagena y Murcia, por compartir nervios, alegrías, tristezas, y consejos, porque sin ellos no estaría aquí, a Jaime por sus consejos y su ayuda incondicional, a Eduardo y Vicente, a Juan, Guille y Alejandro, a mis compañeras de piso por aguantarme los días antes de un examen.

¡Gracias a todos!

# ÍNDICE

1-INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO .....	11
1.1-FASES.....	11
1.2- CONTENIDO.....	11
1.3- HERRAMIENTAS UTILIZADAS.....	12
1.3.1- Software.....	12
2- ¿QUÉ ES ARCGIS? .....	15
2.1- ¿QUÉ ES UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA? .....	16
2.1.1. Funciones de un SIG .....	17
2.1.2. Cuestiones a las que puede responder un SIG.....	17
2.2- DESKTOP GIS .....	18
2.2.1. ArcCatalog.....	18
2.2.2.ArcMap.....	20
2.2.3.ArcToolbox .....	23
2.3-EXTENSIONES OPCIONALES PARA ARCGIS.....	23
2.3.1- Geostatistical Analyst.....	24
2.3.2- Spatial Analyst.....	25
2.4. TIPOS DE DATOS EN UN SIG .....	25
3- ¿QUÉ ES RADIOGIS? .....	30
3.1- FUNCIONALIDADES DE RADIOGIS .....	31
3.2- BARRA DE HERRAMIENTAS DE ARCMAP.....	31
3.3- GESTIÓN DE BASES DE DATOS .....	32
3.4- MODELOS DE PROPAGACIÓN .....	34
3.4.1- Modelos de propagación. Espacio libre .....	35
3.4.2- Modelos de propagación en entornos interiores. ....	36
3.4.2.1- Modelos Semi-deterministas .....	36
4.1- CÁLCULO DE COBERTURA .....	41
4.1.1. Entorno RADIOGIS.....	41
4.2-MATLAB.....	45
5.1- PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	57
5.1.1- Espacio libre .....	57
5.1.2- Óptica geométrica con una reflexión. Paredes conductoras.....	61
5.1.3- Óptica geométrica con una reflexión y reflexión en el suelo. Paredes conductoras .....	65

5.1.4- Óptica geométrica con una reflexión, reflexión en el suelo y transmisión. Paredes conductoras.....	69
5.1.5- Óptica geométrica con una reflexión, reflexión en el suelo, transmisión y difracción. Paredes conductoras.....	73
5.1.6- Óptica geométrica con una reflexión. Paredes absorbentes.....	77
Cada 10 grados .....	78
5.1.7- Óptica geométrica con una reflexión y reflexión en el suelo. Paredes absorbentes .....	81
5.1.8- Óptica geométrica con una reflexión, reflexión en el suelo y transmisión. Paredes absorbentes.....	85
5.1.9- Óptica geométrica con una reflexión, reflexión en el suelo, transmisión y difracción. Paredes absorbentes.....	89
6.1- CONCLUSIONES .....	95
6.2- LÍNEAS FUTURAS .....	96
Bibliografía .....	99

## TABLA DE FIGURAS

Figura 1.1. Entorno aplicación ArcMap [9].....	12
Figura 1.2. Entorno Matlab 2015.....	13
Figura 2.1. ArcObjects es una librería común para los cuatro componentes ArcGIS [12].....	15
Figura 2.2. ArcObjects es empleado por desarrolladores GIS en conjunto con los otros cuatro productos [12].....	16
Figura 2.3. Previsualización en 3D en ArcCatalog [5].....	19
Figura 2.4. Gestión de un catálogo de metadatos en un servidor de metadatos ArcIMS, organización y edición [5].....	19
Figura 2.5. Previsualización de un mapa producido con el servidor ArcGIS en ArcCatalog [5]..	19
Figura 2.6. Metadatos en ArcCatalog [5].....	19
Figura 2.7. Interfaz gráfica de ArcMap [11].....	20/21
Figura 2.9. Ventana Catálogo [12].....	22
Figura 2.10. Interfaz Data View [5].....	22
Figura 2.11. Interfaz Layout View [5].....	22
Figura 2.12. Interfaz gráfica de ArcToolbox.....	23
Figura 2.13. Modelo Raster y vectorial [6].....	25
Figura 2.14 La geografía real o modelar (abajo); la información geográfica en formato vectorial (centro); y la información geográfica en formato raster (arriba) [15] .....	27
Figura 2.15. Tabla de atributos (información descriptiva) asociada a un Raster (información geográfica) [15] .....	27
Figura 2.16. Diferentes capas que representan diferentes características geográficas [7].....	28
Figura 3.1. Aspecto general de la aplicación de RADIOGIS.....	30
Figura 3.2. Barra de herramientas de ArcMap [17] .....	32
Figura 3.3. Cobertura consultada en base de datos.....	33
Figura 3.4. Tabla de atributos de la cobertura radioeléctrica.....	33
Figura 3.5. Base de datos de emplazamientos.....	34
Figura 3.6. Rayo directo en el modelo de espacio libre [19].....	35
Figura 3.7. Longitud adecuada del radio de la esfera para recibir un rayo. Caso 2D [20].....	37

Figura 3.8. Dipolo vertical y su imagen para determinar la reflexión sobre un conductor [20].	38
Figura 4.1. Entorno de RADIOGIS.....	41
Figura 4.2. Mapa perteneciente al entorno de RADIOGIS.....	41
Figura 4.3. Entorno indoor dentro del mapa cargado en RADIOGIS.....	42
Figura 4.4. Ventanas pertenecientes a la cobertura de potencia.....	42
Figura 4.5. Parámetros comunes en una cobertura radioeléctrica generada en RADIOGIS.....	44
Figura 4.6. Herramienta perteneciente a RADIOGIS.....	45
Figura 4.7. Elección de una cobertura hallada en RADIOGIS para su exportación.....	45
Figura 4.8. Exportación de una cobertura de Grid a Ascii.....	46
Figura 4.9. Entorno Matlab.....	47
Figura 4.10. División de mdt en cuatro cuadrantes, centrados en la posición del transmisor..	48
Figura 4.11. Perfil de potencias recibidas.....	49
Figura 4.12. Potencias recibidas interpoladas entre Tx y Rx.....	50
Figura 4.13. Puntos de potencia cada 5 grados.....	50
Figura 4.14. Puntos de potencia cada 10 grados.....	50
Figura 4.15. Puntos de potencia cada 20 grados.....	51
Figura 4.16. Puntos de potencia cada 40 grados.....	51
Figura 4.17. Geostatistical Wizard.....	51
Figura 4.18. Semivariograma del caso mejor.....	52
Figura 4.19. Semivariograma del caso peor.....	52
Figura 4.20. Searching Neighborhood del caso mejor.....	52
Figura 4.21. Searching Neighborhood del caso peor.....	52
Figura 4.22. Cross-Validation del caso mejor.....	53
Figura 4.23. Cross-Validation del caso peor.....	53
Figura 4.24. Error de la cobertura en espacio libre cada 5 grados.....	54
Figura 4.25. Error espacio libre cada 5 grados.....	54
Figura 4.26. Absoluto del error.....	55



Figura 6.1. Error para cada cobertura..... 96

# Capítulo 1. Introducción y Objetivos

---

## 1-INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO

En la planificación de un sistema de radiocomunicaciones juega un papel fundamental el cálculo de cobertura radioeléctrica [1] [2]. Dicha estimación se realiza mediante herramientas de planificación que habitualmente están basadas en Sistemas de Información Geográfica (SIG). Estas herramientas incorporan modelos de propagación teórico-experimentales, que tienen en cuenta los parámetros de los equipos transmisores y receptores, así como el modelo digital del terreno (MDT) para realizar los cálculos. Los modelos utilizan teorías electromagnéticas que son corregidas con medidas experimentales, para estimar las pérdidas de propagación a partir de las características del entorno (montañas, en entorno rural; edificios, en entorno urbano; distribución de paredes en entornos *indoor*, etc.) en cada celda del modelo digital del terreno.

Los cálculos realizados permiten obtener mapas de cobertura radioeléctrica en un entorno determinado (rural, urbano, *indoor*, etc). RADIOGIS [3] es una herramienta de planificación de sistemas de radiocomunicaciones basado en el SIG de ESRI [4]. RADIOGIS se incorpora como una extensión más a ArcGIS [5] de ESRI, los cálculos realizados se almacenan en el formato del propio SIG, lo que facilita la gestión y representación de los resultados obtenidos.

El objetivo principal del proyecto es analizar el error cometido al estimar un mapa de cobertura radioeléctrica mediante RADIOGIS en un área determinada en un entorno *indoor* o estimar dicha cobertura mediante la extensión Geostatistical Analyst de ArcGIS a partir de un número finito de celdas de esa área en las que se conoce previamente la cobertura por haberla estimado con RADIOGIS.

### 1.1-FASES

Las fases que se siguieron en la realización de este trabajo fueron:

- ✓ Aprender a manejar la herramienta RADIOGIS y cómo se integra en ArcGIS de ESRI.
- ✓ Estudiar la extensión Geostatistical Analyst de ArcGIS.
- ✓ Calcular el mapa de cobertura radioeléctrica en un entorno *indoor* mediante RADIOGIS, seleccionar un número finito de puntos de dicha cobertura y estimar el nuevo mapa completo en el mismo entorno a partir de esos valores con la extensión de ArcGIS.
- ✓ Analizar resultados.

### 1.2- CONTENIDO

Este proyecto final de carrera está compuesto por ocho capítulos.

El **capítulo segundo**, versa sobre los Sistemas de Información Geográfica (SIG o GIS, de *Geographic Information Systems*). Primeramente, se describe qué son los SIG y para qué se emplean. Seguidamente se nombran las diferentes aplicaciones de escritorio que presenta GIS, centrándose en las que se ha usado en la realización de este proyecto (ArcMap, ArcCatalog y ArcToolbox). También se hace una pequeña referencia a todas las extensiones que presenta ArcGIS, poniendo el foco en Geostatistical Analyst y Spatial Analyst. Para terminar, se comenta los distintos tipos de datos en un GIS.

En el **tercer capítulo**, se pasa a describir qué es la herramienta de RADIOGIS desarrollado por el grupo de Sistemas de Comunicaciones Móviles (SiCoMo) de la UPCT, con sus principales componentes y funcionalidades. Por último, se describirá los diferentes modelos de propagación que existen, focalizando la atención, tanto en el modelo de espacio libre como en el de óptica geométrica.

El **capítulo cuarto**, describe paso por paso la metodología que se ha seguido para llevar a cabo los objetivos propuestos.

El **capítulo quinto**, muestra todos los resultados del proyecto. Por un lado, se verá el error que hay en un espacio *indoor* al usar el modelo de propagación de espacio libre, comparándolo con el error que hay en ese mismo espacio al usar el modelo de óptica geométrica.

En el **sexto capítulo**, se hace una breve exposición de las conclusiones derivadas de este proyecto y de cuáles podrían ser las líneas futuras de desarrollo en este campo.

Por último, en el **capítulo octavo**, se recogen las principales referencias bibliográficas empleadas en el desarrollo de este proyecto.

## 1.3- HERRAMIENTAS UTILIZADAS

### 1.3.1- Software

Se han empleado varios programas informáticos, los cuales han sido:

- Sistema de Información Geográfica, **ArcGis 9.1** del cual se ha empleado la aplicación ArcMap (ver Figura 1.1).

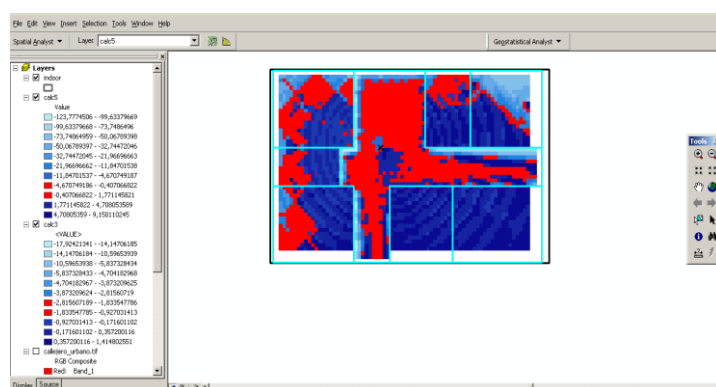


Figura 1.1. Entorno aplicación ArcMap

- **Matlab 2015**, para conseguir almacenar en un archivo, a partir de una matriz de cobertura radioeléctrica, los diferentes valores de potencias de las diferentes celdas entre un transmisor y un receptor (ver Figura 1.2).

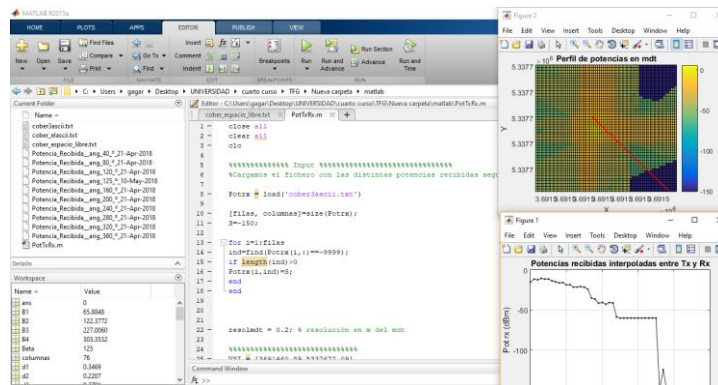


Figura 1.2. Entorno Matlab 2015

- **Excell 2003**, con la finalidad de pasar el archivo con la extensión .txt creado con Matlab a la extensión .dbf, para seguidamente poder integrarlo en RADIOGIS.

## Capítulo 2. Introducción a ArcGIS

---

## 2- ¿QUÉ ES ARCGIS?

ArcGIS 9.1 es un producto de ESRI, como hemos comentado previamente, que proporciona un marco general para utilizar un Sistema de Información Geográfica por uno o varios usuarios en ordenadores, servidores, Internet, etc.

ArcGIS es una colección integrada de software GIS. Se compone de cuatro partes [5]:

- **ArcGIS Desktop**: una suite integrada para aplicaciones SIG profesionales.
- **ArcGIS Engine**: componentes integrados (embebidos) para aplicaciones personalizadas (customizadas).
- **ArcGIS Engine**: componentes integrados (embebidos) para aplicaciones personalizadas (customizadas). - **Server GIS**: como su propio nombre indica, es un servidor de GIS.
- **Mobile GIS**: aplicaciones anteriores adaptadas a Tablet PC.

ArcGIS está basado en ArcObjects™, una librería modular común que comparten todos los componentes software del GIS. Incluye una amplia variedad de componentes programables, que van desde objetos como geometrías individuales, hasta mapas enteros que interactúan con documentos ArcMap. Los desarrolladores de GIS tienen a su disposición la librería ArcObjects para crear plataformas alternativas de software GIS, basándose en los cuatro productos anteriores. En las figuras 2.1 y 2.2 se pueden ver más detalladamente todos estos productos.



Figura 2.1. ArcObjets es una librería común para los cuatro componentes ArcGIS [5].



Figura 2.2. ArcObjects es empleado por desarrolladores GIS en conjunto con los otros cuatro productos [12]

## 2.1- ¿QUÉ ES UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA?

**Los Sistemas de Información Geográfica (SIG)** son una tecnología que forma parte del ámbito más extenso de los Sistemas de Información. El contexto general en el que surgen es el de la "sociedad de la información", en la que resulta esencial la disponibilidad rápida de información, para resolver problemas y contestar a las preguntas de modo inmediato [6], [7].

El SIG funciona como una base de datos con información geográfica (datos alfanuméricos) que 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.

El SIG separa la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, y facilitando al profesional la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología de los objetos, con el fin de generar otra nueva que no podríamos obtener de otra forma.

Miles de organizaciones de muchos sectores diferentes emplean ArcGIS, que es el sistema de información geográfica desarrollado por la empresa ESRI.

En general se usa ArcGIS como SIG porque permite:

- Resolver gran cantidad de problemas.
- Tomar mejores decisiones.
- Planificar adecuadamente.



- Utilizar los recursos de una manera más eficiente.
- Administrar y ejecutar las operaciones de una forma más eficaz.
- Aumentar la comprensión de los conocimientos.
- Comunicar de forma más efectiva.
- Educar y motivar a otros.

Son muchas las aplicaciones para las que se puede usar ArcGIS, y algunas de ellas nos facilitan múltiples situaciones, como, por ejemplo [8]:

- Compañías de telecomunicación, que estudian el terreno para encontrar una buena disposición para una antena telefónica.
- Departamentos de agua, que pueden encontrar las válvulas para aislar tuberías rotas o con fugas de agua rotas.
- Meteorólogos, que emiten advertencias para las regiones que se encuentran en el recorrido de una gran tormenta.
- Departamentos de ingeniería, que monitorizan el estado de las carreteras y puentes, y producen mapas de planificación para desastres naturales.
- Policías, que pueden encontrar la ruta más rápida para socorrer una emergencia.

### **2.1.1. Funciones de un SIG**

Las principales funciones de un Sistema de Información Geográfica son [6]:

- **Entrada de datos.** Debe tener capacidad de recibir datos de distintas maneras (digitalización directa, entrada de coordenadas en archivos digitales y teledetección).
- **Output.** Es la representación gráfica y cartográfica en papel y digital (no es el eje central de un SIG).
- **Manipulación de los datos.** Debe proveer herramientas para el manejo de información; por ejemplo, funciones para la transformación matemática de coordenadas, reformato e importación y exportación de datos.
- **Análisis.** Es la función más importante. Se trata de usar la información disponible para producir nueva información.

### **2.1.2. Cuestiones a las que puede responder un SIG**

Algunas de las preguntas que pueden responder un SIG son [7]:

- 1. Localización.**- Apuntando con el cursor sobre la pantalla se puede obtener información sobre lo que hay en un lugar determinado (por ejemplo, cuánta población escolar habita en

una sección censal). Se trata simplemente realizar una consulta en la que es necesario relacionar la información cartográfica con la base de datos de atributos.

**2. Condición.-** A partir de unas condiciones previamente especificadas, el sistema debe indicar dónde se cumplen o no esas condiciones (por ejemplo, indicar dónde encontramos un lago para pescar situado a menos de 50 kilómetros de nuestra casa y rodeado de bosques).

**3. Tendencias.-** En esta pregunta lo fundamental es la comparación entre situaciones temporales distintas, si bien para ello se pueden incluir condiciones (por ejemplo, cuántas hectáreas de naranjos se encuentran a menos de 200 metros de una carretera, en una fecha dada y veinte años después). Ello supone trabajar con varios mapas de la misma zona referidos a fechas distintas.

**4. Rutas.-** El sistema puede calcular el camino óptimo (el más corto, más barato o más rápido) entre dos puntos a través de una red (por ejemplo, entre el lugar donde se ha producido una catástrofe y el hospital más próximo).

**5. Pautas.-** Ciertas regularidades espaciales pueden ser detectadas con la ayuda de un SIG (por ejemplo, qué patrones de distribución espacial presentan los casos de cáncer en torno a una central nuclear en la que se ha producido un accidente).

**6. Modelos.-** Se pueden generar modelos para simular el efecto que producirían posibles fenómenos o actuaciones en el mundo real (por ejemplo, que sucedería si se construyera un nuevo tramo de autopista o si se produjera un aumento de dos metros en el nivel de las aguas del mar).

## 2.2- DESKTOP GIS

El **Desktop GIS** (-escritorio SIG-) es el nivel primario desde el que los profesionales compilan, crean y utilizan la información geográfica. Si usamos GIS en un proyecto o en un entorno multiusuario, se pueden usar estas tres aplicaciones: ArcCatalog, ArcMap y ArcToolbox.

- La aplicación de **ArcCatalog** sirve para establecer diseños base, recordar y ver metadatos.
- **ArcMap** se utiliza para todas las tareas de mapeo y edición, así como el análisis basado en mapas.
- **ArcToolbox** se usa para la conversión de datos y geoprocésamiento.

### 2.2.1. ArcCatalog

La aplicación **ArcCatalog** ayuda a los usuarios a organizar y gestionar toda la información geográfica (Figura 2.4), como mapas, globos, conjuntos de datos, modelos, metadatos y servicios. Incluye herramientas para [5], [8]:

- Navegar y encontrar información geográfica (Figura 2.6).
- Grabar, ver y gestionar metadatos (ver Figura 2.3 y 2.5).
- Definir, exportar e importar modelos de datos de bases de datos geográficas. Buscar y descubrir datos GIS en redes locales y en la Web.
- Administrar un servidor GIS.

Los usuarios pueden utilizar ArcCatalog para encontrar, organizar y utilizar los datos del SIG, así como para documentar las existencias de datos utilizando metadatos basados en estándares. Un administrador de bases de datos GIS utiliza ArcCatalog para definir y construir bases de datos geográficas. El administrador de un servidor GIS utiliza ArcCatalog para administrar el marco de trabajo del servidor GIS.

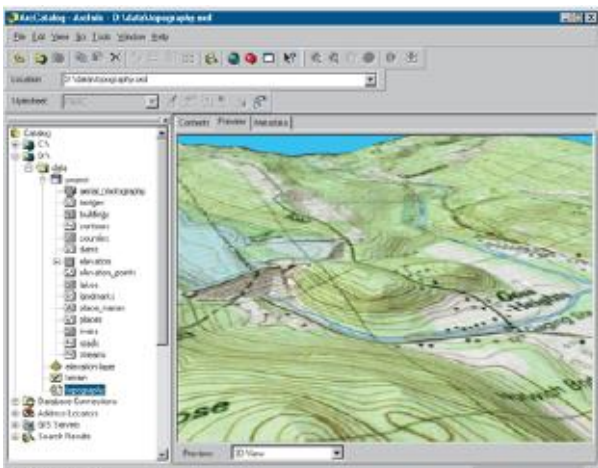


Figura 2.3. Previsualización en 3D en ArcCatalog [5]

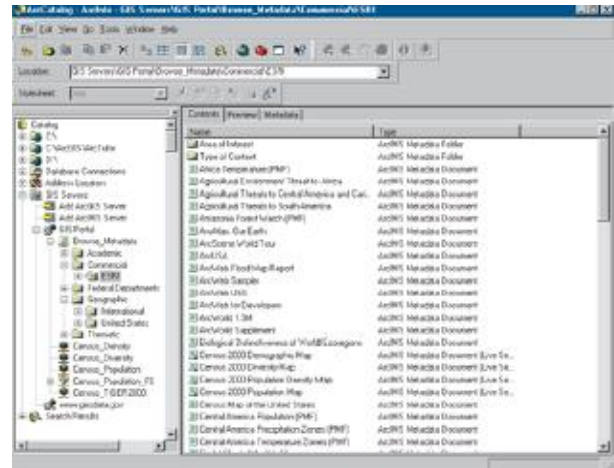


Figura 2.4. Gestión de un catálogo de metadatos en un servidor de metadatos ArcIMS, organización y edición [5]

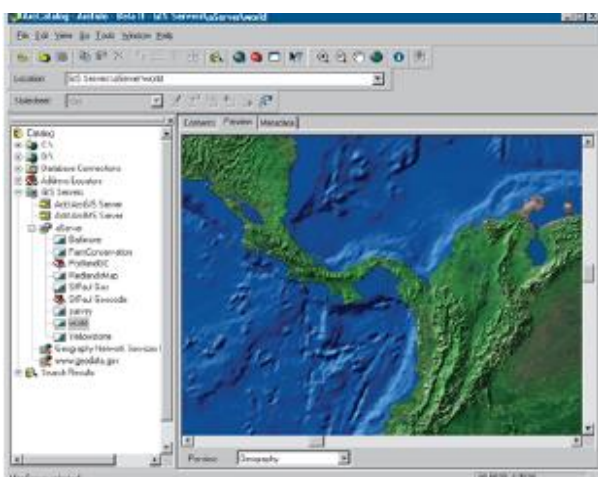


Figura 2.5. Previsualización de un mapa producido con el servidor ArcGIS en ArcCatalog [5]



Figura 2.6. Metadatos en ArcCatalog [5]

### 2.2.2.ArcMap

**ArcMap** es la herramienta principal de ArcGIS para escritorio, ésta cuenta con un entorno visual el cual permite realizar una representación cartográfica, edición, análisis y administración de datos [4], [5].

Algunas de las funcionalidades de ArcMap son:

- ✓ Trabajar con mapas
- ✓ Imprimir mapas
- ✓ Compilar y editar Datasets
- ✓ Utilizar el geoprocésamiento para automatizar y realizar análisis
- ✓ Organizar y administrar geodatabases y documentos de ArcGIS
- ✓ Publicar documentos de mapa como servicios de mapas mediante ArcGIS for Server
- ✓ Permite administrar usuarios

La interfaz de ArcMap se compone principalmente de las siguientes partes:

#### Marco de datos

El marco de datos (ver Fig. 2.7) muestra una serie de capas dibujada en un orden determinado para una extensión de mapa y proyección de mapa determinadas. En la tabla de contenido del lado izquierdo de la ventana de mapa se muestra la lista de capas del marco de datos

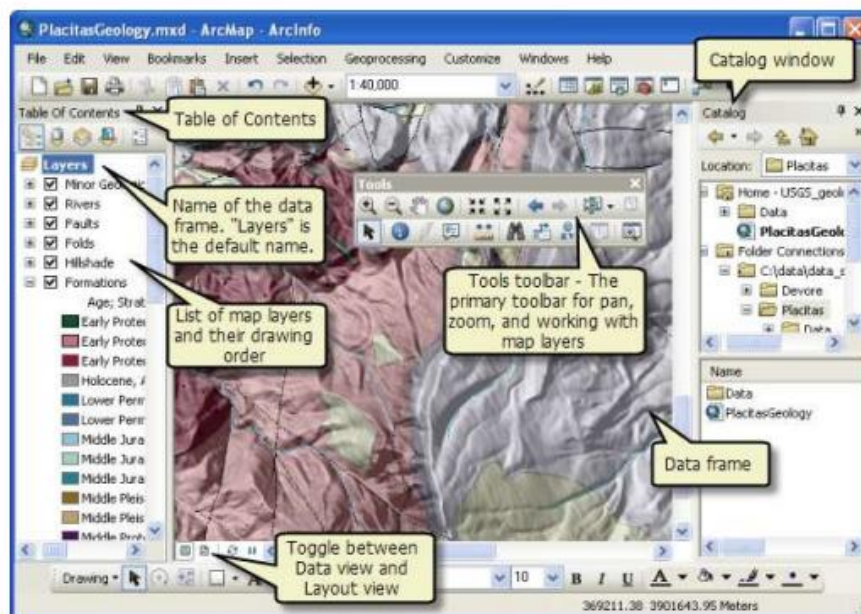


Figura 2.7. Interfaz gráfica de ArcMap [11]

## Tabla de contenido

En la tabla de contenido se enumeran todas las capas del mapa y se muestra lo que representan las entidades de cada capa. La casilla de verificación que hay al lado de cada capa (Figura 2.7) indica si su visualización está activada o desactivada actualmente. El orden de capas en la tabla de contenido especifica su orden de dibujo en el marco de datos de abajo a arriba. La tabla de contenido del mapa le ayuda a administrar el orden de visualización de las capas del mapa y la asignación de símbolos. También le ayuda a establecer la visualización y otras propiedades de cada capa del mapa.

## Diseños de página

Un diseño es una colección de elementos de mapa colocados y organizados en una página (Figura 2.8). Son elementos de mapa habituales uno o varios marcos de datos (cada uno con un conjunto ordenado de capas de mapa), una barra de escala, la flecha de norte, el título del mapa, texto descriptivo y una leyenda de los símbolos.

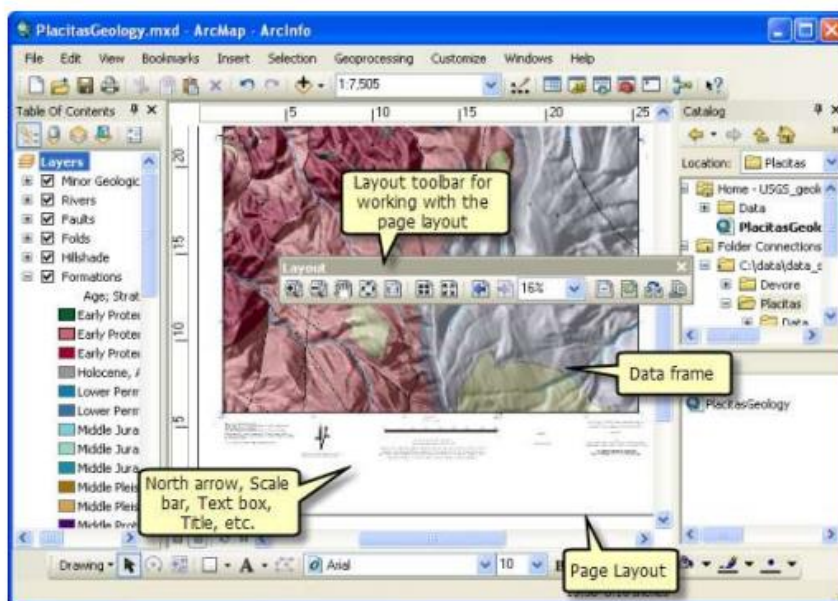


Figura 2.8. Interfaz gráfica de ArcMap [11]

## Ventana Catálogo

ArcMap, ArcGlobe y ArcScene contienen una ventana Catálogo (Figura 2.9) que se utiliza para organizar y administrar diversos tipos de información geográfica en colecciones lógicas, por ejemplo, los datos, mapas y resultados de los proyectos de SIG con los que trabaja en ArcGIS. La ventana Catálogo proporciona una vista de árbol de las carpetas de archivos y las geodatabases. Las carpetas de archivos se utilizan para organizar los documentos y archivos de ArcGIS. Las geodatabases se utilizan para organizar los dataset SIG.



Para más información acerca del funcionamiento de ArcMap diríjase al manual de ArcGIS *Getting Started With ArcGIS* [8] y para conocer más acerca de cómo personalizar el entorno ArcMap con herramientas propias puede consultar los manuales *Exploring ArcObjctcts: Vol.1-Applications and Cartography* [9] y *Exploring ArcObjctcts: Vol.2- Graphics Data Management* [10].

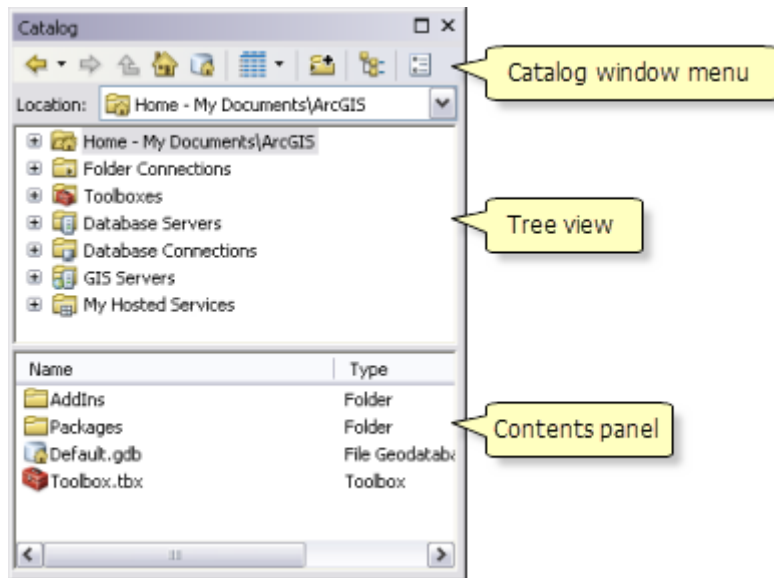


Figura 2.9. Ventana Catálogo [12]

Dicha aplicación de escritorio ofrece dos tipos de vistas de mapa: *Data View* y *Layout View*.

En primer lugar, *Data View* sirve para mostrar, hacer cambios, introducir datos, hacer búsquedas geográficas o en las tablas de atributos, mientras que, por otro lado, la vista *Layout View* es la interfaz gráfica que sirve para producir mapas y gráficas. En las figuras 2.10 y 2.11 se muestran respectivamente estas dos interfaces.

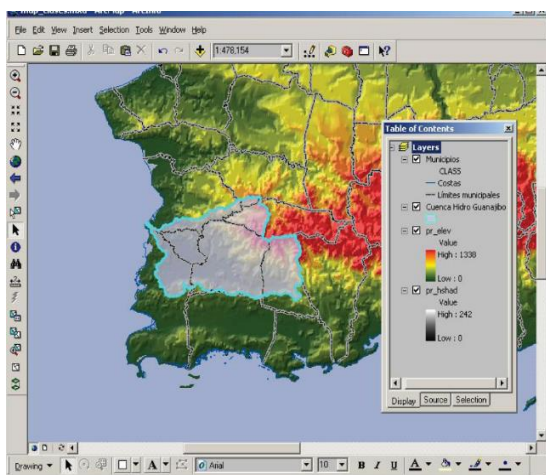


Figura 2.10. Interfaz Data View [5]

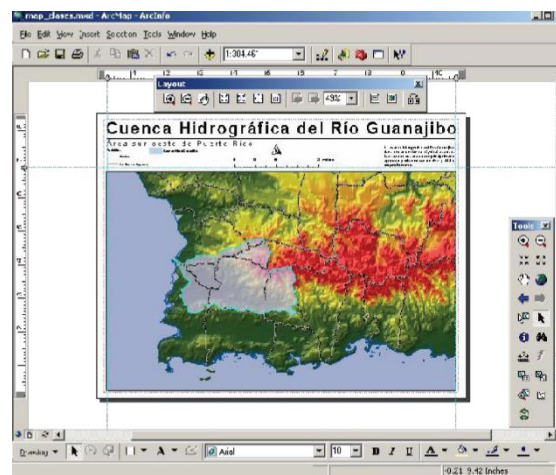


Figura 2.11. Interfaz Layout View [5]

### 2.2.3.ArcToolbox

**ArcToolbox** provee un ambiente de trabajo para desarrollar operaciones de geoprocésamiento (Figura 2.12). Estas operaciones se encuentran disponibles en librerías ordenadas por temas y en general cuentan con menús de ayuda (Wizards) y herramientas paso a paso para que las operaciones tanto de geoprocésamiento como de conversión de datos sean simples de utilizar. Dichas herramientas son usadas para [5]:

- Gestión de datos
- Conversión de datos
- Procesamiento de coberturas
- Análisis vectorial
- Geocodificación
- Referenciación lineal
- Cartografía
- Análisis estadístico

ArcToolbox está integrado en ArcCatalog y ArcMap y está disponible en ArcView, ArcEditor y ArcInfo.

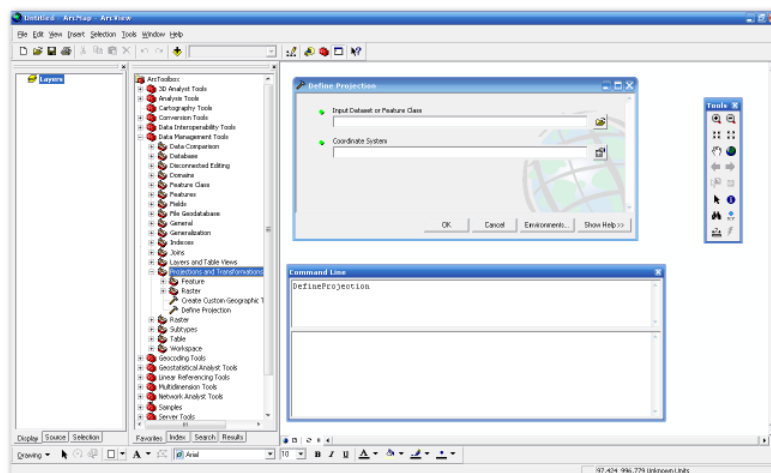


Figura 2.12. Interfaz gráfica de ArcToolbox

Las herramientas de ArcToolbox pueden ser utilizadas a través de los distintos asistentes o mediante una línea de comandos donde se especifica el nombre del comando y sus correspondientes parámetros. ArcToolbox además permite crear nuevos modelos automatizados a partir de las herramientas existentes.

### 2.3-EXTENSIONES OPCIONALES PARA ARCGIS

Las extensiones permiten añadir capacidades a los productos ArcGIS. Estas herramientas especializadas permiten realizar tareas extendidas como pueden ser el geoprocesamiento de un raster, el análisis tridimensional y la publicación de mapas [5].

Algunas de estas extensiones son: ArcGIS 3D Analyst, ArcGIS Geostatistical Analyst, ArcGIS Network Analyst, ArcGIS Schematics, ArcGIS Survey Analyst, ArcGIS Tracking Analyst, ArcGIS Image Analysis, ArcGIS Military Analyst y ArcGIS Spatial Analyst.

En este proyecto se han usado dos de las extensiones nombradas en el cuadro de arriba, Geostatistical Analyst y Spatial Analyst, por lo que nos vamos a centrar en estas dos.

### **2.3.1- Geostatistical Analyst**

**Geostatistical Analyst** proporciona una gran cantidad de herramientas estadísticas para el análisis y mapeo de datos continuos, además de para la generación de superficies. Las herramientas de análisis exploratorias de datos espaciales proporcionan diferentes perspectivas sobre los datos: su distribución, valores atípicos globales y locales, tendencias globales, nivel de autocorrelación y variación entre múltiples conjuntos de datos. Las predicciones de la extensión de ArcGIS Geostatistical Analyst también pueden medir la incertidumbre asociada con las predicciones [5] y [13].

Geostatistical Analyst determina la probabilidad de que ciertas variables ocurran en un área donde la identificación de cada posible ubicación sería imposible. Por ejemplo, en California, se han establecido estaciones de monitoreo de la calidad del aire en todo el estado. Éstos miden la cantidad de partículas en el aire y cuán dañinas son para las áreas circundantes.

Geostatistical Analyst puede determinar la cantidad aproximada de partículas en el área de interés y también puede determinar hacia dónde se mueven estas partículas creando una superficie interpolada óptima. Geostatistical Analyst proporciona una multitud de poderosos métodos de interpolación con herramientas analíticas avanzadas para generar superficies interpoladas óptimas a partir de mediciones de datos espaciales discretos. Esta funcionalidad es la que hemos utilizado para predecir la cobertura en un área conocida la potencia en un número determinado de puntos de esa área.

Dentro de Geostatistical Analyst se ha aprendido a utilizar la herramienta *Geostatistical Wizard* con el fin de calcular la predicción de un mapa de cobertura radioeléctrica. Para ello, se usa el método de predicción 'kriging'.

Este método es un procedimiento geoestadístico avanzado que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersados con valores z. Kriging es un proceso que tiene varios pasos, entre los que se incluyen, el análisis estadístico exploratorio de los datos, el modelado de variogramas, la creación de la superficie y (opcionalmente) la exploración de la superficie de varianza. Este método es más adecuado cuando se sabe que hay una influencia direccional o de la distancia correlacionada espacialmente en los datos. Se utiliza a menudo en la ciencia del suelo y la geología [14].



Los métodos geoestadísticos crean superficies que incorporan las propiedades estadísticas de los datos medidos. Estos métodos no solo producen superficies predichas sino también superficies de error o incertidumbre, dando al usuario una indicación de lo buenas que son las predicciones.

### 2.3.2- *Spatial Analyst*

ArcGIS **Spatial Analyst**, es una extensión opcional de ArcGIS Desktop (ArcInfo, ArcEditor, y ArcView), la cual proporciona herramientas para el análisis espacial completo basado en raster. Con dicha extensión, los usuarios pueden emplear una amplia gama de formatos de datos para combinar conjuntos de datos, interpretar nuevos datos y realizar complejas operaciones raster como análisis del terreno, modelado de superficies, interpolación de superficies, análisis hidrológico, análisis estadístico y mucho más [5].

## 2.4. TIPOS DE DATOS EN UN SIG

Los Sistemas de Información Geográfica manejan dos tipos de información principalmente: la información espacial o geográfica y la información descriptiva. A su vez, la información geográfica se puede almacenar de dos formas: empleando formato raster o formato vectorial (Figura 2.13) [6].

La información espacial o información geográfica, es la que describe la localización y la forma de diversas características geográficas (orografía, vías de comunicación, ríos, etc.). Esta información se puede almacenar en dos formatos: tipo raster o tipo vectorial.

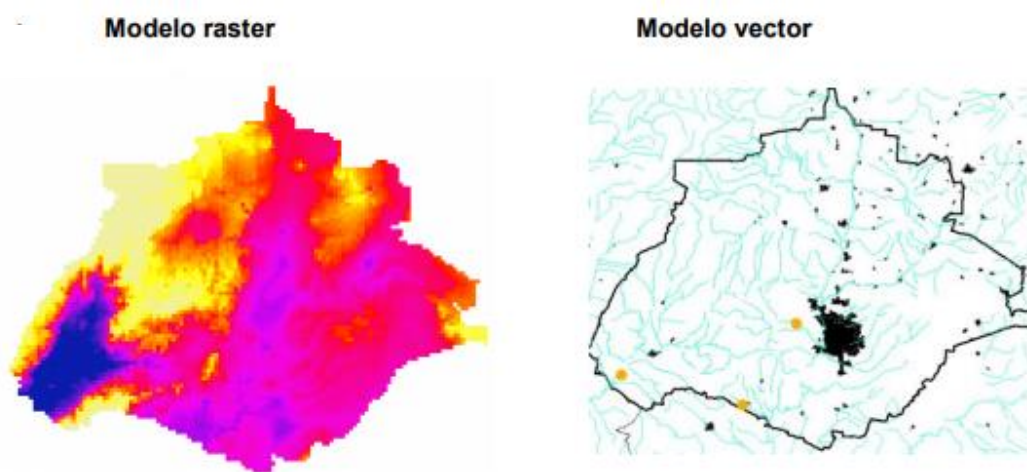


Figura 2.13. Modelo Raster y vectorial [6]

### Raster:

Este formato presupone el dividir el espacio geográfico en elementos discretos, de forma regular, contigua y mutuamente exclusiva e indivisible.

Es una representación en forma de malla. Y cada elemento adopta un valor único por cada atributo.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"><li>• Estructura de datos simple.</li><li>• Facilidad de combinar capas con datos de sensores remotos.</li><li>• Facilidad de análisis espacial.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Grandes volúmenes de datos</li></ul>

### Vectorial:

- Asume un espacio continuo, de acuerdo a la geometría euclidiana.
- Los objetos puntuales se representan por un par de coordenadas x, y.
- Los lineales mediante segmentos que se conectan en vértices, y se representan con las coordenadas x, y, de estos vértices.
- Los polígonos son áreas que quedan representadas por las líneas que los delimitan.

Ventajas:	Desventajas:
<ul style="list-style-type: none"><li>• Buena representación de estructura de datos.</li><li>• Estructura compacta de datos.</li><li>• La topología puede ser descrita mediante redes de uniones.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Estructura de datos compleja.</li><li>• Dificultad de construir simulaciones.</li><li>• Mayor sofisticación y precio de equipo y programas.</li></ul>

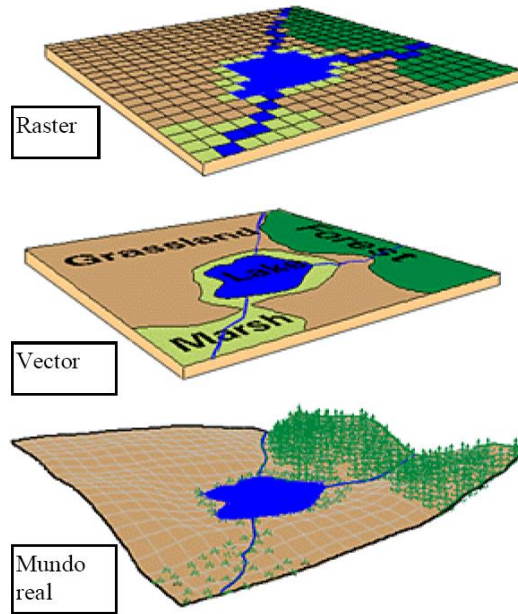


Figura 2.14. La geografía real a modelar (abajo); la información geográfica en formato vectorial (centro); y la información geográfica en formato raster (arriba) [15]

La información descriptiva es aquella que proporciona información sobre la información geográfica (tipo de vía de comunicación, tipo de río, etc.) (Figura 2.14), es decir, la describe. Esta información se almacena mediante tablas de atributos (Figura 2.15), las cuales relacionan la información geográfica con la descriptiva mediante un identificador.

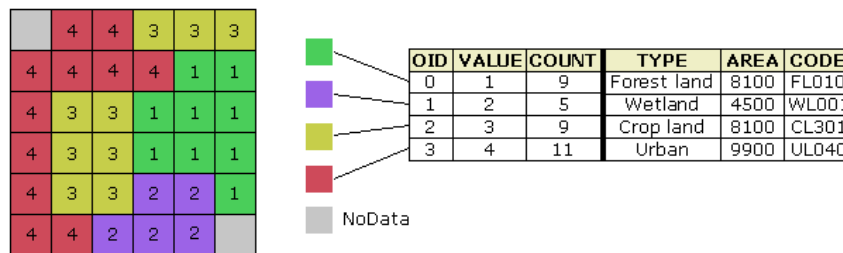
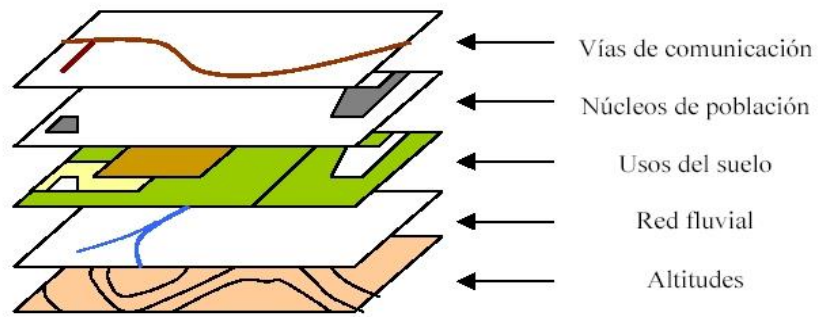


Figura 2.15. Tabla de atributos (información descriptiva) asociada a un Raster (información geográfica) [16]

En un SIG, se pueden trabajar con diversas capas simultáneamente, describiendo cada una de ellas información geográfica asociada a tablas de atributos como se representa en la figura 2.16.



*Figura 2.16. Diferentes capas que representan diferentes características geográficas [7]*

## Capítulo 3. Introducción a RADIOGIS

---

### 3- ¿QUÉ ES RADIOGIS?

**RADIOGIS** [3] es una herramienta para el cálculo y gestión de coberturas radioeléctricas desarrollado en el grupo de investigación Sistemas de Comunicaciones Móviles (SiCoMo) de la Universidad Politécnica de Cartagena.

RADIOGIS se incorpora como una barra de herramientas más a ArcMap de ESRI [4] y, por tanto, entre otras funcionalidades, es capaz de almacenar las coberturas radioeléctricas como si de un mapa más se tratase, además de facilitar la creación, almacenamiento y gestión de todos los parámetros que intervienen en la planificación de sistemas de radiocomunicación. Esta herramienta se ha implementado en entorno PC bajo WINDOWS.

El lenguaje de programación que se utiliza es Visual Basic junto con la librería ArcObjects en ArcGIS 9.1, empleando programas en C++ para implementar los modelos de propagación para el cálculo de cobertura radioeléctrica. En la Fig. 3.1 puede verse el aspecto general de RADIOGIS.

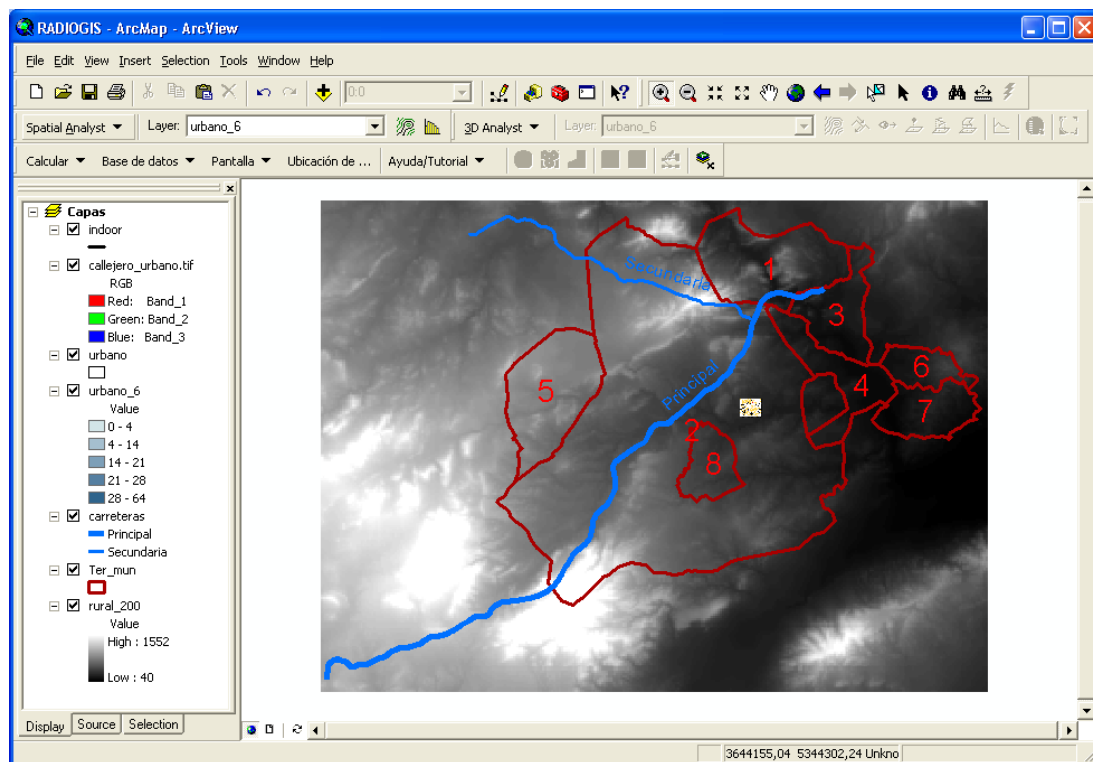


Figura 3.1. Aspecto general de RADIOGIS

A continuación, se nombrarán las distintas funcionalidades de RADIOGIS.

### 3.1- FUNCIONALIDADES DE RADIOGIS

La aplicación RADIOGIS incluye las siguientes funcionalidades [3]:

- Calcular coberturas radioeléctricas recortando una zona de cálculo del mapa y creando dos capas, una raster que contiene el valor de cobertura de potencia en cada punto de la zona, y otra vectorial que contiene la tabla de atributos de la cobertura. Ambas capas se añaden automáticamente al mapa tras el cálculo.
- Añadir al mapa coberturas radioeléctricas previamente calculadas que se encuentren en la base de datos de coberturas.
- Eliminar coberturas radioeléctricas tanto del mapa como de la base de datos de coberturas.
- Calcular el porcentaje de potencia que supera un umbral sobre una zona (región, término municipal, carretera, etc.) aportado por una estación base, así como el cálculo del mejor servidor de un sistema formado por varias coberturas radioeléctricas desde diversos emplazamientos.
- Realizar zoom sobre cualquier zona del mapa y volver a la extensión inicial.
- Identificar cualquier punto del mapa obteniendo información de los elementos de las distintas capas vectoriales del mapa que se encuentran en ese punto.
- Medir distancias entre distintos puntos del mapa y el área encerrada en los límites de un polígono.
- Crear nuevos emplazamientos seleccionando su ubicación en el mapa. Se crearán como nuevas capas vectoriales (poseerán su propia tabla de atributos) y se añadirán al mapa y a una base de datos de emplazamientos.
- Añadir emplazamientos que estén disponibles en la base de datos de emplazamientos y que no estén cargados en ese momento en el mapa.
- Eliminar emplazamientos tanto del mapa como de la base de datos de emplazamientos.
- Subir o descargar archivos del servidor (coberturas, emplazamientos, diagramas de antenas, etc.).

### 3.2- BARRA DE HERRAMIENTAS DE ARCMAP

A continuación, se va a explicar una de las barras de herramientas usadas dentro del entorno de ArcMap, que permite interactuar con el mapa seleccionando una de las funciones. Por ejemplo, si se selecciona "Zoom In" y se hace click en el mapa, se hará un zoom en la zona seleccionada. También es posible interactuar con el mapa usando el teclado o el ratón. [17]

Algunas de las funciones de la barra (Figura 3.2) realizan una acción inmediata: “Previous Extent”, “Next Extent”, “Zoom to Full Extent” y “Borrar gráficos”. Otras, sin embargo, necesitan que haya una interacción previa con el mapa: “Zoom In”, “Zoom Out”, “Pan”, “Identify” y “Measure distance or area”.








NOMBRE	ICONO	DESCRIPCIÓN
<b>Zoom In</b>		<b>Hacer click y arrastrar un rectángulo:</b> Hacer click en un punto con el botón izquierdo del ratón y mantenerlo pulsado. Será una esquina del rectángulo para hacer el zoom. Arrastrar el ratón hasta la otra esquina del rectángulo y soltar el botón. Se realizará un zoom en el área del rectángulo.
<b>Zoom Out</b>		<b>Hacer click y arrastrar un rectángulo:</b> se quitará zoom al mapa para que para que su área actual encaje en el rectángulo dibujado. Cuanto mas pequeño se dibuje el rectángulo, más zoom se quitará.
<b>Pan</b>		<b>Hacer click y arrastrar el mapa:</b> Hacer click en un punto con el botón izquierdo del ratón y mantenerlo pulsado. El mapa se desplazará de la posición inicial hasta la que se ha arrastrado.
<b>Previous Extent</b>		Carga la extensión previa del mapa en la sesión actual.
<b>Next Extent</b>		Carga una extensión posterior del mapa en la sesión actual.
<b>Full Extent</b>		<b>Full extent:</b> Quita el zoom del mapa para mostrar todos los elementos y capas. La herramienta activa no cambia.
<b>Identify</b>		<b>Seleccionar identify:</b> Click con el botón izquierdo del ratón en el mapa. Ver <u>“Identificar Elementos en el Mapa”</u> y Panel <u>“Results”</u> para saber usar la información.
<b>Measure</b>		<b>Medir distancias o áreas.</b> Ver <u>“Medir distancias y Áreas”</u> para usarlo.

Figura 3.2. Barra de herramientas en ArcMap [17]

### 3.3- GESTIÓN DE BASES DE DATOS

A continuación, en este apartado, se especificarán las características más importantes de RADIOGIS de una manera más detallada, los cuales se han empleado en el desarrollo de este proyecto.

RADIOGIS [3] incluye funciones de gestión de bases de datos de coberturas radioeléctricas, sistemas de potencia, emplazamientos, mejores servidores, cálculos de porcentajes de cobertura y campañas de medidas. En todas las bases de datos la herramienta introduce las opciones de ‘consultar’, ‘copiar’, ‘eliminar’ y algunas particularidades para cada una de las bases de datos.

Este apartado se va a centrar en ‘base de datos de coberturas radioeléctricas’ y ‘base de datos de emplazamientos’.



La **base de datos de coberturas radioeléctricas**, que se muestra en la figura 3.3, contiene registros con las distintas coberturas radioeléctricas calculadas y almacenadas. Cada cobertura radioeléctrica tiene asociada una estructura de tipo raster donde se almacenan los valores de potencia para cada una de las celdas de la zona donde se ha calculado la cobertura y una estructura de tipo vectorial (figura 3.4) cuya tabla de atributos contiene información relativa a los parámetros que se han utilizado durante la simulación (PIRE, Sensibilidad del receptor, frecuencia, diagrama de radiación de las antenas, orientación del diagrama, modelo de propagación, etc).

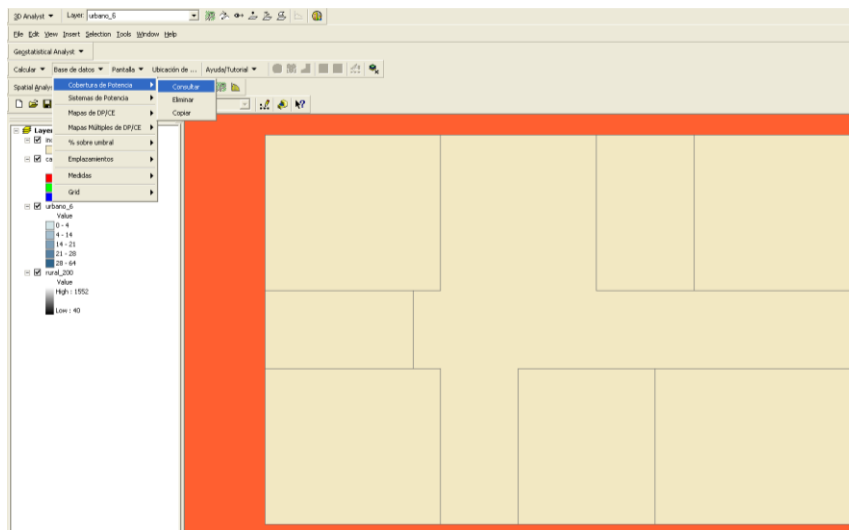


Figura 3.3. Cobertura consultada en base de datos

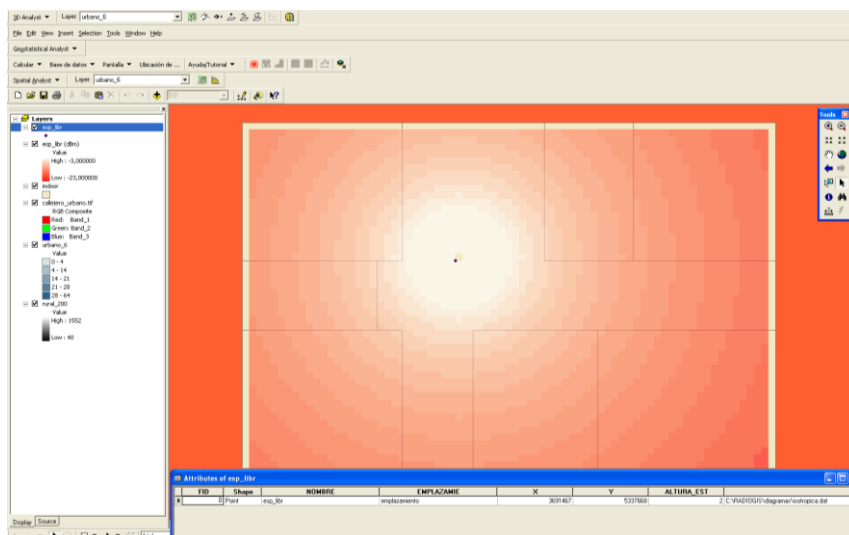


Figura 3.4. Tabla de atributos de la cobertura radioeléctrica

En el caso de la **base de datos de emplazamientos**, el usuario, además de emplazamientos individuales (para cada emplazamiento se genera una capa vectorial con su tabla de atributos asociada que contiene información relativa a la posición geográfica, etc.), puede definir grupos de emplazamientos aprovechando las estructuras de datos que ofrece Arcview, como se observa en la Fig. 3.5:

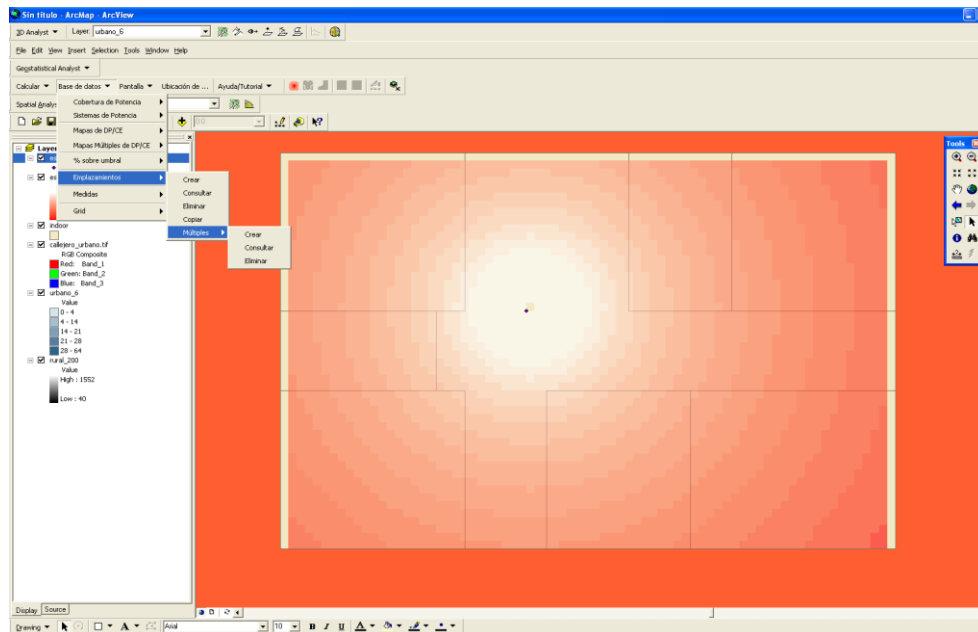


Figura 3.5. Base de datos de emplazamientos

### 3.4- MODELOS DE PROPAGACIÓN

Los modelos de propagación tienen como objetivo el cálculo de las pérdidas de propagación. Estas pérdidas son una primera estimación del valor de la señal en el receptor y son pérdidas en gran escala. De este modo más específico podemos considerarlas como el valor medio de pérdidas que se emplearía en un modelo estadístico. Sobre el valor estimado por el modelo existirán variaciones aleatorias provocadas por el carácter aleatorio de los elementos del canal. Por todo ello, a la pérdida estimada en el canal se le denomina pérdida básica de propagación [1], [2].

Entre el transmisor y el receptor existen numerosos elementos tales como edificios, árboles, señales de tráfico y un sinfín de obstáculos que influyen en las pérdidas.

Se pueden clasificar los modelos de propagación en cuatro [2]:

- **Modelos de entornos rurales.** Estos modelos se utilizan en espacios abiertos en los que el grado de urbanización es reducido e inexistente. Estos modelos se suelen utilizar en zonas montañosas en el diseño de radioenlaces entre

antenas. Modelos de este tipo son: el Bullington, el EMP, el Wilkerson, el Epstein-Peterson, el Deygout, y el modelo generalizado UITR-526.

- **Modelos de entornos urbanos macrocelulares.** Este tipo de modelos sirven para predecir las pérdidas de propagación en células grandes de los sistemas de comunicaciones móviles. Algunos de ellos sirven también para entornos rurales, en particular para pueblos y pequeñas urbanizaciones. Estos modelos se conocen como: Okumura-Hata, Walfisch-Bertoni, Walfisch-Ikegami o COST-231.
- **Modelos de entornos urbanos microcelulares.** Al igual que los anteriores son empleados en sistemas de comunicaciones móviles, pero cuando las células son más pequeñas. El método empleado para evaluar las pérdidas suele ser diferente de los métodos de las macrocélulas. Se conocen algunos modelos de este tipo: modelo de Kaji-Akeyama, Har-Xia-Bertoni, Lanzado de rayos.
- **Modelos en entorno de interiores.** Son modelos adecuados para las células de tamaño más reducido, es decir, para aquellas situadas dentro de los edificios. Algunos son similares a los modelos de microcélulas. Los modelos en este tipo de entornos se clasifican en dos grupos: modelos empíricos y semi-deterministas.

#### 3.4.1- Modelos de propagación. Espacio libre

Los modelos de propagación de gran escala buscan predecir las pérdidas medias de la señal para distancias arbitrarias entre el transmisor y el receptor. Por este motivo, se utilizan para el cálculo de la cobertura de un transmisor. [2]

El modelo de espacio libre se usa para calcular el nivel de la señal recibida cuando existe visión directa (rayo directo), es decir, sin ningún tipo de obstáculos de los que se ha hablado anteriormente entre el transmisor y el receptor (Figura 3.6).

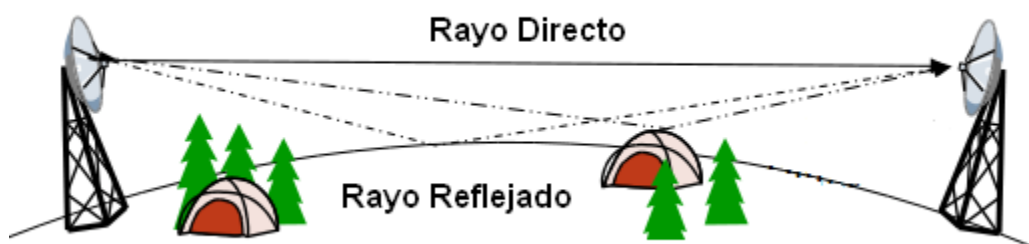


Figura 3.6. Rayo directo en el modelo de espacio libre [19]

Como la mayor parte de los modelos en gran escala la potencia recibida decae en función de la distancia que separa el transmisor y el receptor.

Utilizando este método de propagación las pérdidas se calcularán sin tener en cuenta ningún obstáculo suponiendo un medio dieléctrico homogéneo, teniendo en cuenta la siguiente expresión (1):

$$L(\text{dB}) = 32,45 + 20\log_{10}(f(\text{MHz})) + 20\log_{10}(d(\text{km})) \quad (1)$$

El método de espacio libre se puede utilizar para cualquier rango de frecuencias y alturas del transmisor y receptor.

### *3.4.2- Modelos de propagación en entornos interiores.*

La propagación en interiores [1] considera los fenómenos de reflexión, dispersión y difracción; pero bajo condiciones mucho más variables que las que se acostumbra considerar para los modelos anteriores.

Las menores distancias transmisor-receptor dificultan asegurar la radiación en el campo lejano para todos los receptores y tipos de antenas.

La propagación en interiores no está influenciada por el perfil del terreno como la propagación en entornos abiertos, pero puede ser afectada por la estructura del edificio, es decir, por ejemplo, con el mobiliario y las estructuras metálicas incrustadas en techos y paredes. La señal transmitida alcanza al receptor por más de una trayectoria o ruta, a través de reflexión, refracción y difracción de las ondas de radio a causa de objetos como paredes, ventanas y puertas dentro del edificio.

Los modelos en este tipo de entornos se clasifican en dos grupos al igual que los modelos micro celulares: modelos empíricos y semi-deterministas. Después, los modelos empíricos se dividen en modelos de banda ancha y en modelos de banda estrecha. Los primeros estiman mediante campañas de medida el perfil de retardo normalizado (PDP) por lo que permiten estudiar las características de dispersión y de frecuencia de la señal. Los segundos estiman las pérdidas de propagación.

En este proyecto, se va a estudiar con más detalle los modelos semi-deterministas, pues son los que se han empleado para la resolución de este trabajo.

#### *3.4.2.1- Modelos Semi-deterministas*

Como se ha comentado anteriormente, los modelos semi-deterministas intentan simular físicamente la propagación de las ondas electromagnéticas que surgen del transmisor. La teoría de la óptica geométrica permite realizar dicha simulación de forma relativamente sencilla. Es importante saber que los obstáculos del canal deben ser mucho mayores que la

longitud de onda para poder aplicar la teoría óptica. En un entorno interior los obstáculos son más pequeños que los objetos del entorno exterior, sin embargo, las frecuencias de los sistemas de radiocomunicaciones empleados en este tipo de entornos son elevadas por lo que la longitud de onda es muy pequeña si la comparamos con las dimensiones de los objetos. [18]

- **Lanzado de rayos.** Es la alternativa a la teoría de imágenes dentro de los modelos de trazado de rayos [20].

Este método considera un haz de rayos transmitidos, los cuales pueden o no alcanzar el receptor. El número de rayos considerados y la distancia entre el transmisor y el receptor determinan la resolución espacial disponible y, por lo tanto, la exactitud del modelo.

Este método requiere unos requisitos computacionales mayores que el método de la imagen. El procedimiento consiste en determinar la cantidad de direcciones finitas de propagación desde la fuente, esto normalmente se realiza con una separación angular constante. Si un rayo intercepta un objeto, entonces se genera un rayo reflejado y otro refractado. Si un rayo intercepta una cuña, entonces se genera una familia de rayos difractados.

Un rayo se tomará como recibido si su trayectoria intercepta el círculo de recepción. Para la construcción del círculo de recepción es necesaria la definición de un radio, denominado radio de impacto. Es entonces cuando la importancia mencionada del radio es crítica (Figura 3.7) [20]:

- Si el radio es demasiado grande, se pueden recibir dos rayos y el mismo rayo especular se puede contar dos veces.
- Si el radio es demasiado pequeño, es posible que ninguno de los rayos alcance la esfera de recepción y el rayo especular será excluido.

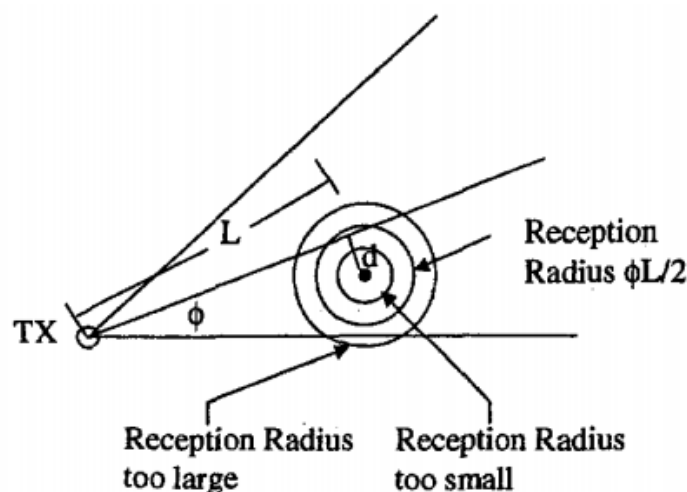


Figura 3.7. Longitud adecuada del radio de la esfera para recibir un rayo. Caso 2D [20]

Para cada localización del receptor, se computa la distancia perpendicular,  $d$ , del receptor al rayo, junto con la longitud (revelada) total del rayo-trayectoria,  $L$ , de la fuente al punto de proyección perpendicular. Si  $d$  es mayor o igual que  $(\Phi) / 2$  para el caso de dos dimensiones, o  $(\Phi) / \sqrt{3}$  para el caso tridimensional, se considera que el rayo no alcanza la localización del receptor. Aquí,  $\Phi$  es el ángulo entre dos rayos. Sino, se considera que el rayo contribuye a la señal recibida.

No hay esfera de recepción asociada con el método de las imágenes. Las partes fundamentales del método del trazado de rayos son la generación y la descripción de los rayos. Hay dos clases de métodos para obtener los rayos en el punto fuente. Uno es una aproximación en dos dimensiones (2D), el otro es un método tridimensional (3D)

- Trazado de rayos.** Este método consiste en la sustitución del plano por una fuente virtual [18]. En la práctica el obstáculo que comúnmente nos encontramos siempre es el suelo. Mediante la reflexión se transmite parte de la energía dirigida, siendo la cantidad de energía reflejada dependiente de la geometría y parámetros del suelo. Normalmente el suelo es un medio con pérdidas ( $\sigma$  distinto de cero) cuya conductividad efectiva crece con la frecuencia. Por lo tanto, es normal esperar que actúe como un buen conductor por encima de una cierta frecuencia, en función a su contenido en humedad. Para simplificar el análisis se puede asumir que el suelo es un conductor eléctrico perfecto, orientado horizontalmente e infinito en extensión. Este procedimiento es extensible al análisis de características de algún elemento radiante próximo a algún otro conductor de la misma naturaleza, es decir, conductividad perfecta, horizontal e infinita. Es imposible trabajar con dimensiones infinitas, pero sí que es posible hacerlo con elementos muy grandes. Para analizar el comportamiento de un elemento radiante próximo a un plano conductor infinito se introducirán fuentes virtuales, llamadas imágenes, que tendrán efecto para la reflexión. Como indica su nombre, esta fuente no es real, sino que es imaginaria y su combinación con las reales dan lugar a un nuevo sistema equivalente que reemplazaría al original. Entonces se haría uso de una nueva geometría o sistema que sólo sirva para obtener un resultado equivalente al del problema original. Se asume que un dipolo vertical (elemento radiante) está situado a una distancia ' $h$ ' sobre un conductor perfecto, plano e infinito, como se muestra a continuación (Figura 3.8) [20]:

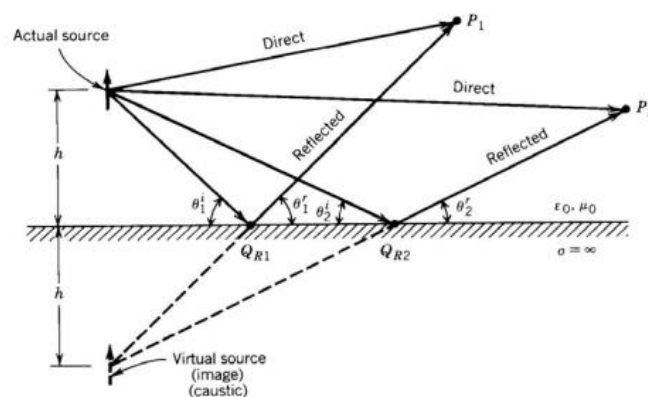


Figura 3.8. Dipolo vertical y su imagen para determinar la reflexión sobre un conductor [20]

Se asume que no hay acoplamiento mutuo y que la energía es radiada en todas direcciones, de este modo, en el punto P1 habrá un rayo directo, además de uno reflejado procedente del punto QR1.

Se deduce por lo tanto que la energía en medios homogéneos describe trayectorias rectas describiendo los caminos más cortos. La onda que llega entonces al punto de observación P1 mediante la reflexión parece originada por la imagen de la fuente a una distancia 'h' por debajo del conductor. Si se atiende al transmisor situado en P2 el punto de reflexión es QR2 pero la imagen sigue siendo la misma que antes.

Siguiendo un procedimiento similar al del dipolo vertical, vemos que la imagen virtual también se sitúa a una distancia h por debajo de la interfaz del plano conductor, pero con una diferencia de fase relativa de  $\pi$  radianes respecto a la fuente original. Esto hace que sea necesario un coeficiente de reflexión igual a -1 (reflexión soft).

## Capítulo 4. Metodología

---



En este apartado del proyecto, se va a explicar de una manera detallada todos los pasos que se han seguido en la realización del mismo.

## 4.1- CÁLCULO DE COBERTURA

En este apartado, se calculará un mapa de cobertura radioeléctrica estimado mediante RADIOGIS a partir de modelos de propagación.

### 4.1.1. Entorno RADIOGIS

En primer lugar, se debe abrir la aplicación RADIOGIS (ver Figura 4.1).

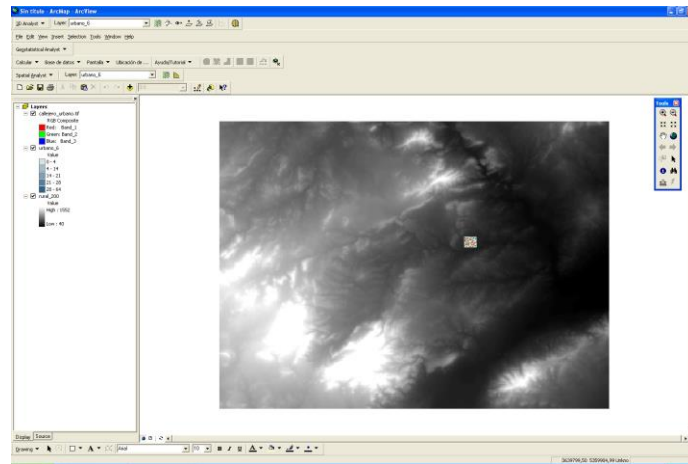



Figura 4.1. Entorno de RADIOGIS

Seguidamente, haciendo uso de la herramienta de aumento (icono ) , seleccionaremos el entorno urbano que aparece como un pequeño cuadrado amarillo en la figura 4.2, y aparecerá lo siguiente:

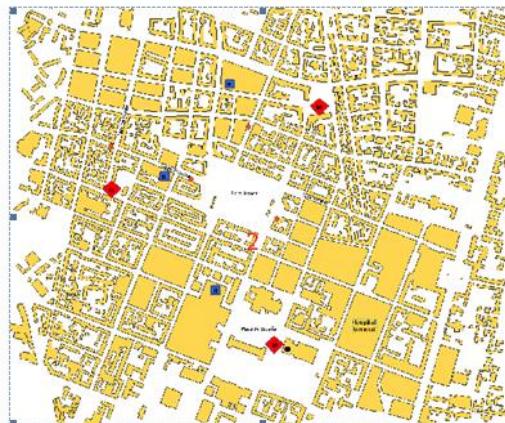


Figura 4.2. Mapa perteneciente al entorno de RADIOGIS

Si a su vez, sobre la figura actual se aplica otra vez la herramienta de aumento sobre el pequeño punto negro que aparece junto a la denominada como “Plaza de España”, se obtendrá el entorno “indoor” donde se va a trabajar (Figura 4.3)

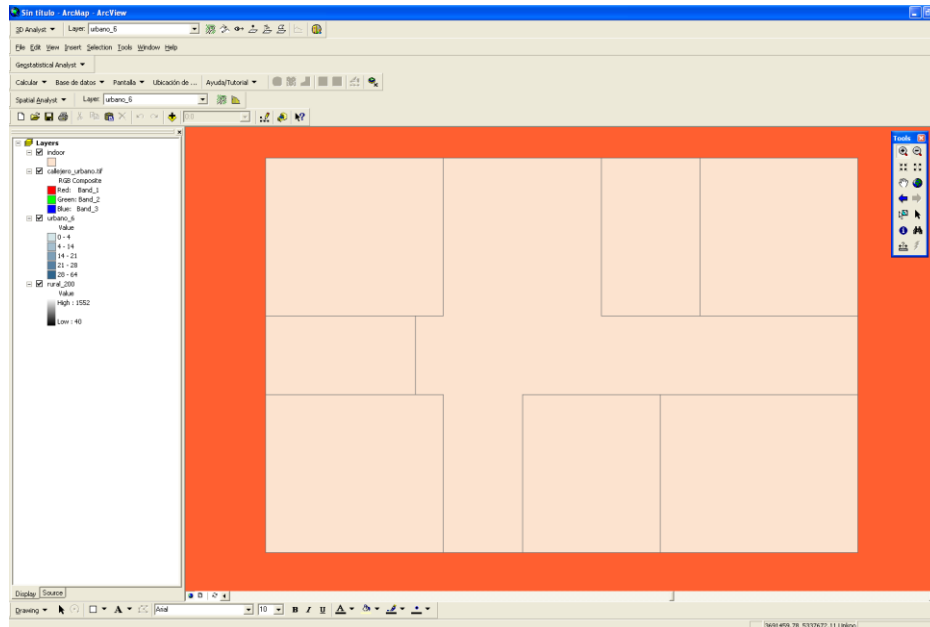


Figura 4.3. Entono indoor dentro del mapa cargado en RADIOGIS

A continuación, se procede al cálculo de la cobertura Indoor (Figura 4.4) sobre el entorno seleccionado. Para ello, seleccionamos *Calcular-> Cobertura de Potencia -> Datos Cobertura -> Nueva*:

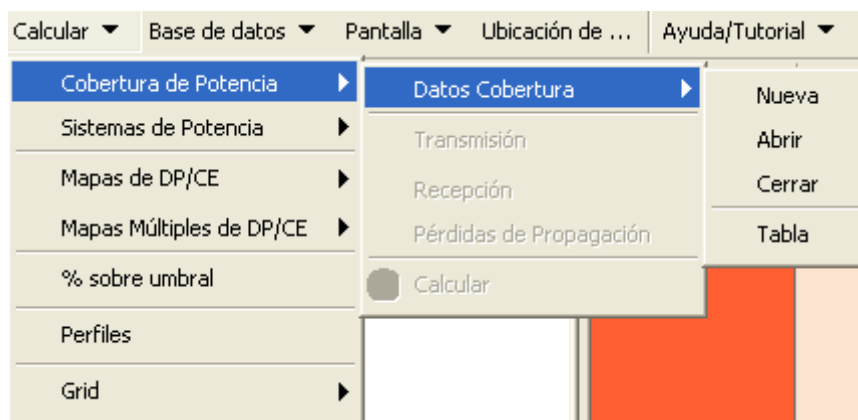


Figura 4.4. Ventanas pertenecientes a la cobertura de potencia

Una vez puesto nombre a la cobertura que se quiere hallar, se precede a la selección de Parámetros para la simulación:

### Datos a utilizar en RADIOGIS:

#### Transmisión:

- Potencia isotrópica radiada equivalente PIRE: 30 dBm

#### Recepción:

- Ganancia  $G_r=0$  dB
- Pérdidas  $L_r=0$  dB
- Sensibilidad  $S$ . Estimar la cobertura para el peor caso.  $S = -120$  dBm

#### Pérdidas de propagación.

##### Estación Base:

- Emplazamiento: emplaza

La estación base está ubicada en las siguientes coordenadas:

Nombre	Coordenada X(m)	Coordenada Y(m)
emplaza	3691467	5337668

- Altura: 2 m
- Diagrama de radiación: isotrópico

##### Estación móvil:

- Altura: 2 m
- Diagrama de radiación: isotrópico

##### Parámetros comunes:

- Polarización: Vertical
- Capa vectorial: *indoor* (para realizar los cálculos seleccione todas las paredes)
- Resolución: 0.2 metros

##### Zona de cálculo

- Rectangular (xsi (m): 3691460.96, ysi (m): 5337672.14, xid (m): 3691476.02, yid (m): 5337662).

La potencia recibida en cada celda se calcula con la siguiente expresión (2):

$$Pr(dBm) = PIRE(dBm) - L(dB) - Lr(dB) + Gr(dB) \quad (2)$$

Donde L(dB) son las pérdidas por propagación estimadas según el modelo de propagación que corresponda.

Estos valores no se van a cambiar en ninguna de las simulaciones realizadas. Pero hay otros parámetros que sí, estos son visibles en la figura 4.5.

El esquema a seguir para el cálculo de coberturas fue el siguiente:

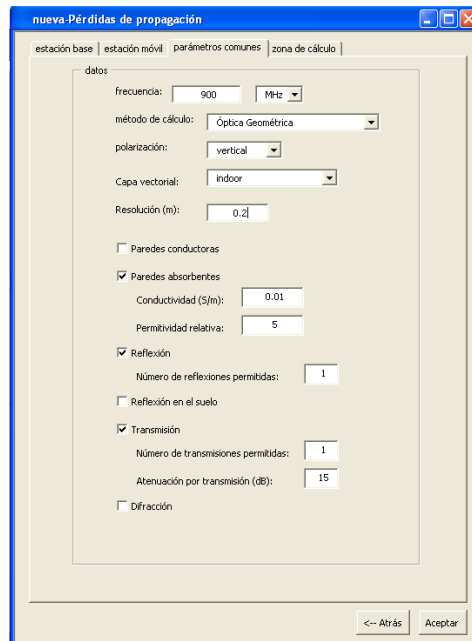
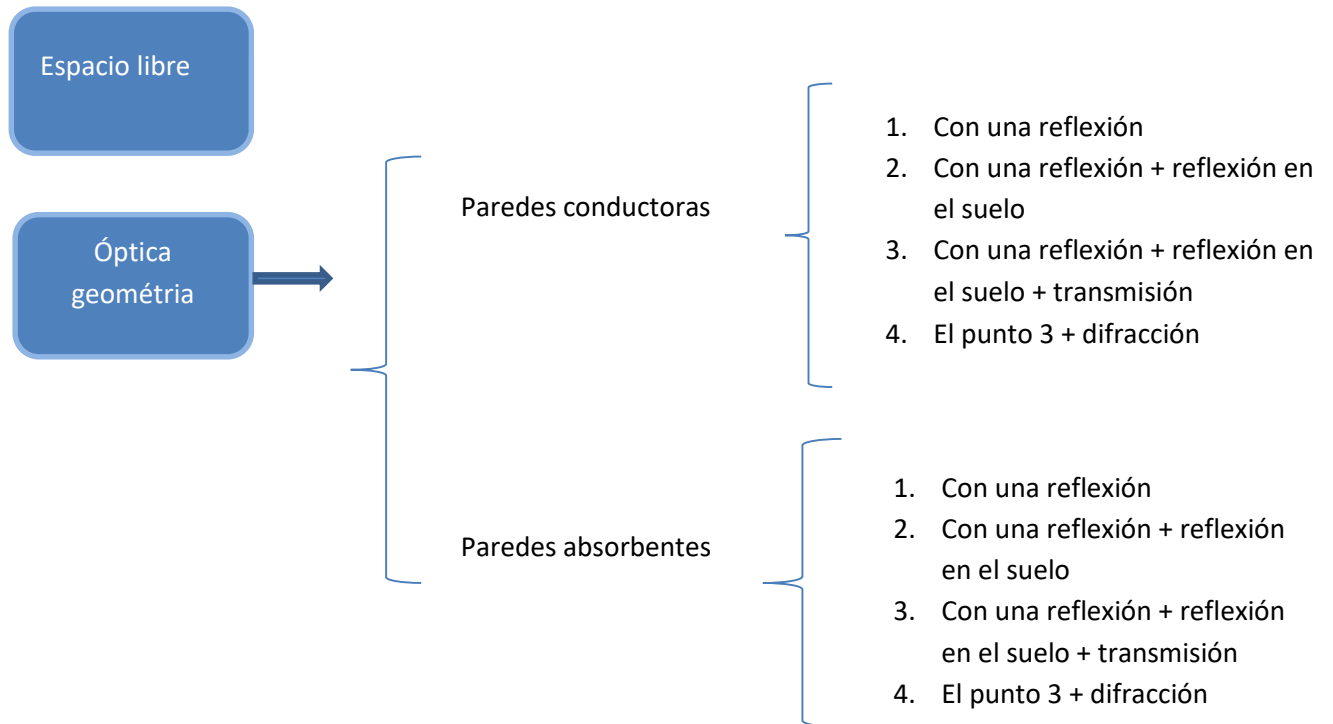


Figura 4.5. Parámetros comunes en una cobertura radioeléctrica generada en RADIOGIS

## 4.2-MATLAB

Se trata de realizar un programa en Matlab, el cual sea capaz de crear un archivo donde aparezcan todos los valores de potencia que en hay en cada celda de la matriz de cobertura radioeléctrica para un perfil determinado entre transmisor y receptor.

- Primero, en el entorno del SIG, convertimos el raster (la cobertura radioeléctrica) hallado a capa ASCII, para ellos se selecciona desde el menú RADIOGIS la pestaña *Calcular* → *Grid* → *Grid a ASCII* (ver Figura 4.6):

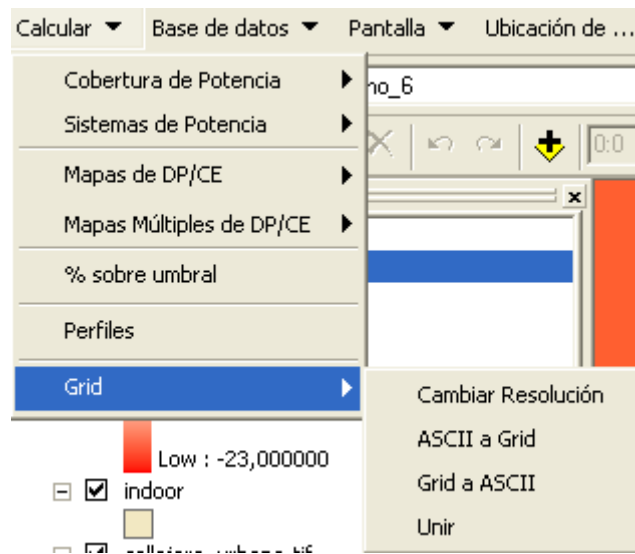


Figura 4.6. Herramienta perteneciente a RADIOGIS

- A continuación, se pulsa '*explorar*' en Source y se selecciona el raster que se quiere pasar a ASCII

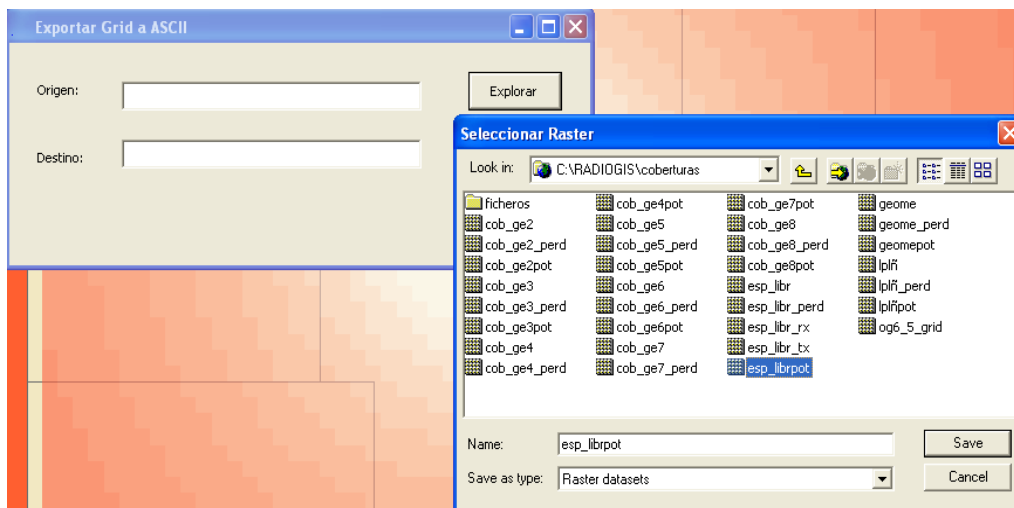


Figura 4.7. Elección de una cobertura hallada en RADIOGIS para su exportación

- En el destino se da un nombre a la capa ASCII con la simulación de la cobertura, y se pulsa **Exportar**:

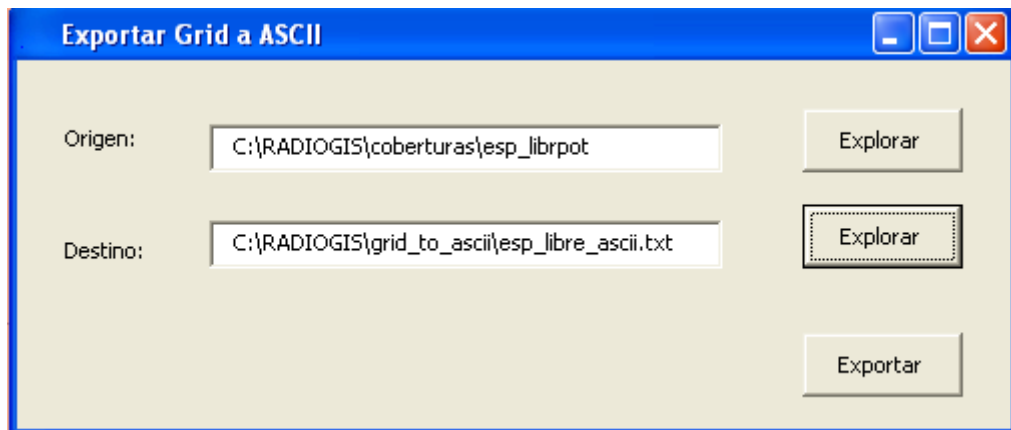


Figura 4.8. Exportación de una cobertura de Grid a Ascii

En el entorno de Matlab, se usará como ejemplo una cobertura hallada: co\_espacio\_libre.

En primer lugar, se carga el fichero ASCII (con la cabecera eliminada):

```
ncols    75
nrows    50
xllcorner 3691460,96
yllcorner 5337661,95
cellsize  0,19999999998137
NODATA_value -9999
```

Se reemplazará la potencia recibida sin datos -9999 por un valor inferior a su sensibilidad.

Este fichero será el hallado en RADIOGIS anteriormente con las siguientes características:

- *PIRE* = 30 dBm
- *Lr* = 0 dB
- *S* = -120 dBm
- *f* = 900MHz
- *Altura(m) sobre el suelo de la estación base y la estación móvil* = 2
- *Método de cálculo* = Espacio libre
- *Antena isotrópica*

```
close all
clear all
clc

Potrx = load('esp_libre.txt')

S=-130
```

```

[filas, columnas]=size(Potrx);

for i = 1:filas
    for j = 1:columnas
        if Potrx(i,j)==-9999
            ind = Potrx(i,j)
            if length(ind)>0
                Potrx(i,j)= -130; %inferior a la sensibilidad
            end
        end
    end
end

resolmdt = 0.2; % resolución impuesta en m del mdt

```

En este punto se han cambiado todos los valores 'NO DATA' por un valor menor al de la sensibilidad, para indicar que son coordenadas donde no llega potencia.

A continuación, se saben los valores de posición del transmisor, además de la coordenada del punto superior izquierdo, el cual equivale a Potrx (1,1), así que de este modo se pueden saber las coordenadas de los puntos de las demás esquinas (ver Figura 4.9):

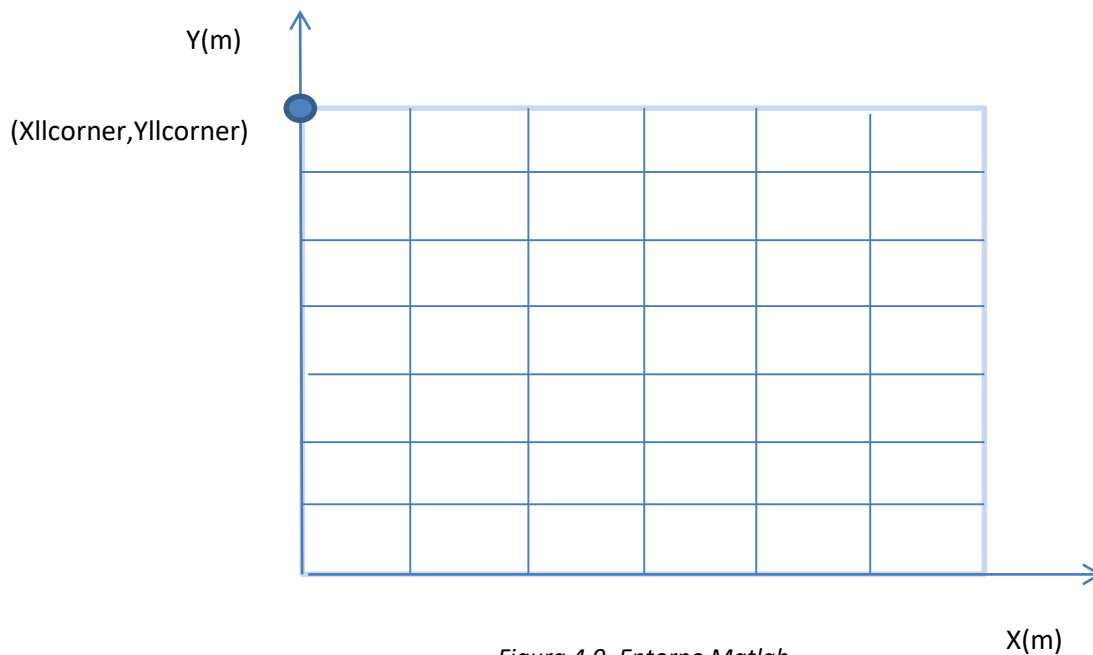


Figura 4.9. Entorno Matlab

En segundo lugar, se calcula la posición del receptor dividiendo el MDT en cuatro cuadrantes, centrados en la posición del transmisor como se observa en la figura 4.10.

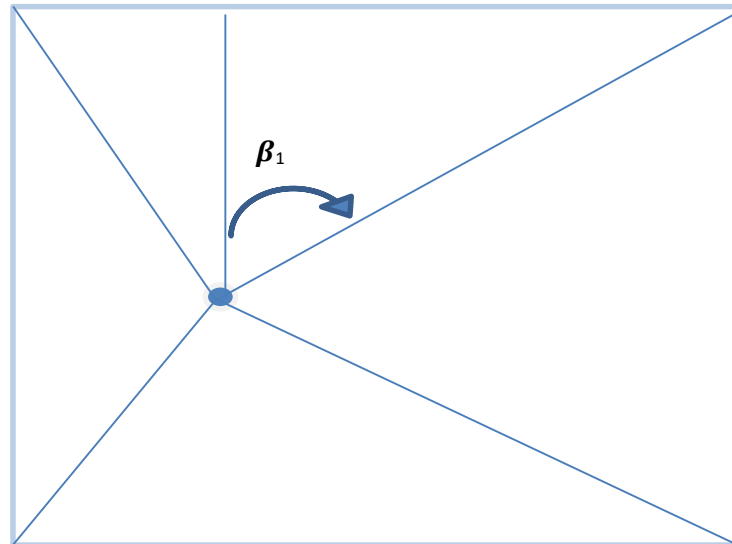


Figura 4.10. División del MDT en cuatro cuadrantes, centrados en la posición del transmisor

Una vez que localizado el receptor para ese perfil, con ángulo beta, se calcula la distancia entre transmisor y receptor, a partir de la fórmula (3).

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (3)$$

Seguidamente obtenemos por interpolación las potencias o pérdidas recibidas de los puntos entre el transmisor y receptor, mediante la fórmula (4):

$$\frac{\frac{V1}{d1^2} + \frac{V2}{d2^2} + \frac{V3}{d3^2} + \frac{V4}{d4^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{di^2}} \quad (4)$$

Para terminar, se muestra el perfil (Figura 4.11):

```
figure
plot(distancia(1:N), potperfil, 'k.-');
xlabel('Distancia (m)'), ylabel('Pot rx (dBm)'), title('Potencias
recibidas interpoladas entre Tx y Rx'),
grid, hold on;
```



```

x=linspace(VII(1),VID(1),
columnas);y=linspace(VSI(2),VII(2),filas);[X,Y]=meshgrid(x,y)
figure, pcolor(X,Y,Potrx)
colorbar
hold on, plot(Tx(1),Tx(2),'xr')
plot(P_perfil(1,:),P_perfil(2,:),'.m')
matriz=[P_perfil(1,1:N)' P_perfil(2,1:N)' potperfil']

```

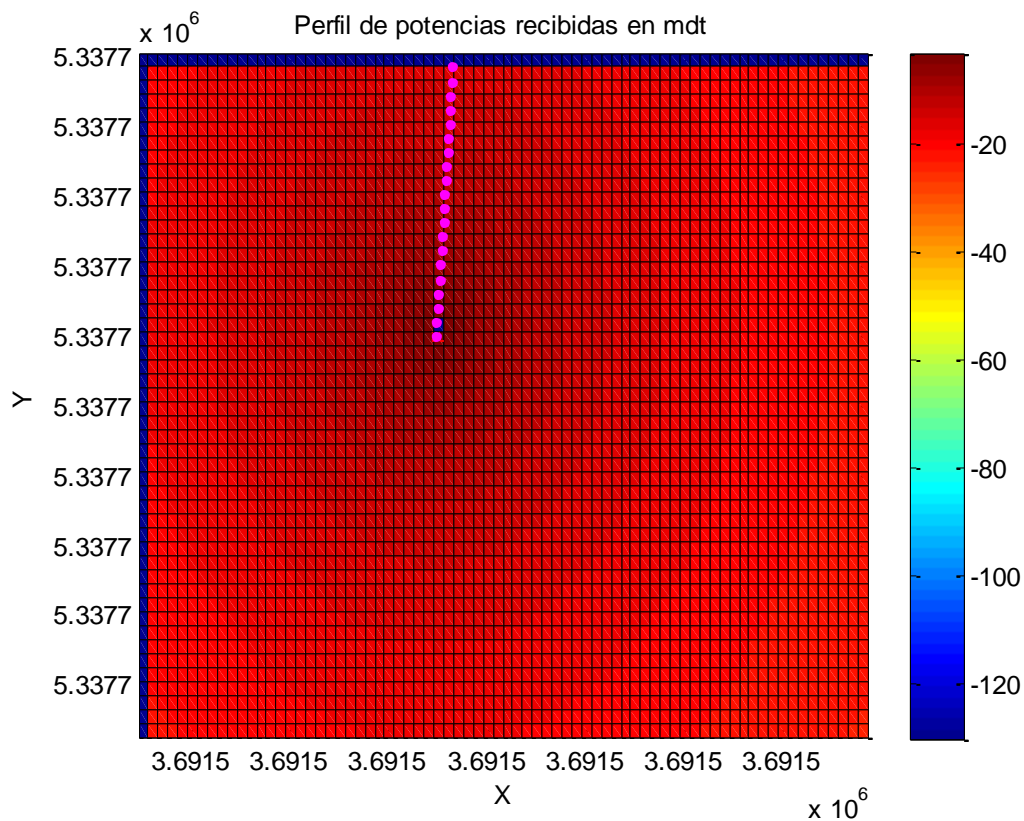


Figura 4.11. Perfil de potencias recibidas

Se observan dos aspectos en la figura 4.12, el primer aspecto es cómo a distancias mayores entre el transmisor y receptor, la potencia recibida en recepción es menor, valor negativo mayor, comprobando que se trata de un resultado correcto comparándolo con el fichero ASCII cargado previamente.

En segundo lugar, una zona cercana al transmisor donde la potencia está muy cerca de ser positiva, este hecho es debido a la distancia. En algunas simulaciones habrá un pico pequeño al principio de la figura donde la potencia sí que será positiva.

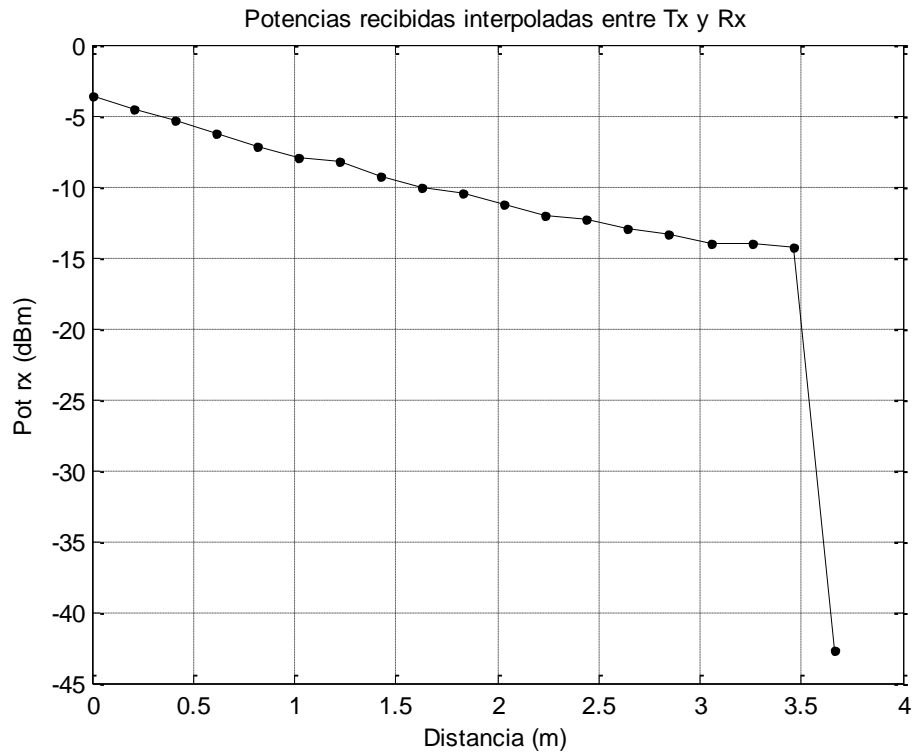


Figura 4.12. Potencias recibidas interpoladas entre Tx y Rx

La finalidad, es conseguir un archivo con todos los puntos de potencia, separados una resolución, cada 5, 10, 20, 40 grados en este caso, de esta manera se calculará con la ayuda de la extensión de *Geostatistical Analyst* una predicción de la cobertura con esos puntos de potencia hallados

- Para abrir el archivo del que se ha hablado en el párrafo de arriba, **Base de datos** → **Medidas** → **Consultar**. Nota: debe estar con la extensión *.dbf*.

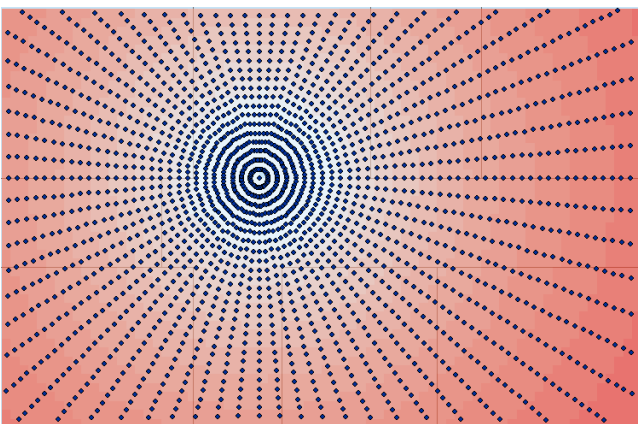


Figura 4.13. Puntos de potencia cada 5 grados

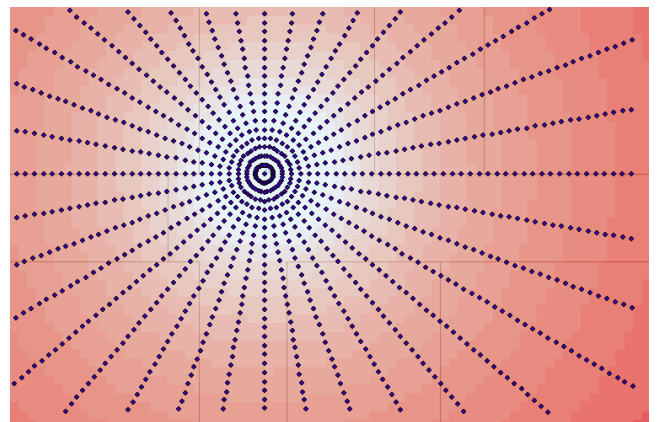


Figura 4.14. Puntos de potencia cada 10 grados

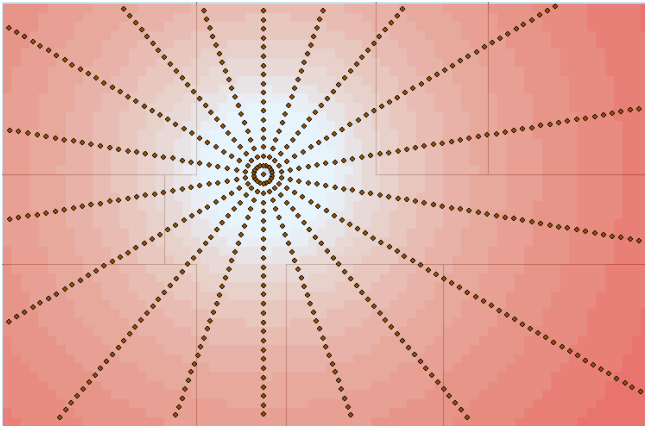


Figura 4.15. Puntos de potencia cada 20 grados

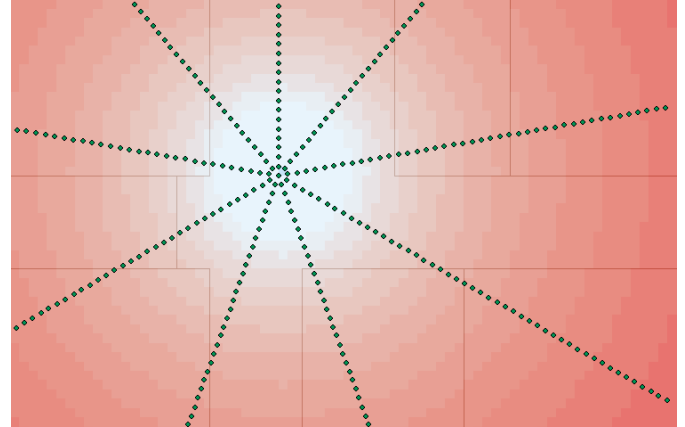


Figura 4.16. Puntos de potencia cada 40 grados

- A continuación, para hallar la predicción de la cobertura, **Geostatistical Analyst** → **Geostatistical Wizard**. Nota: poner como Input Data el archivo con los puntos de potencia calculados y como atributo la potencia.

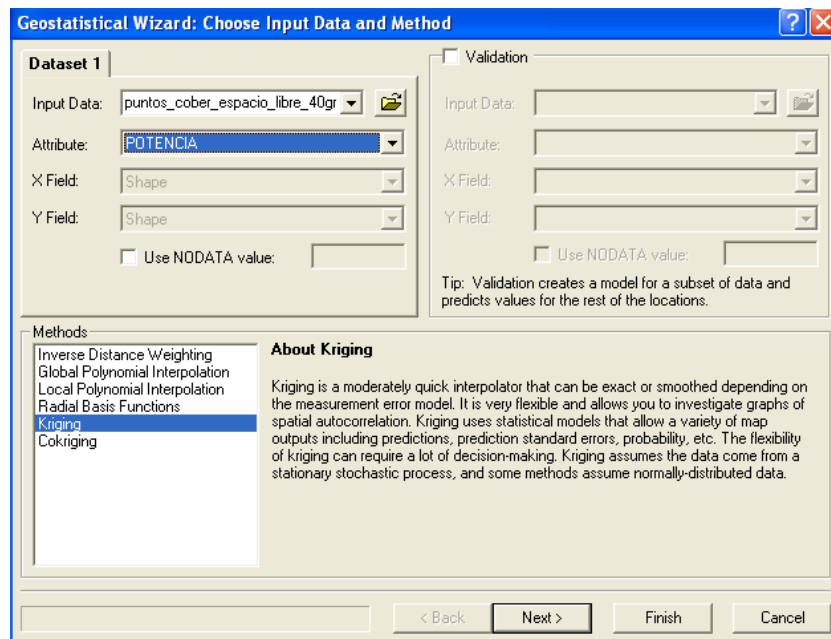


Figura 4.17. Geostatistical Wizard

- Se obtendrá una ventana de diálogo que muestra el **semivariograma**. Se ha querido hacer una comparación de este proceso tanto con un resultado bueno como malo para poder observar las diferencias.

El semivariograma muestra la diferencia cuadrada de los valores entre cada par de puntos a diferentes distancias. El objetivo del modelado de semivarianza/covarianza es determinar el mejor ajuste para un modelo que pasará a través de los puntos del semivariograma.

El semivariograma es una función que relaciona la semivarianza de valores con la distancia que los separa. Su representación gráfica proporciona una imagen de la correlación espacial de dichos valores con sus valores vecinos [21].

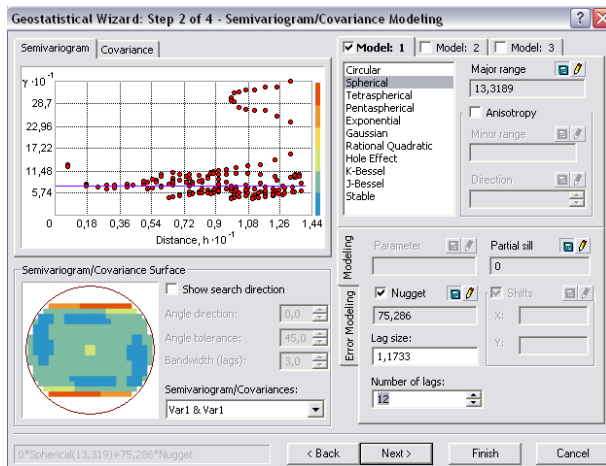


Figura 4.18. Semivariograma del caso mejor

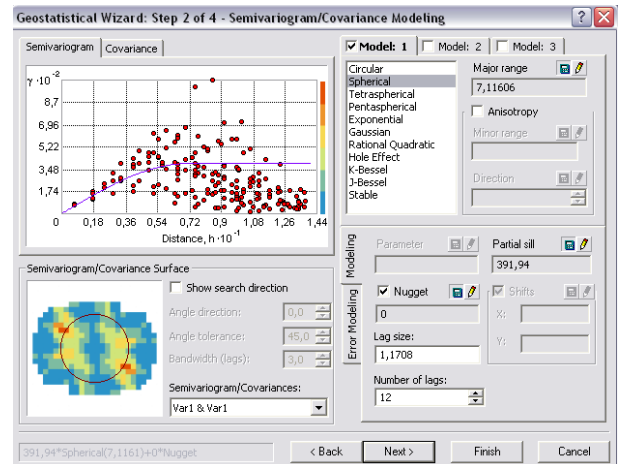


Figura 4.19 Semivariograma del caso peor

A la hora de comparar los dos semivariogramas mostrados se puede llegar a la conclusión de que los valores de covarianza del semivariograma de la izquierda, los cuales son los calculados a partir de los valores de potencia obtenidos cada 5 grados mediante el modelo de propagación Espacio Libre (Figura 4.18), están más concentrados que en el caso de la derecha, valores calculados a partir de los valores de potencia obtenidos cada 40 grados mediante el modelo de propagación Óptica geométrica (Figura 4.19), por lo tanto, muestra que en la Figura 4.18 la correlación entre sus valores es mayor.

- Seguidamente, las siguientes figuras muestran el **Searching Neighborhood**, destacan los puntos usados para predecir valores en celdas en las que no se dispone del valor calculado, es decir, celdas que no se encuentran en los perfiles trazados (ver figura 4.13). Los diferentes colores muestran la diferente importancia que tienen dichos puntos a la hora de calcular la predicción [21].

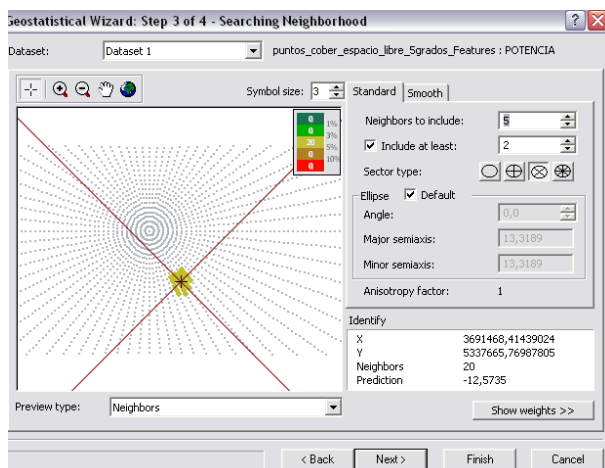


Figura 4.20. Searching Neighborhood del caso mejor

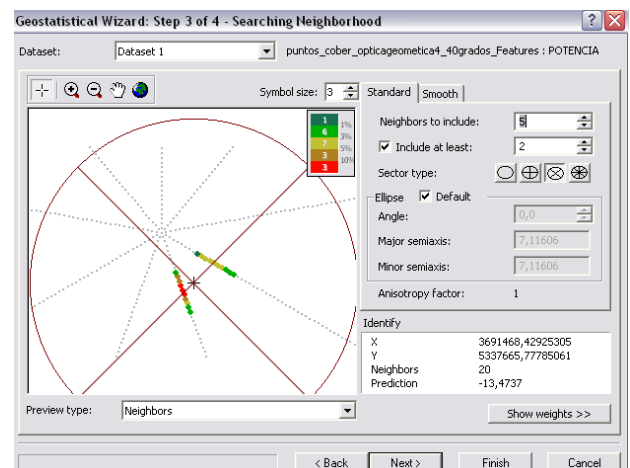


Figura 4.21. Searching Neighborhood del caso peor

La principal diferencia entre ambos casos es que en el modelo de espacio libre (Figura 4.20) todos los valores usados tienen un peso similar para la predicción. Sin embargo, en el modelo de Óptica geométrica (Figura 4.21) la importancia unos valores respecto a otros varía considerablemente. Esto se debe a que la densidad de puntos es mayor en la Figura 4.20 por lo que si los puntos están más próximos van a tener importancias similares.

- Seguidamente, se llega a la ventana de diálogo **Cross-Validation**. La validación cruzada consiste en eliminar datos, uno cada vez, y luego tratar de predecirlos. A continuación, el valor pronosticado puede ser comparado con el valor real para evaluar qué tan bien está funcionando la predicción [21].

Se presenta una gráfica de dispersión de los valores pronosticados frente a los valores reales. Se puede esperar que estos se dispersen alrededor de la línea 1:1 (la línea gris en los gráficos que se muestran a continuación). Sin embargo, la pendiente suele ser mayor que 1. Es una propiedad del kriging que tiende a subestimar los valores grandes y sobreestimar los valores pequeños como se muestra en la siguiente figura.

La línea ajustada a través de la dispersión de puntos se da en azul con la ecuación dada justo debajo del gráfico. Con autocorrelación y un buen modelo de kriging, la línea azul debería estar más cerca de la línea gris 1:1.

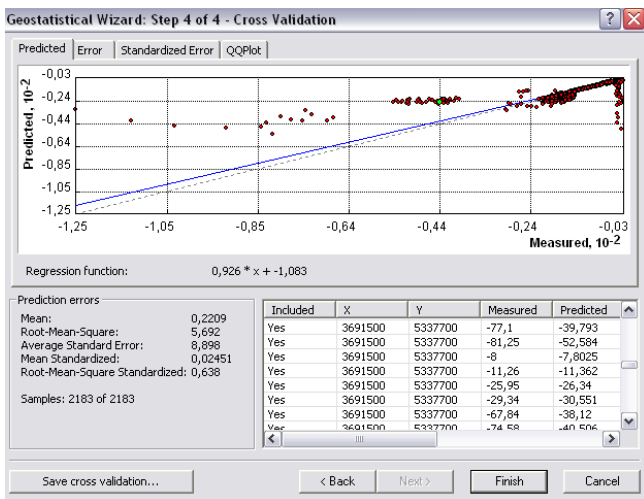


Figura 4.22. Cross-Validation del caso mejor

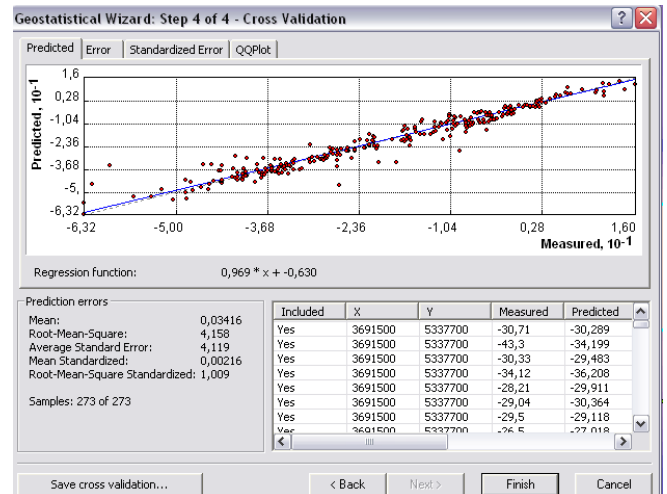


Figura 4.23. Cross-Validation del caso peor

Por último, se obtendrá la **diferencia de potencia** en cada celda entre la cobertura calculada con RADIOGIS y la estimada con Geostatistical Analyst, lo cual es el propósito de este proyecto. Para ello, se restarán dos raster con la ayuda de la extensión Spatial Analyst, el de la cobertura de potencia generada en RADIOGIS desde el principio, y la predicción de la cobertura calculada a partir del procedimiento anterior:

- Primero seleccionamos, Spatial Analyst → Raster Calculator:

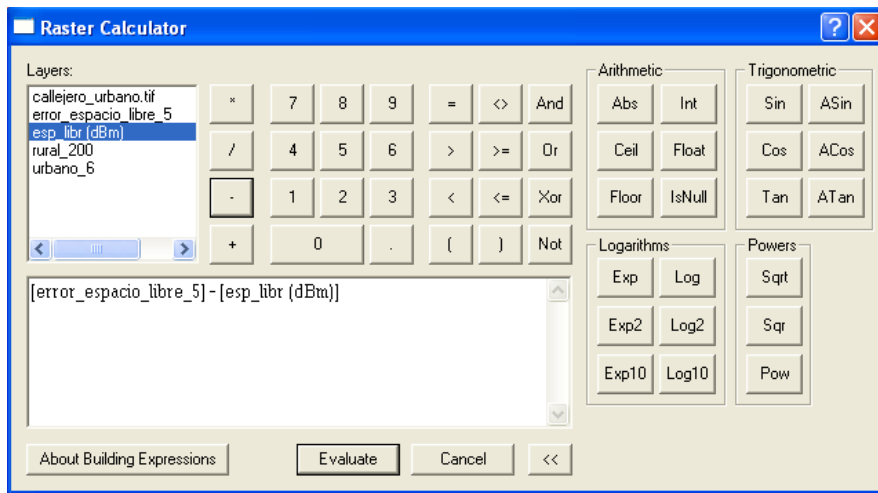


Figura 4.24. Error de la cobertura en espacio libre cada 5 grados

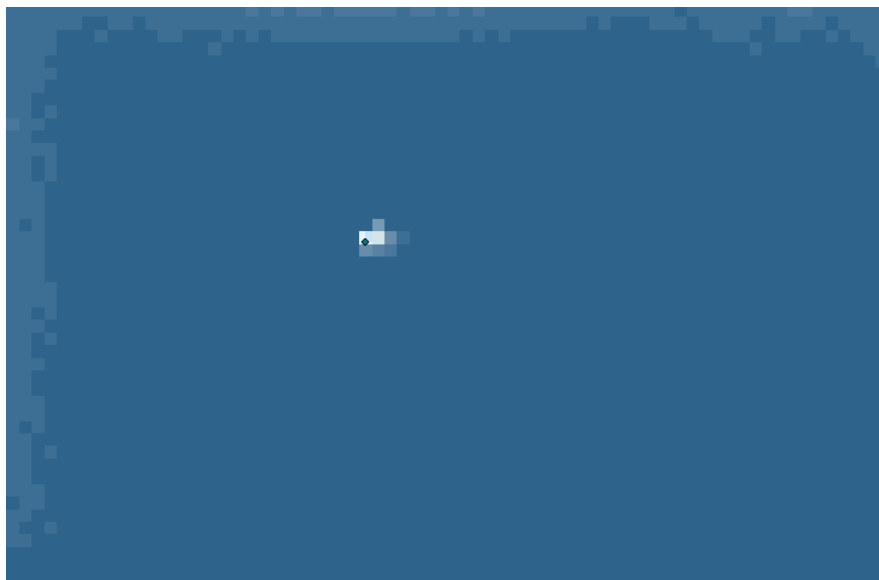
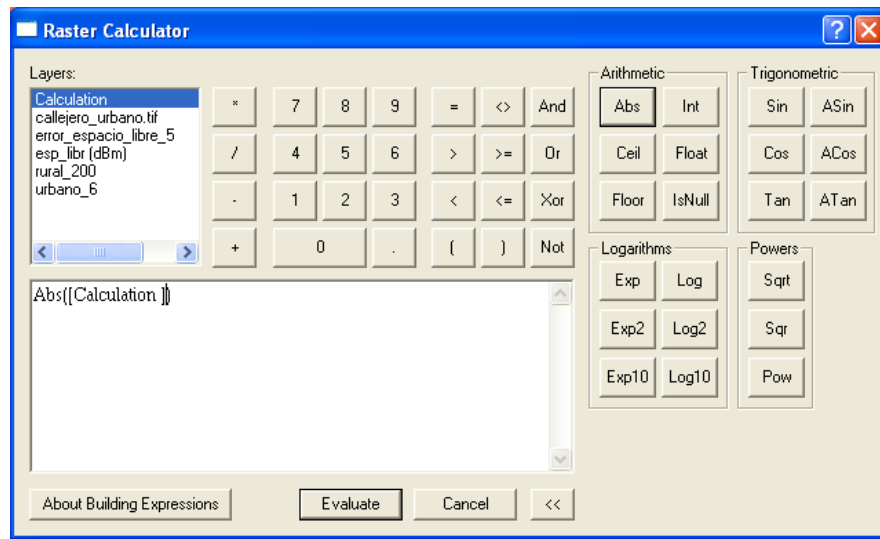


Figura 4.25. Error espacio libre cada 5 grados

Una vez hallado el error, para poder visualizarlo mejor y llegar a una conclusión lo más aproximada y objetiva posible, se va a prescindir de todos los dBs, menos del 0,1,2 y 3. De este

modo se calcularán las cantidades de celdas que tienen esos dBs. *Nota:* los errores tienen que estar en absoluto.

- En primer lugar, **Spatial Analyst** → **Raster Calculator**:



*Figura 4.26. Absoluto del error*

- Seleccionar el error calculado y seguidamente con el botón derecho del ratón pulsar , **Properties** → **Symbology** → **Classify** → **Classes = 5**

# Capítulo 5. Resultados

---



## 5.1- PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

En este apartado se van a presentar todos los resultados finales, especificando a qué método de propagación pertenecen.

El error absoluto es la diferencia entre el valor real de la medida y el valor que se ha tomado en la medición. En este caso es la resta entre la cobertura generada en RADIOGIS y la cobertura predicha a partir de los puntos de potencia adquiridos.

### 5.1.1- Espacio libre

*Cada 5 grados*

A)

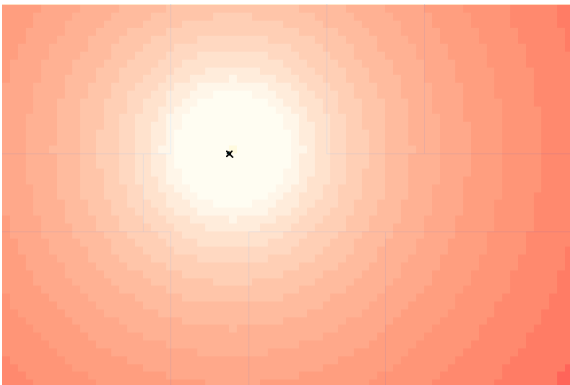


Figura 5.1. Cobertura espacio libre

B)

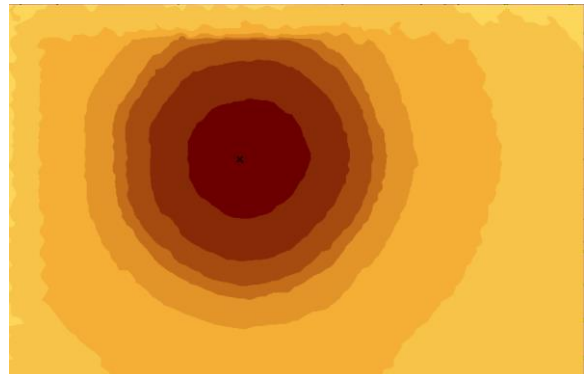


Figura 5.2. Cobertura en espacio libre predicha con puntos cada 5 grados

C)

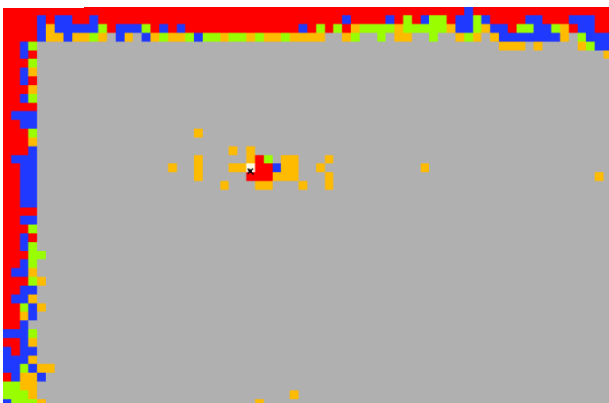


Figura 5.3. Error de la cobertura espacio libre con puntos cada 5 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	2732
1	1	83
2	2	58
3	3	108

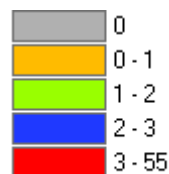


Figura 5.4. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 5 grados

La figura 5.1 representa el mapa de cobertura radioeléctrica estimado mediante RADIOGIS con el modelo de propagación Espacio Libre. A su derecha, se observa la figura 5.2,

la cual muestra el mapa de cobertura predicha, con una serie de circunferencias concéntricas, al igual que el mapa comentado anteriormente. La figura 5.3 simboliza la diferencia entre estos dos mapas de cobertura, que a través de su tabla de atributos (ver figura 5.4) se puede calcular el valor porcentual de esta diferencia, 82.5% de las celdas en el entorno de trabajo tienen una diferencia menor a 1 dB, lo cual es un porcentaje muy bueno que indica que la predicción del mapa de cobertura estimada mediante 'Geostatistical Analyst' es bastante parecida a la original.

### Cada 10 grados

A)

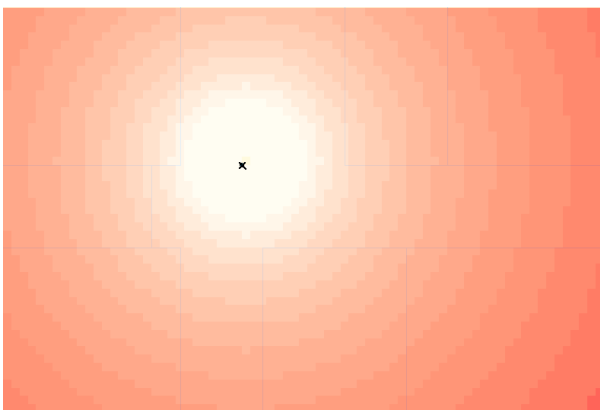


Figura 5.5. Cobertura espacio libre

B)

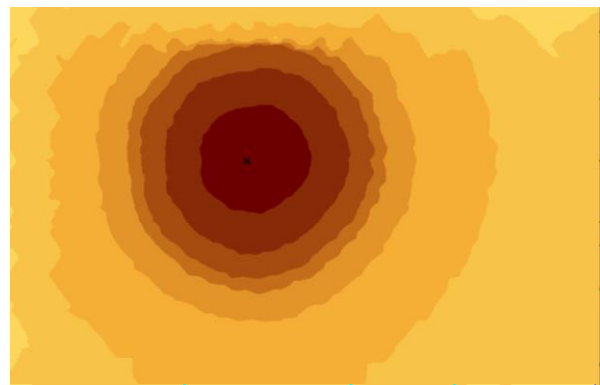


Figura 5.6. Cobertura espacio libre predicha con puntos cada 10 grados

C)

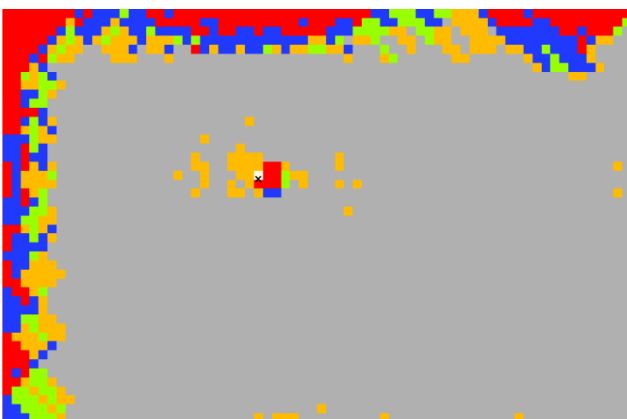


Figura 5.7. Error de la cobertura espacio libre con puntos cada 10 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	2579
1	1	191
2	2	87
3	3	179

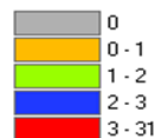


Figura 5.8. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 10 grados

En este apartado se presenta una predicción del mapa de cobertura (ver figura 5.6) cogiendo los valores de los puntos de potencia separados una resolución de 0.2 cada 10 grados, de este modo se observa unas circunferencias concéntricas igual que en el caso anterior, pero sin tanta precisión, puesto que, al coger menos valores de potencia, la predicción es menos exacta.

Una vez hallada la diferencia entre los mapas de cobertura (Figura 5.7) se observa gracias a la tabla de atributos (Figura 5.8) que el 86.3% de las celdas dentro del espacio *indoor* presenta una diferencia menor a 1 dB.

### Cada 20 grados

A)

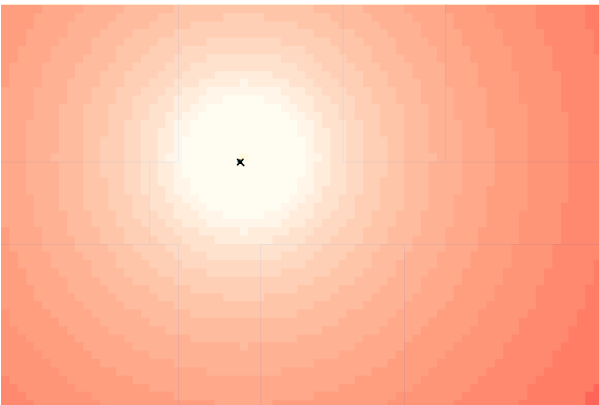


Figura 5.9. Cobertura espacio libre

B)

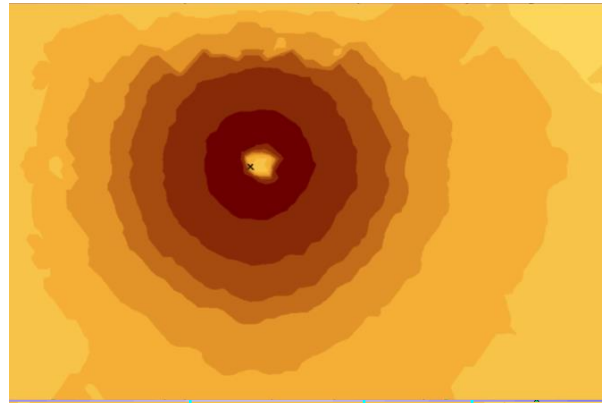


Figura 5.10. Cobertura espacio libre predicha con puntos cada 20 grados

C)



Figura 5.11. Error de la cobertura espacio libre con puntos cada 20 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	2333
1	1	368
2	2	216
3	3	88

	0
	0-1
	1-2
	2-3
	3-17

Figura 5.12. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 20 grados

Se muestra una predicción del mapa de cobertura (ver figura 5.10) cogiendo los valores de los puntos de potencia separados una resolución de 0.2 cada 20 grados, de este modo una vez calculada la diferencia entre los mapas de cobertura (Figura 5.11) se presta atención a la tabla de atributos (Figura 5.12), la cual muestra un valor del 84.1% de las celdas que presentan una diferencia menor a 1 dB, lo cual sigue siendo un valor porcentual muy bueno con respecto a la cantidad de puntos que se utilizan en la predicción del mapa de cobertura (Figura 5.10).

### Cada 40 grados

A)

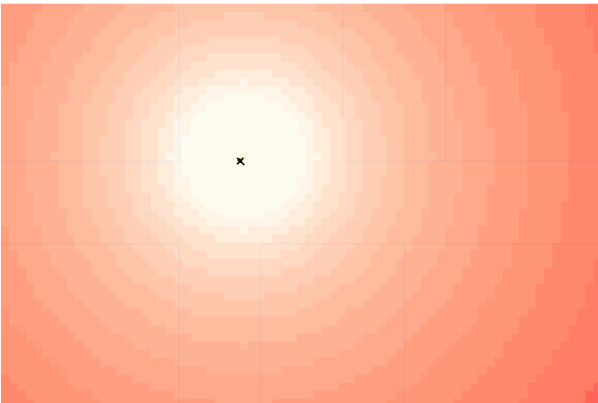


Figura 5.13. Cobertura espacio libre

B)

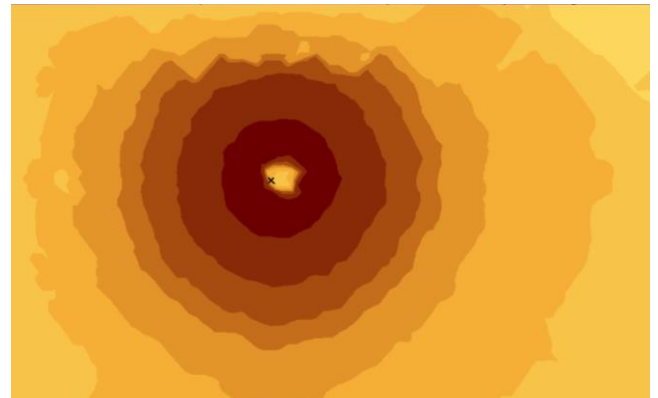


Figura 5.14. Cobertura espacio libre predicha con puntos cada 40 grados

C)

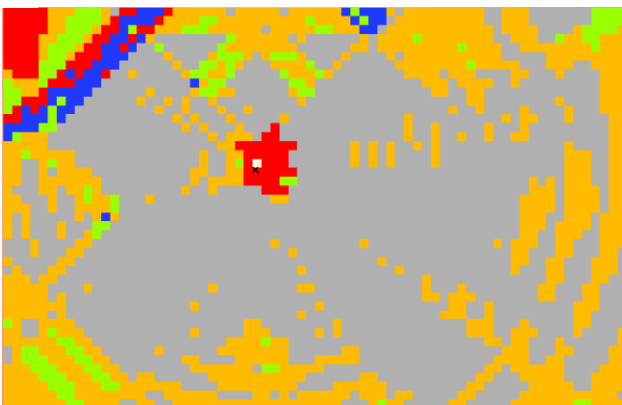


Figura 5.15. Error de la cobertura espacio libre con puntos cada 40 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	1907
1	1	941
2	2	142
3	3	58

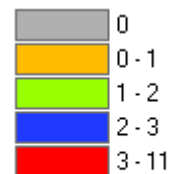


Figura 5.16. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 40 grados

A lo largo de este apartado se deben tener varios aspectos en cuenta. El primer aspecto a tener en cuenta es como aumenta la diferencia entre los mapas de cobertura al disminuir la cantidad de puntos en la estimación del mapa de cobertura predicha mediante 'Geostatistical Analyst'. Otro aspecto importante a tener en cuenta son los círculos concéntricos del mapa mencionado anteriormente, puesto que, de forma visual, se puede observar una deformación de estos, mostrando una predicción del mapa de cobertura mucho peor.

### 5.1.2- Óptica geométrica con una reflexión. Paredes conductoras

Cada 5 grados

A)

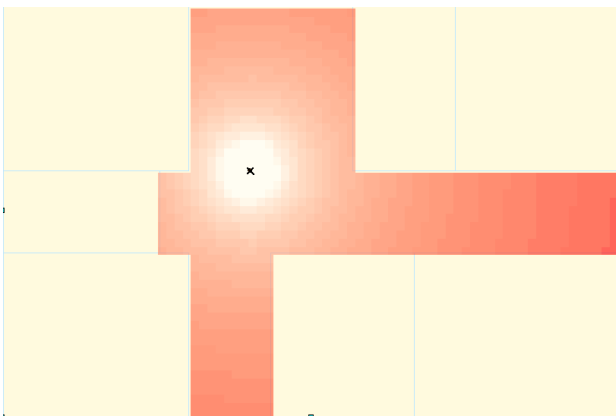


Figura 5.17. Cobertura Óptica geométrica con paredes conductoras

B)

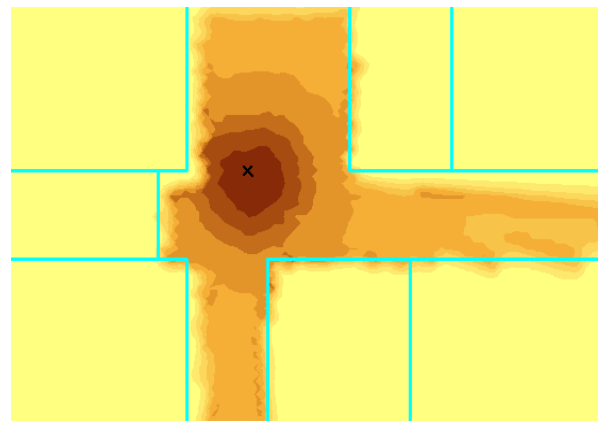


Figura 5.18. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 5 grados

C)

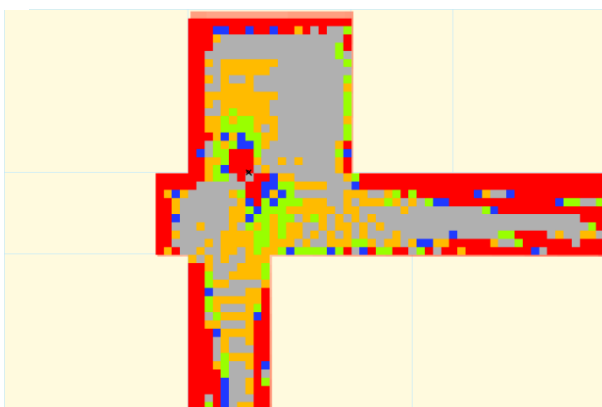


Figura 5.19. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 5 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	422
1	1	224
2	2	94
3	3	44

0
0 - 1
1 - 2
2 - 3
3 - 123

Figura 5.20. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 5 grados

La figura 5.17 representa el mapa de cobertura radioeléctrica estimada a partir del modelo de propagación Óptica geométrica con una única reflexión en paredes conductoras. A su derecha, se observa el mapa de cobertura predicha a partir de los valores de potencia cogidos cada 5 grados (ver Figura 5.18). Una vez calculada la diferencia entre estos dos mapas de cobertura, se observa la tabla de atributos (Figura 5.20) donde se obtiene un porcentaje de 57.6% donde las celdas dentro del entorno de trabajo presentan una diferencia menor a 1 dB, un valor bastante pequeño si lo comparamos con las diferencias estimadas a partir del modelo de propagación Espacio Libre.

### Cada 10 grados

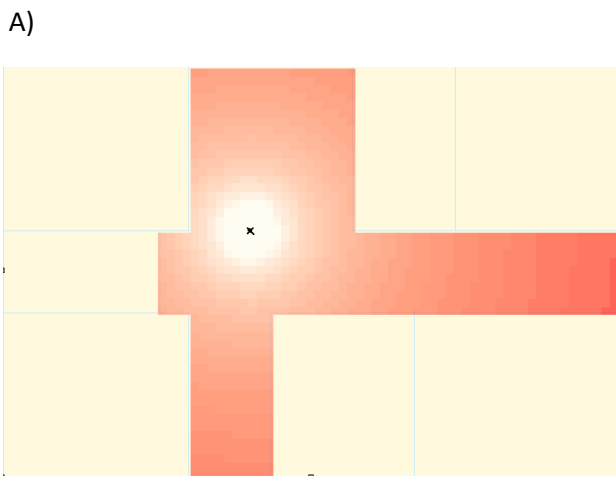


Figura 5.21. Cobertura Óptica geométrica con paredes conductoras

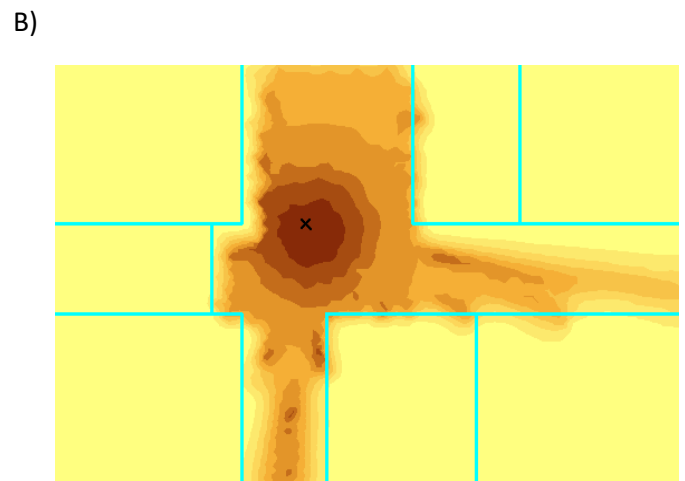


Figura 5.22. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 10 grados

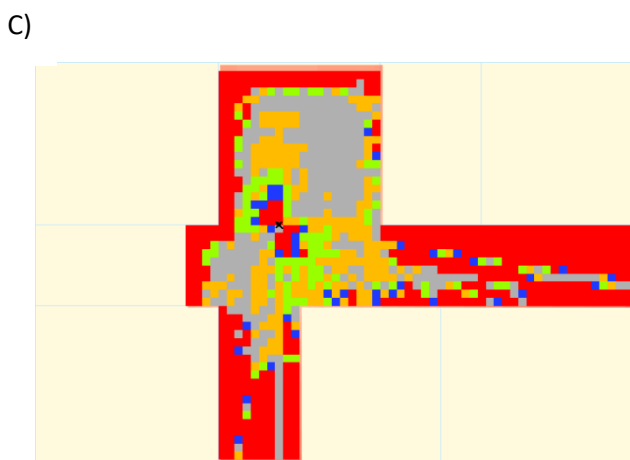


Figura 5.23. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 10 grados

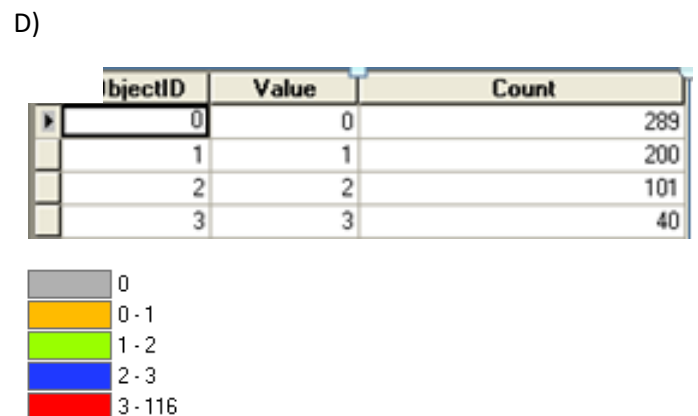


Figura 5.24. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 10 grados

En este apartado se presenta una predicción del mapa de cobertura (ver figura 5.22) cogiendo los valores de los puntos de potencia separados una resolución de 0.2 cada 10 grados.

Una vez hallada la diferencia entre los mapas de cobertura (Figura 5.23) se observa gracias a la tabla de atributos (Figura 5.24) que el 43.7% de las celdas dentro del espacio *indoor* presenta una diferencia menor a 1 dB.

*Cada 20 grados*

A)

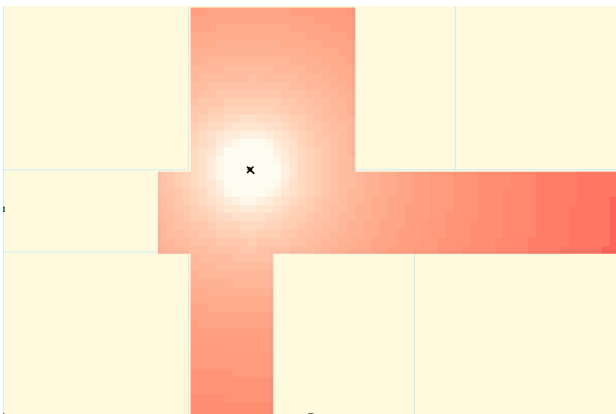


Figura 5.25. Cobertura Óptica geométrica con paredes conductoras

B)

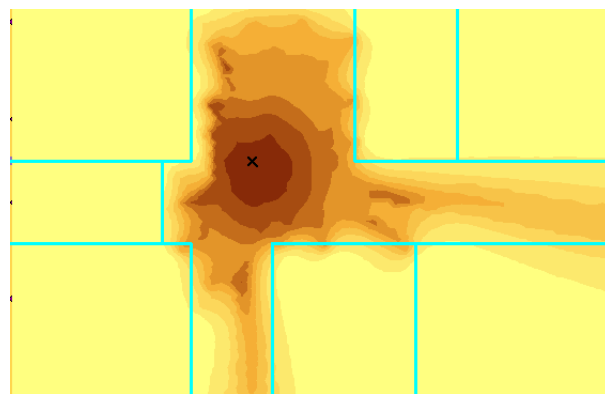


Figura 5.26. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 20 grados

C)

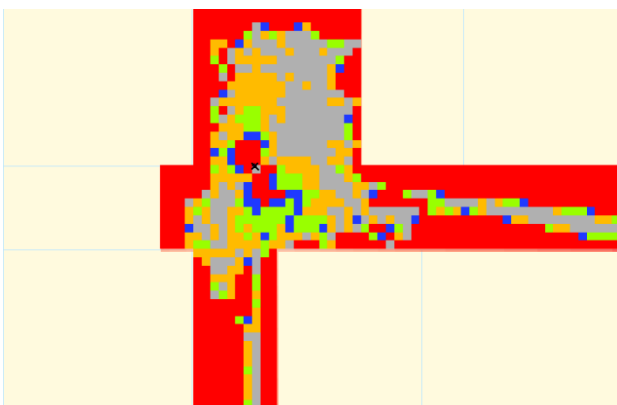


Figura 5.27. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 20 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	233
1	1	194
2	2	101
3	3	44

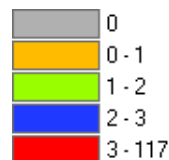


Figura 5.28. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 20 grados

En este apartado se presenta una predicción del mapa de cobertura (ver figura 5.26) cogiendo los valores de los puntos de potencia separados una resolución de 0.2 cada 20 grados.

Una vez hallada la diferencia entre los mapas de cobertura (Figura 5.27) se observa gracias a la tabla de atributos (Figura 5.28) que el 38.1% de las celdas dentro del espacio *indoor* presenta una diferencia menor a 1 dB, por lo que en este punto se empieza a ver una diferencia considerable.

### Cada 40 grados

A)

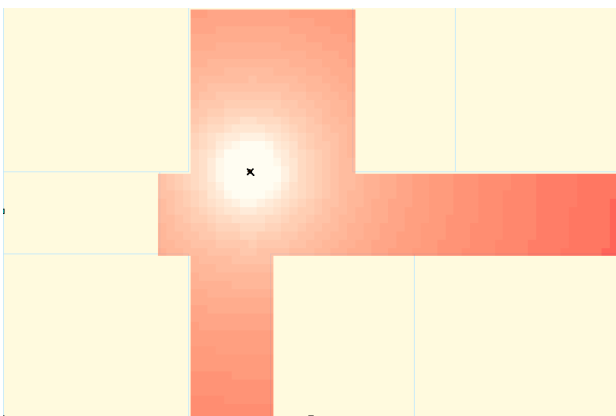


Figura 5.29. Cobertura Óptica geométrica con paredes conductoras

B)

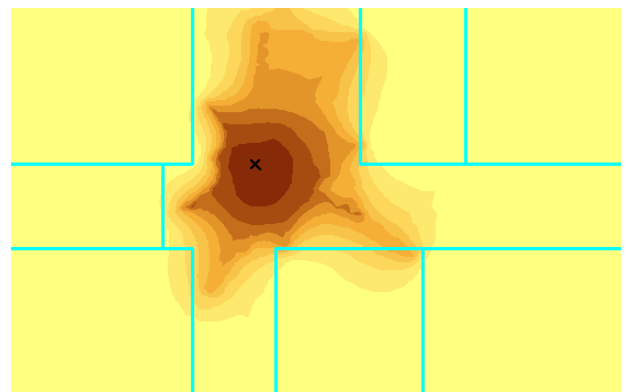


Figura 5.30. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 40 grados

C)

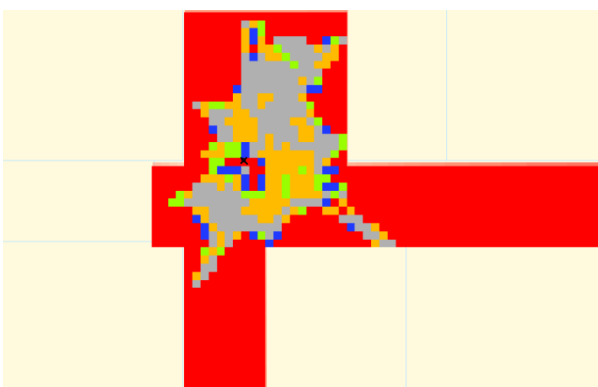


Figura 5.31. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 40 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	176
1	1	124
2	2	42
3	3	31

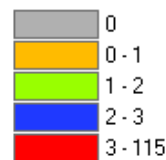


Figura 5.32. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 40 grados



A lo largo de este apartado, se ha observado en el mapa de cobertura radioeléctrica original (Figura 5.29) que la radiación de potencia no sobrepasa las paredes conductoras. Visualmente las circunferencias concéntricas no son tan visibles como en otros apartados, pero esto es debido a que las variaciones de potencia no son muy bruscas.

A partir de las tablas de atributo se llega a la conclusión de que, con el método de propagación usado, la diferencia entre el mapa de cobertura radioeléctrica original generado en RADIOGIS y el mapa de cobertura predicho mediante 'Geostatistical Analyst' es mayor comparado con el método Espacio libre, donde la diferencia era mínima.

### 5.1.3- Óptica geométrica con una reflexión y reflexión en el suelo. Paredes conductoras

Cada 5 grados

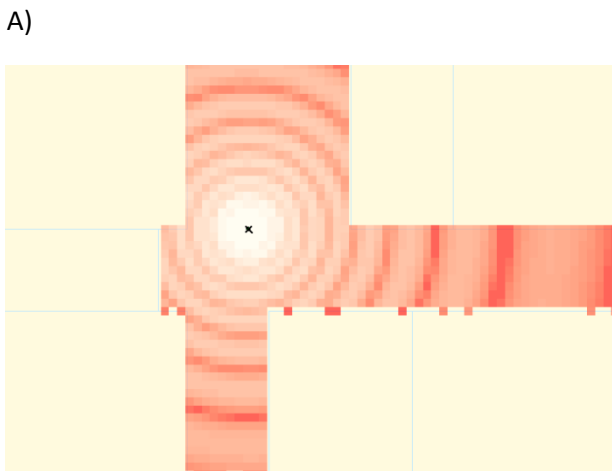


Figura 5.33. Cobertura Óptica geométrica con paredes conductoras

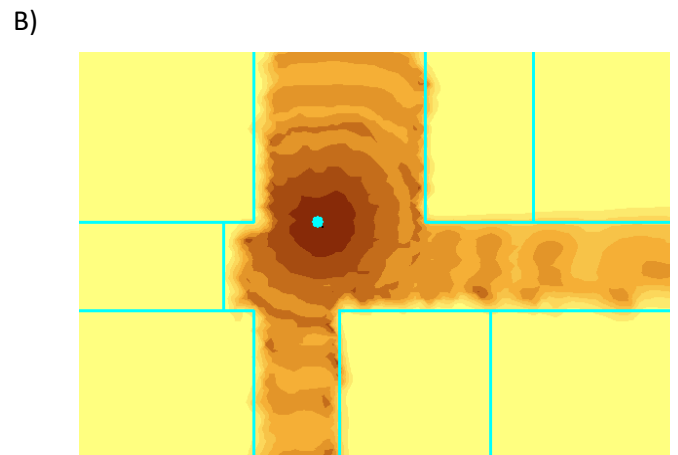


Figura 5.34. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 5 grados

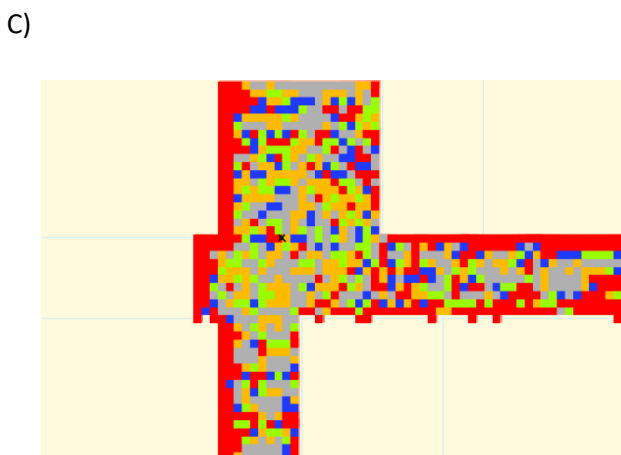


Figura 5.35. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 5 grados

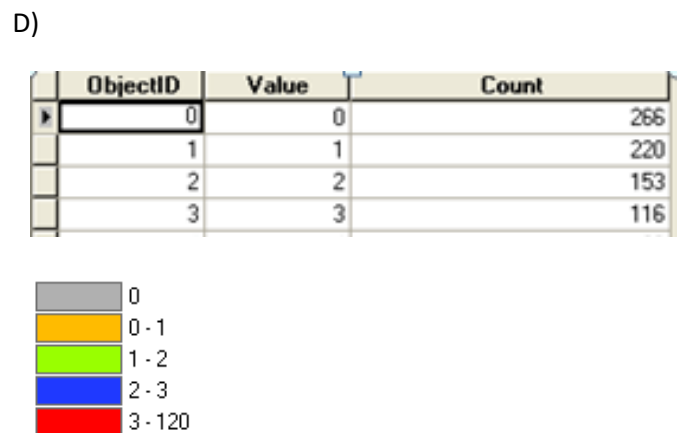
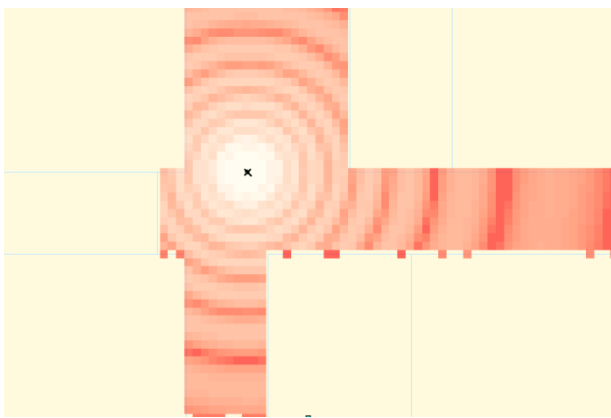


Figura 5.36. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 5 grados

En la figura 5.33 se observa la cobertura radioeléctrica estimada a partir del modelo de propagación Óptica geométrica con una única reflexión y reflexión en el suelo en paredes conductoras. A su derecha, se observa el mapa de cobertura predicha a partir de los valores de potencia cogidos cada 5 grados (ver Figura 5.34). Una vez calculada la diferencia entre estos dos mapas de cobertura (Figura 5.35), se observa la tabla de atributos (Figura 5.20) donde se obtiene un porcentaje de 43.4% donde las celdas dentro del entorno de trabajo presentan una diferencia menor a 1 dB, un valor bastante pequeño con respecto a la gran cantidad de puntos que se cogen para predecir el mapa de cobertura.

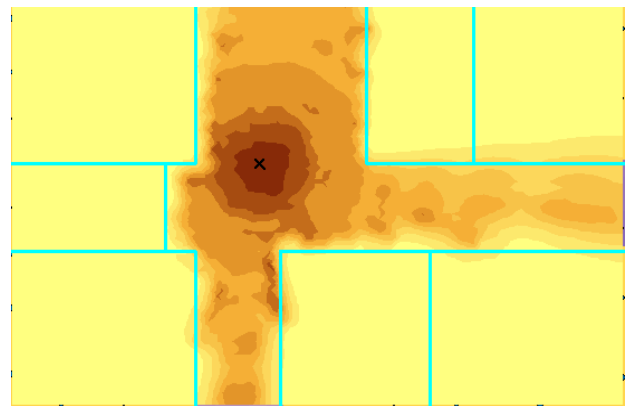
*Cada 10 grados*

A)



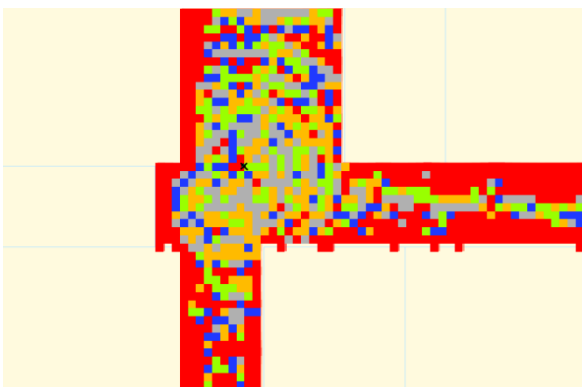
*Figura 5.37. Cobertura Óptica geométrica con paredes conductoras*

B)



*Figura 5.38. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 10 grados*

C)



*Figura 5.39. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 10 grados*

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	188
1	1	189
2	2	146
3	3	121

0
0-1
1-2
2-3
3-123

*Figura 5.40. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 10 grados*

En este apartado se muestra una predicción del mapa de cobertura (ver figura 5.38) cogiendo los valores de los puntos de potencia separados una resolución de 0.2 cada 10 grados. De una forma visual se observa como los círculos concéntricos están difusos, puesto que la predicción no es tan exacta.

Una vez hallada la diferencia entre los mapas de cobertura (Figura 5.39) se observa gracias a la tabla de atributos (Figura 5.40) que el 33.6% de las celdas dentro del espacio *indoor* presenta una diferencia menor a 1 dB.

### Cada 20 grados

A)

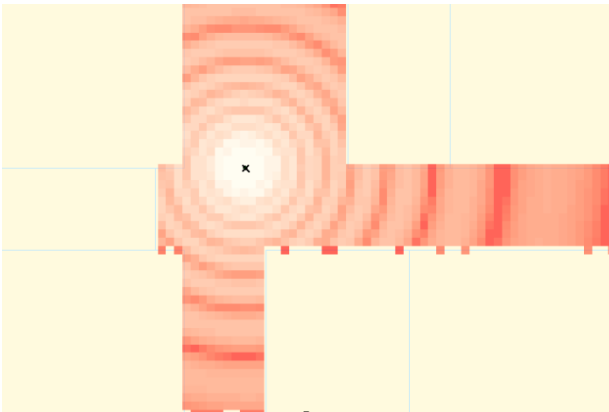


Figura 5.41. Cobertura Óptica geométrica con paredes conductoras

B)

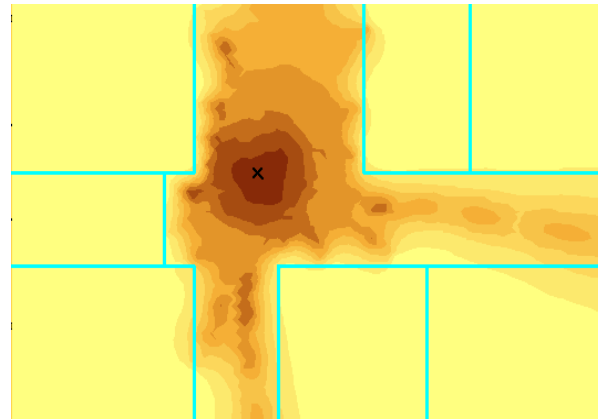


Figura 5.42. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 20 grados

C)

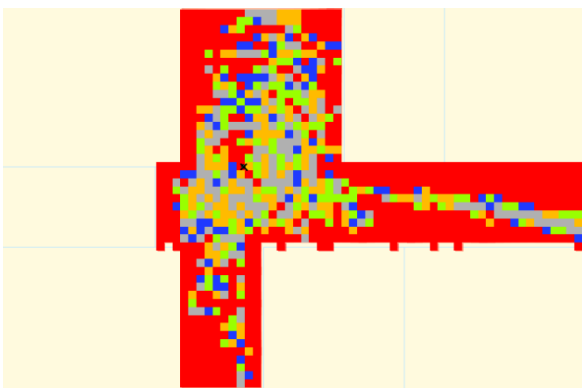


Figura 5.43. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 20 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	158
1	1	145
2	2	121
3	3	83

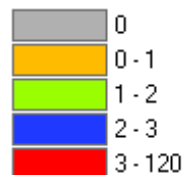


Figura 5.44. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 20 grados

Se presenta una predicción del mapa de cobertura (ver figura 5.42) cogiendo los valores de los puntos de potencia separados una resolución de 0.2 cada 20 grados.

Una vez hallada la diferencia entre los mapas de cobertura (Figura 5.43) se observa gracias a la tabla de atributos (Figura 5.44) que el 27% de las celdas dentro del entorno presenta una diferencia menor a 1 dB, por lo que en este punto se empieza a ver una diferencia considerable.

### Cada 40 grados

A)

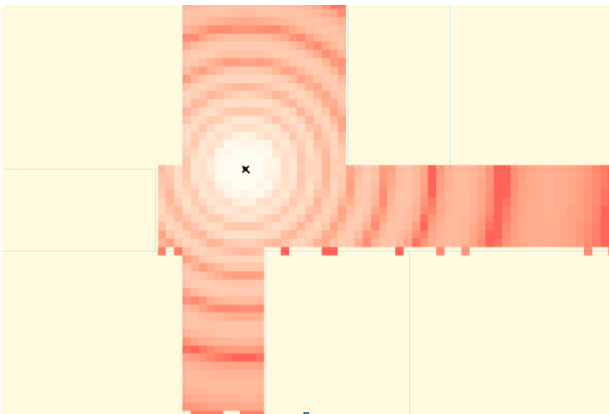


Figura 5.45. Cobertura Óptica geométrica con paredes conductoras

B)

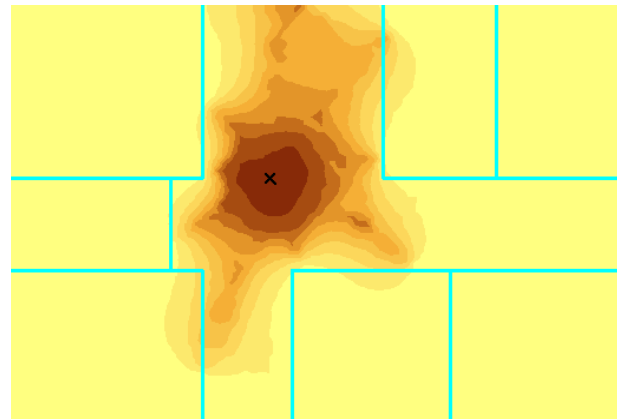


Figura 5.46. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 40 grados

C)

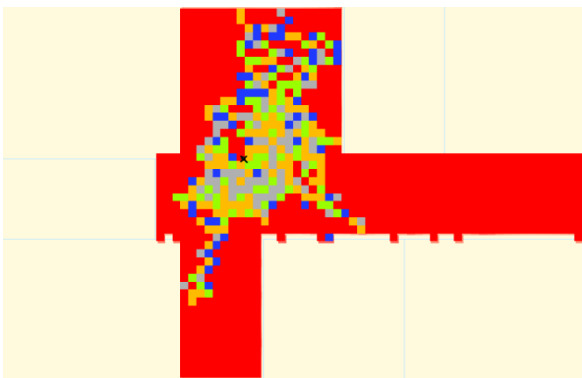


Figura 5.47. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 40 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	77
1	1	105
2	2	73
3	3	53

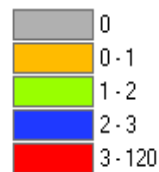


Figura 5.48. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 40 grados

A lo largo de este apartado, se ha observado en el mapa de cobertura radioeléctrica original (Figura 5.45) que la radiación de potencia no sobrepasa las paredes conductoras,

Además de tener unos círculos concéntricos más vistosos que con el modelo de propagación de Óptica geométrica con una única reflexión, esto es debido a que hay cambios en los niveles de potencia más bruscos.

Análiticamente, a partir de las tablas de atributo (ver Figura 5.48) se llega a la conclusión de que, con el método de propagación usado, la diferencia entre el mapa de cobertura radioeléctrica original generado en RADIOGIS y el mapa de cobertura predicho mediante 'Geostatistical Analyst' es mayor comparado con el método Espacio libre, donde la diferencia es mínima.

#### 5.1.4- Óptica geométrica con una reflexión, reflexión en el suelo y transmisión. Paredes conductoras

Cada 5 grados

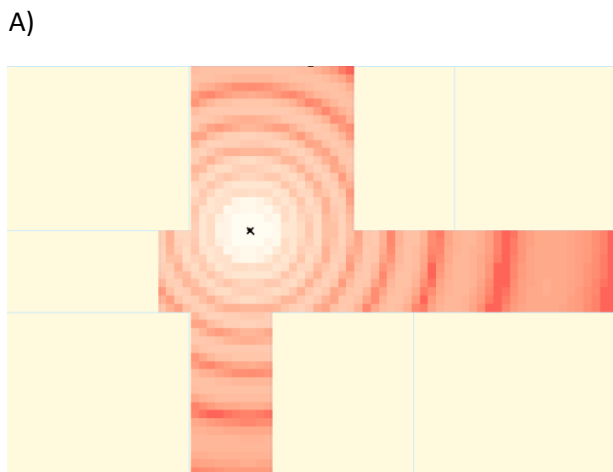


Figura 5.49. Cobertura Óptica geométrica con paredes conductoras

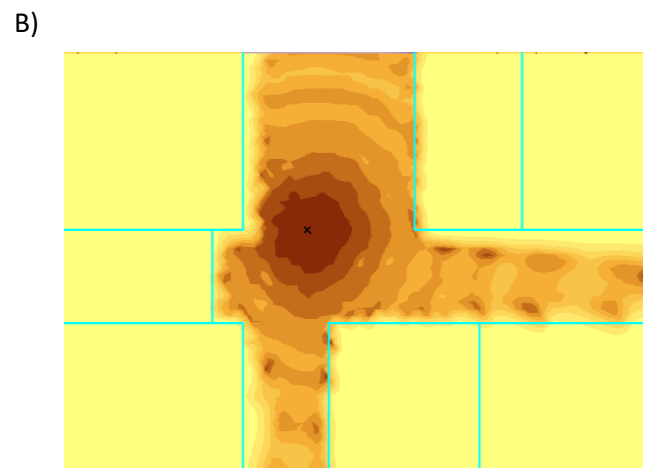


Figura 5.50. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 5 grados

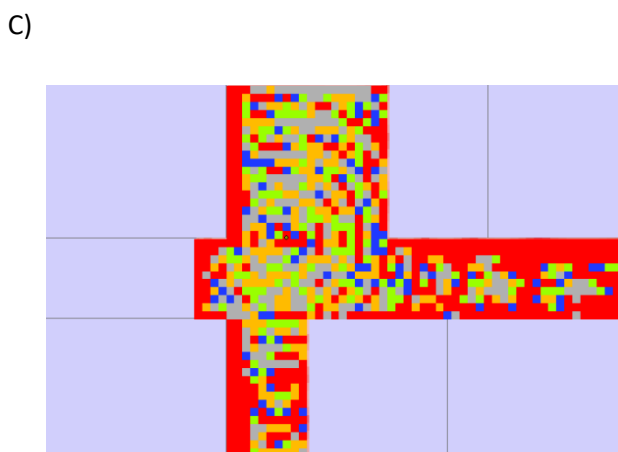


Figura 5.51. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 5 grados

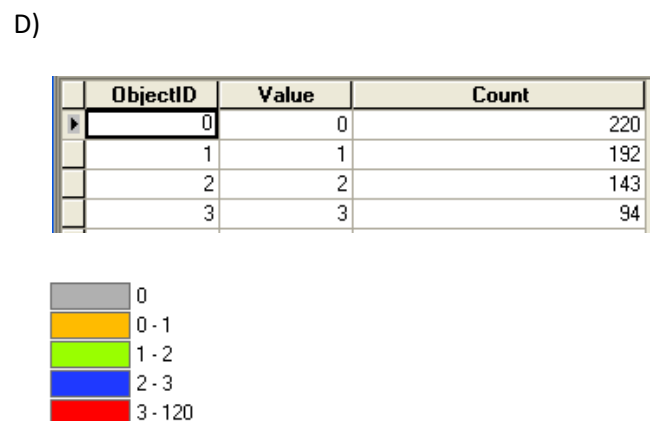


Figura 5.52. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 5 grados

La figura 5.49 representa el mapa de cobertura radioeléctrica estimada a partir del modelo de propagación Óptica geométrica con una única reflexión, reflexión en el suelo y transmisión. A su derecha, se observa el mapa de cobertura predicha a partir de los valores de potencia cogidos cada 5 grados (ver Figura 5.50). Una vez calculada la diferencia entre estos dos mapas de cobertura (Figura 5.51), se observa la tabla de atributos (Figura 5.52) donde se obtiene analíticamente un valor porcentual de 36.7% donde las celdas dentro del entorno de trabajo presentan una diferencia menor a 1 dB, un valor bastante pequeño con respecto a la gran cantidad de puntos que se cogen para predecir el mapa de cobertura.

*Cada 10 grados*

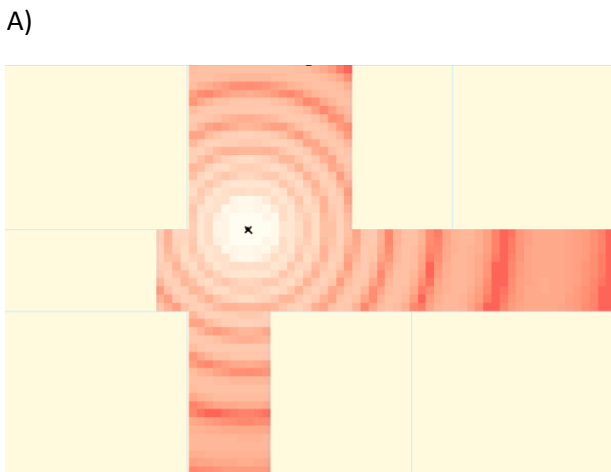


Figura 5.53. Cobertura Óptica geométrica con paredes conductoras

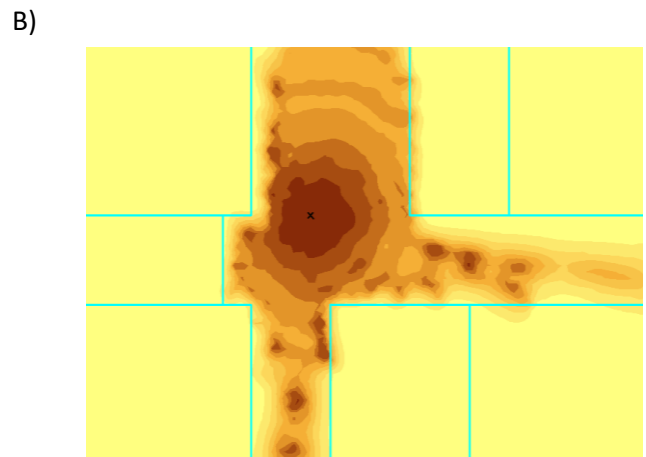


Figura 5.54. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 10 grados

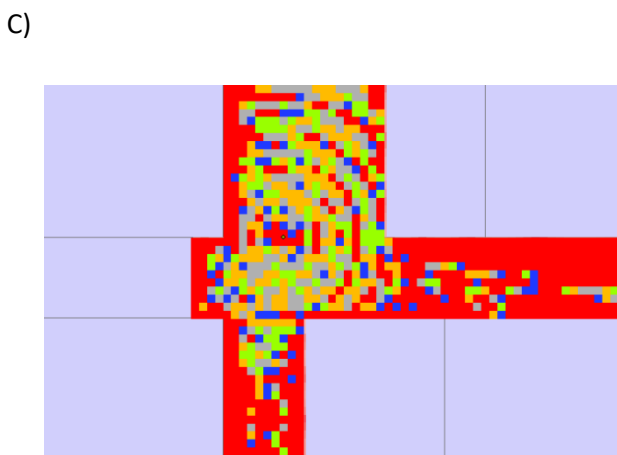


Figura 5.55. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 10 grados

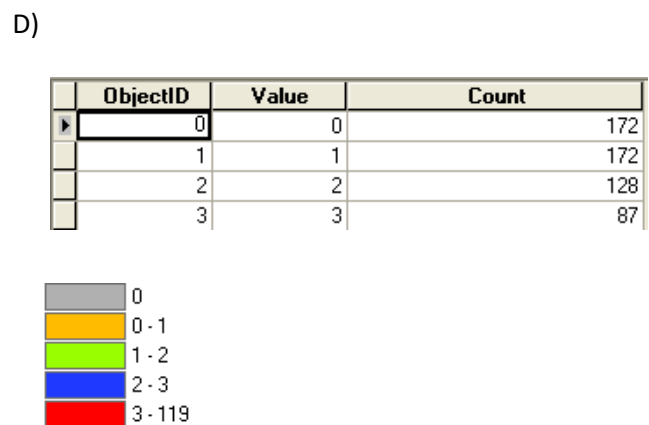


Figura 5.56. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 10 grados

Visualmente, se puede ver la diferencia entre el mapa de cobertura radioeléctrica original (Figura 5.53) y el mapa de cobertura predicha (Figura 5.54) en la figura 5.55, donde se

ha llegado a un resultado en el que la mayor parte del entorno *indoor* tiene una diferencia con un valor superior a 3 dB, resultado bastante alto.

Analíticamente, se llega a la misma conclusión, a través de la tabla de atributos de la diferencia (Figura 5.56) donde se calcula un porcentaje de 57.8% en el que las celdas tienen un valor superior a 3 dB.

### Cada 20 grados

A)

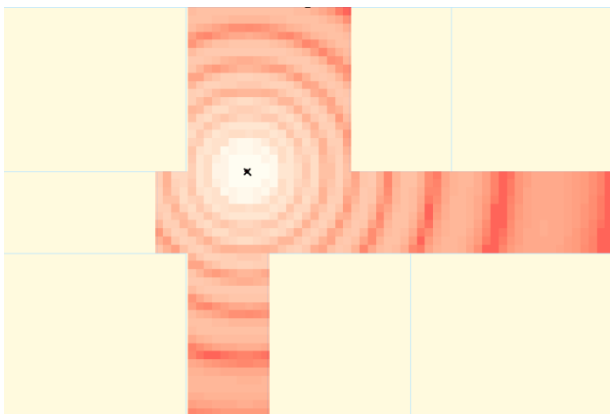


Figura 5.57. Cobertura Óptica geométrica con paredes conductoras

B)

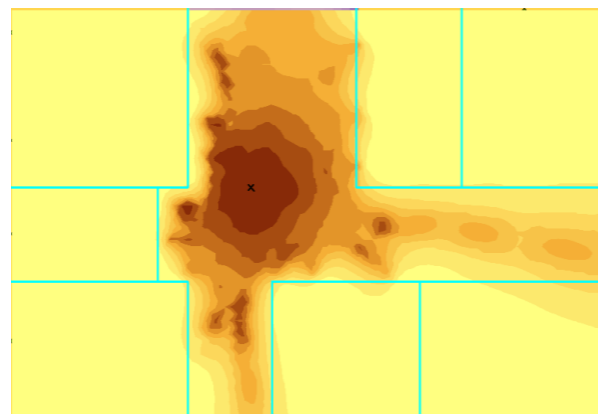


Figura 5.58. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 20 grados

C)

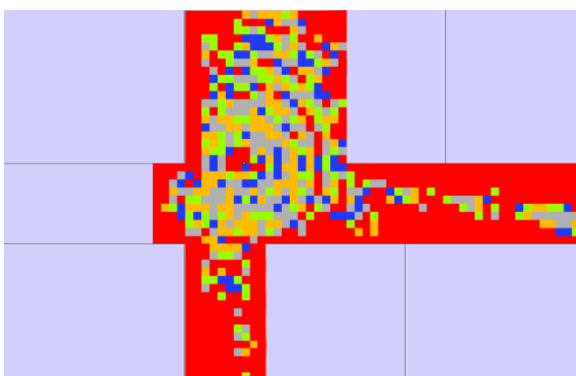


Figura 5.59. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 20 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	162
1	1	138
2	2	116
3	3	88

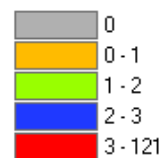


Figura 5.60. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 20 grados

Se presenta una predicción del mapa de cobertura (ver figura 5.58) cogiendo los valores de los puntos de potencia separados una resolución de 0.2 cada 20 grados.

Una vez hallada la diferencia entre los mapas de cobertura (Figura 5.59) se observa gracias a la tabla de atributos (Figura 5.60) que el 27% de las celdas dentro del entorno presenta una diferencia menor a 1 dB.

### Cada 40 grados

A)

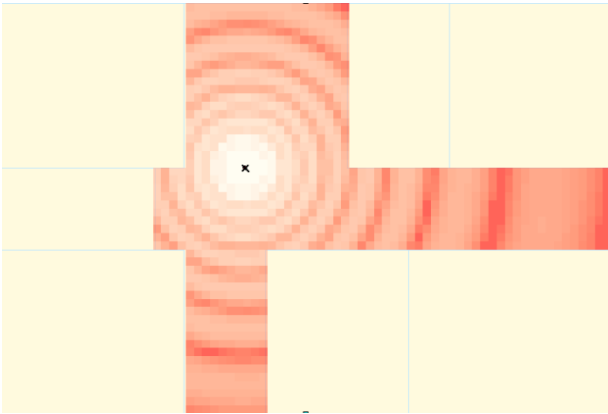


Figura 5.61. Cobertura Óptica geométrica con paredes conductoras

B)

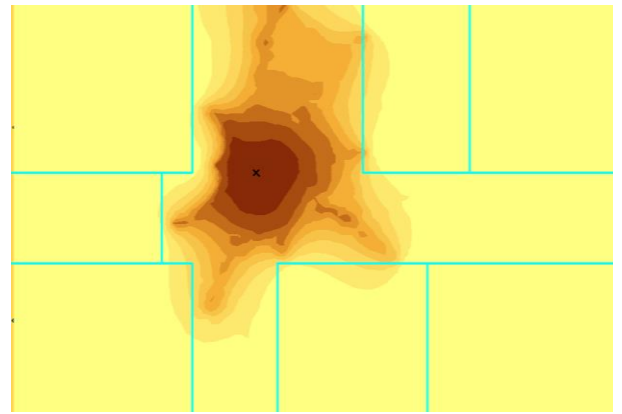


Figura 5.62. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 40 grados

C)

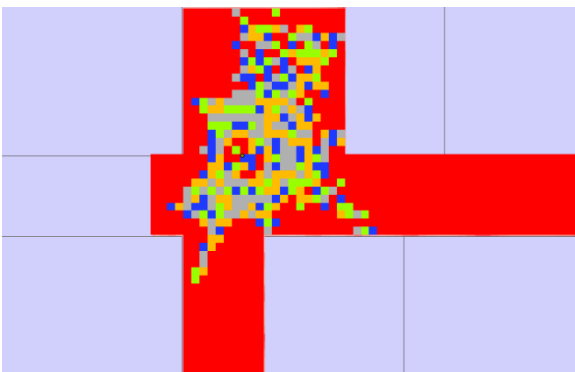


Figura 5.63. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 40 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	96
1	1	95
2	2	71
3	3	72

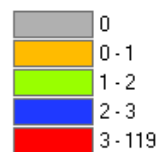


Figura 5.64. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 40 grados

A la vista de los resultados, se han llegado a varias conclusiones. El primer aspecto a resaltar es que en la figura 5.62 vemos un mapa de cobertura predicho con unos círculos concéntricos muy difusos. Esto hace que la diferencia entre ambos mapas sea muy grande. En la figura 5.63 se puede ver visualmente, sabiendo que el color rojo pertenece a aquellas celdas del entorno *indoor* que presentan un valor de diferencia mayor a 3 dB y como se puede observar está presente en gran parte del entorno. De una forma analítica también se puede



comprobar, puesto que mediante la figura 5.64 se llega a la conclusión de que el 77% de las celdas del espacio de trabajo presenta una diferencia mayor a 3 dB.

### 5.1.5- Óptica geométrica con una reflexión, reflexión en el suelo, transmisión y difracción. Paredes conductoras

Cada 5 grados

A)

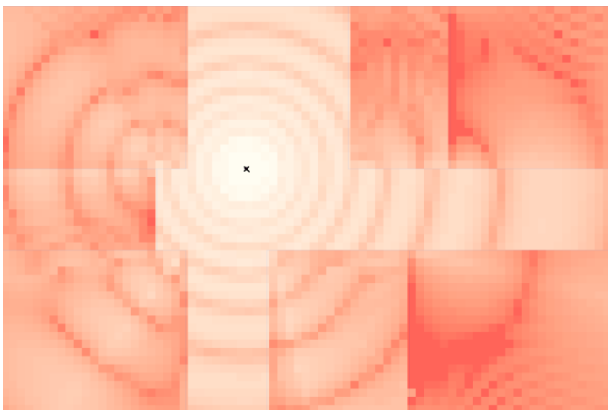


Figura 5.65. Cobertura Óptica geométrica con paredes conductoras

B)

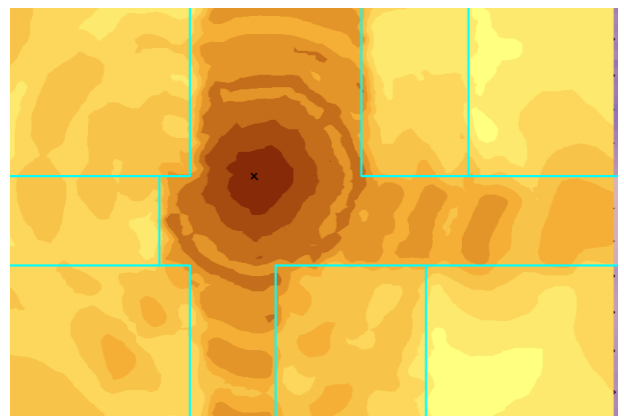


Figura 5.66. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 5 grados

C)

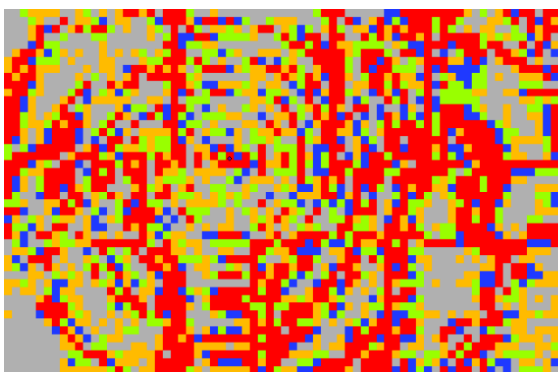


Figura 5.67. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 5 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	814
1	1	639
2	2	472
3	3	316

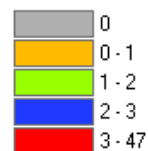


Figura 5.68. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 5 grados

La figura 5.65 representa el mapa de cobertura radioeléctrica estimada a partir del modelo de propagación Óptica geométrica con una única reflexión, reflexión en el suelo, transmisión y difracción en paredes conductoras. A su derecha, se observa el mapa de

cobertura predicha a partir de los valores de potencia cogidos cada 5 grados (ver Figura 5.66). Una vez calculada la diferencia entre estos dos mapas de cobertura (Figura 5.67), se observa la tabla de atributos (Figura 5.68) donde se obtiene analíticamente un valor porcentual de 45.26% donde las celdas dentro del entorno de trabajo presentan una diferencia menor a 1 dB, un valor bastante pequeño con respecto a la gran cantidad de puntos que se cogen para predecir el mapa de cobertura.

### Cada 10 grados

A)

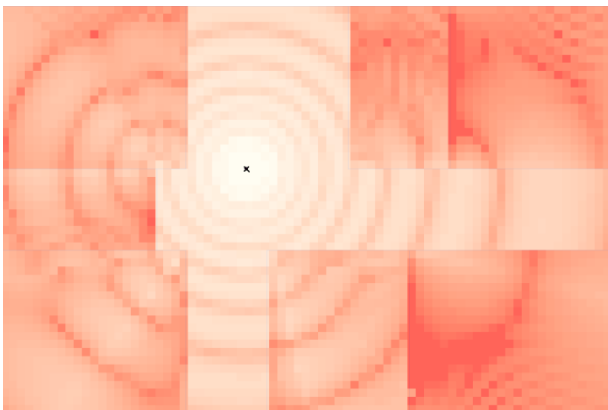


Figura 5.69. Cobertura Óptica geométrica con paredes conductoras

B)

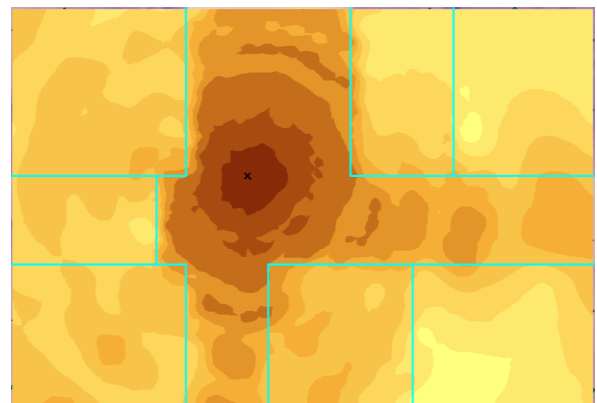


Figura 5.70. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 10 grados

C)

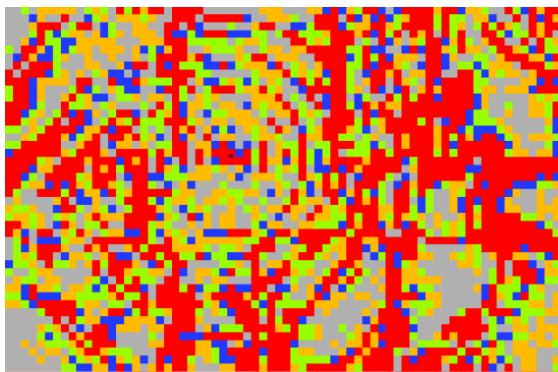


Figura 5.71. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 10 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	688
1	1	630
2	2	523
3	3	317

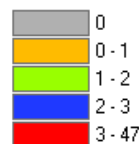


Figura 5.72. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 10 grados

Visualmente, se puede ver la diferencia entre el mapa de cobertura radioeléctrica original (Figura 5.69) y el mapa de cobertura predicha (Figura 5.70) en la figura 5.71, donde se

ha llegado a un resultado en el que la mitad de las celdas del espacio *indoor* presentan un valor inferior a 1 dB.

Analíticamente, se llega a la misma conclusión, a través de la tabla de atributos de la diferencia (Figura 5.72) donde se calcula un porcentaje de 41% en el que las celdas tienen un valor inferior a 1 dB.

### Cada 20 grados

A)

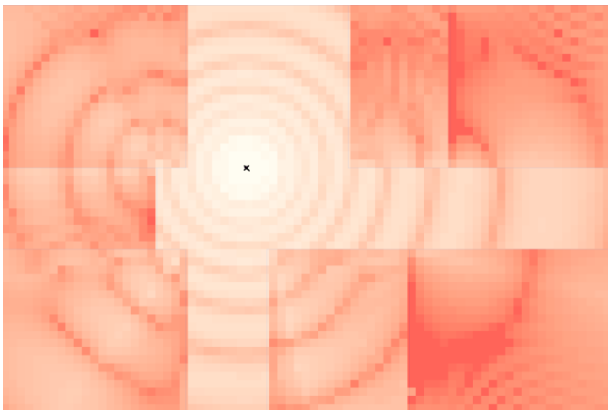


Figura 5.73. Cobertura Óptica geométrica con paredes conductoras

B)

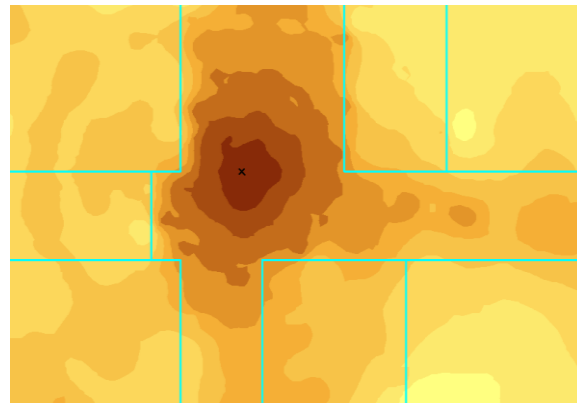


Figura 5.74. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 20 grados

C)

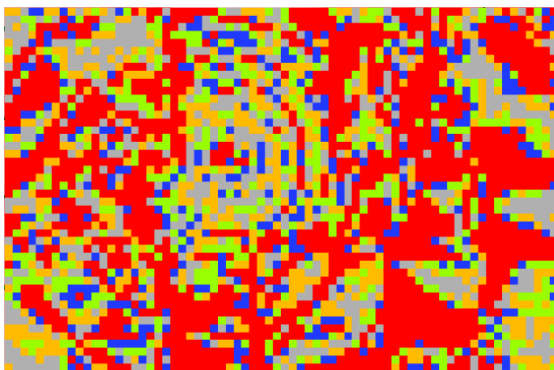


Figura 5.75. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 20 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	579
1	1	515
2	2	444
3	3	362

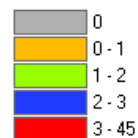


Figura 5.76. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 20 grados

Se muestra una predicción del mapa de cobertura (ver figura 5.74) cogiendo los valores de los puntos de potencia separados una resolución de 0.2 cada 20 grados.

Una vez hallada la diferencia entre los mapas de cobertura (Figura 5.75) se observa gracias a la tabla de atributos (Figura 5.76) que el 27% de las celdas dentro del entorno presenta una diferencia menor a 1 dB.

### Cada 40 grados

A)

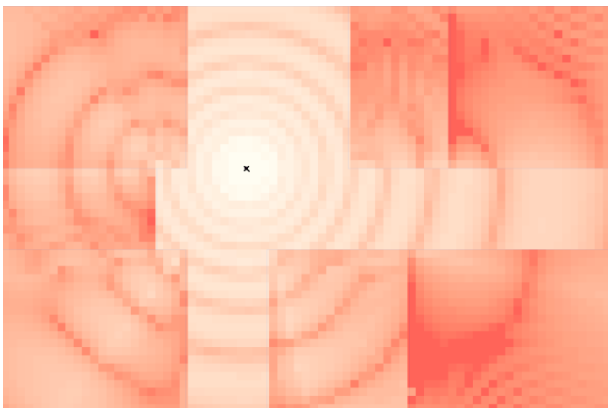


Figura 5.77. Cobertura Óptica geométrica con paredes conductoras

B)

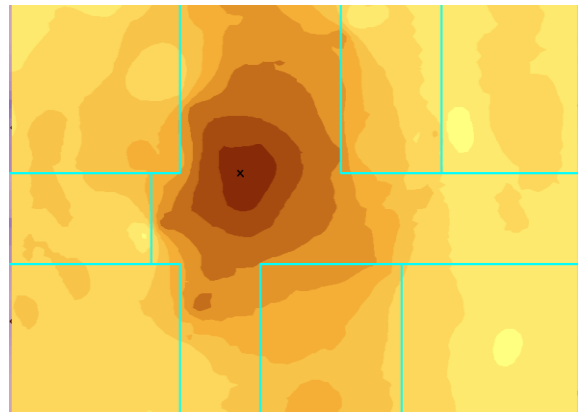


Figura 5.78. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 40 grados

C)

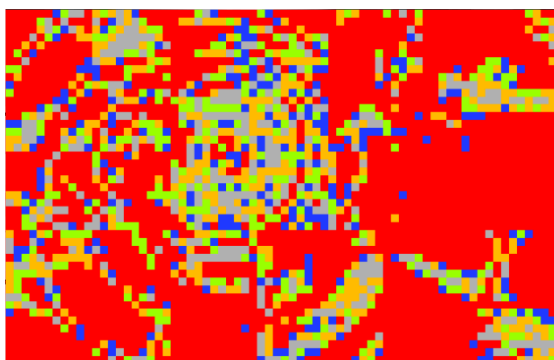


Figura 5.79. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 40 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	347
1	1	366
2	2	309
3	3	259

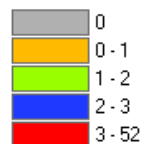


Figura 5.80. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 40 grados

A lo largo de este apartado, se ha observado en el mapa de cobertura radioeléctrica original (Figura 5.77) que la radiación de potencia sobrepasa las paredes conductoras al haber

añadido el parámetro de difracción. Analíticamente, a partir de las tablas de atributo (ver Figura 5.80) se llega a la conclusión de que, con el método de propagación usado, la diferencia (Figura 5.79) entre el mapa de cobertura radioeléctrica original generado en RADIOGIS (Figura 5.77) y el mapa de cobertura predicho mediante 'Geostatistical Analyst' (Figura 5.78) presenta un valor porcentual de 68.2% en el que las celdas del entorno tienen una diferencia superior a 3 dB, valor a resaltar, puesto que es la mayor diferencia de entre todas las simulaciones.

### 5.1.6- Óptica geométrica con una reflexión. Paredes absorbentes

Cada 5 grados

A)

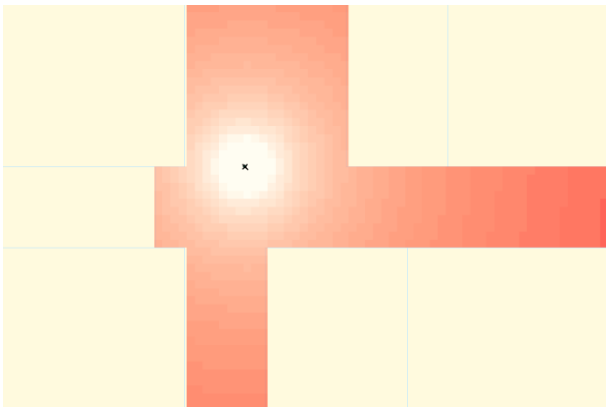


Figura 5.81. Cobertura Óptica geométrica con paredes absorbentes

B)

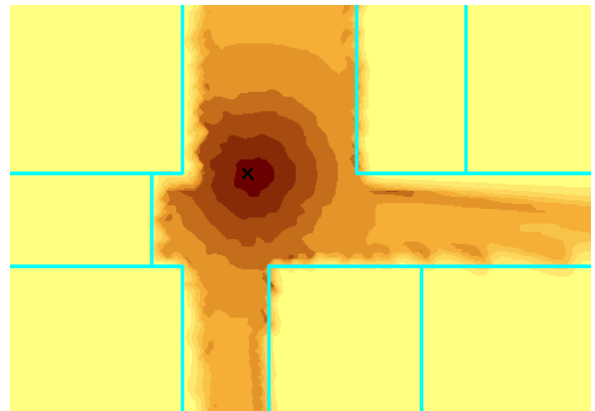


Figura 5.82. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 5 grados

C)

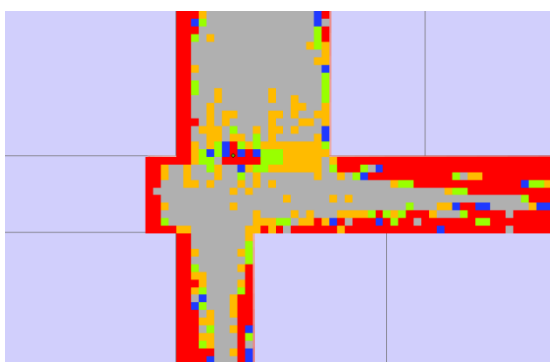


Figura 5.83. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 5 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	528
1	1	148
2	2	63
3	3	29

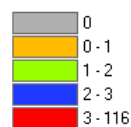


Figura 5.84. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 5 grados

La figura 5.81 representa el mapa de cobertura radioeléctrica estimada a partir del modelo de propagación Óptica geométrica con una única reflexión en paredes absorbentes. A su derecha, se observa el mapa de cobertura predicha a partir de los valores de potencia obtenidos cada 5 grados (ver Figura 5.82). Una vez calculada la diferencia entre estos dos mapas de cobertura (Figura 5.83), se observa la tabla de atributos (Figura 5.84) donde se obtiene un porcentaje de 60% donde las celdas dentro del entorno de trabajo presentan una diferencia menor a 1 dB. El mapa de cobertura predicha (Figura 5.82) tiene partes donde los círculos concéntricos están difusos, eso es debido a que los puntos de potencia cogidos no son simétricos.

### Cada 10 grados

A)

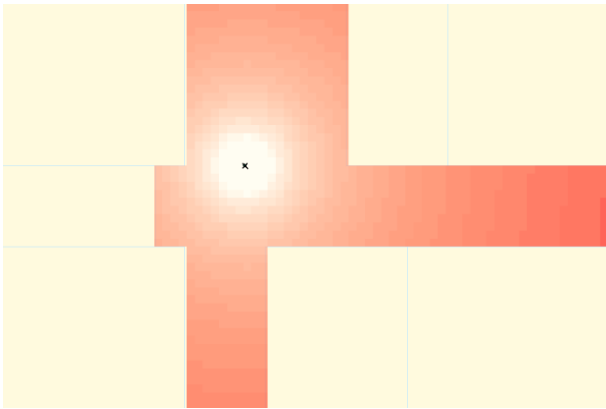


Figura 5.85. Cobertura Óptica geométrica con paredes absorbentes

B)

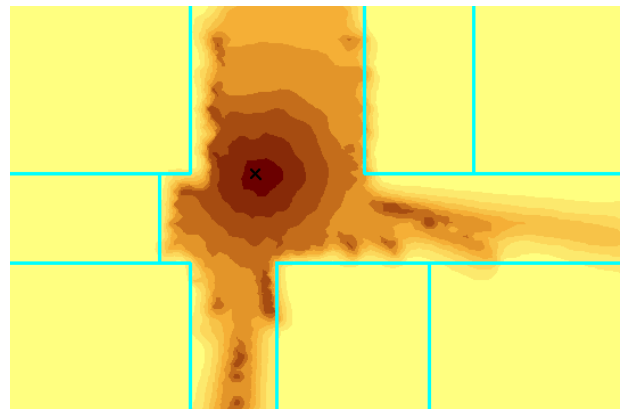


Figura 5.86. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 10 grados

C)

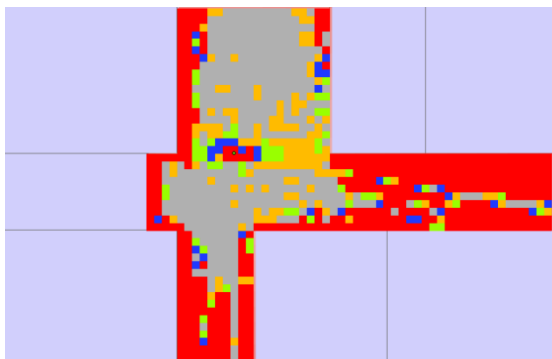


Figura 5.87. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 10 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	412
1	1	130
2	2	59
3	3	36

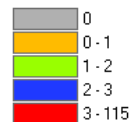


Figura 5.88. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 10 grados

En este apartado se presenta una predicción del mapa de cobertura (ver figura 5.86) cogiendo los valores de los puntos de potencia separados una resolución de 0.2 cada 10 grados.

Una vez hallada la diferencia entre los mapas de cobertura (Figura 5.87) se observa gracias a la tabla de atributos (Figura 5.88) que el 48.4% de las celdas dentro del espacio *indoor* presenta una diferencia menor a 1 dB, un valor que se acerca a la mitad del entorno.

### Cada 20 grados

A)

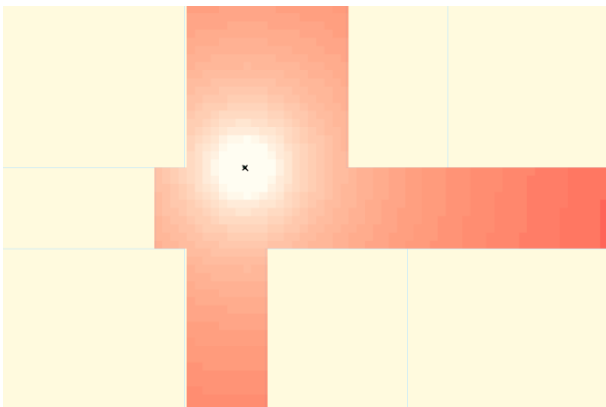


Figura 5.89. Cobertura Óptica geométrica con paredes absorbentes

B)

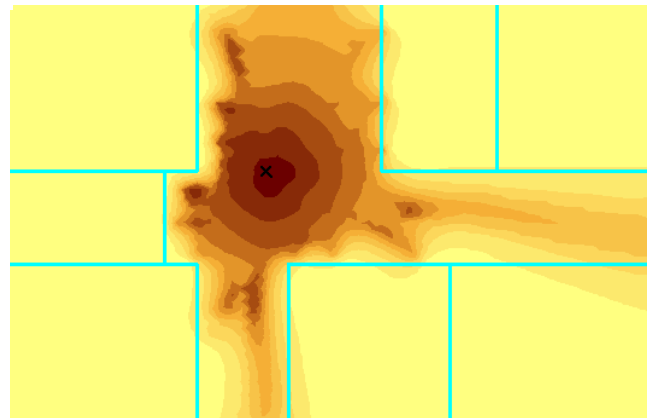


Figura 5.90. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 20 grados

C)

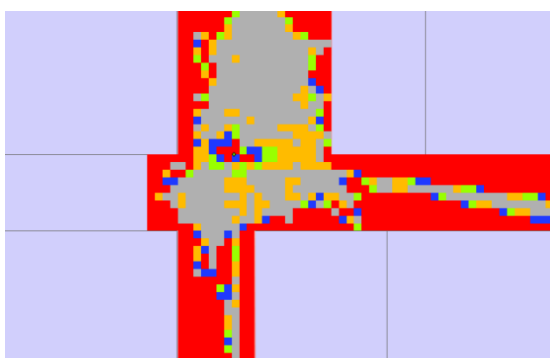


Figura 5.91. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 20 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	360
1	1	125
2	2	48
3	3	46

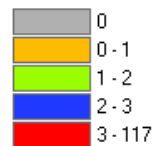


Figura 5.92. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 20 grados

Se presenta una predicción del mapa de cobertura (ver figura 5.90) obteniendo los valores de los puntos de potencia separados una resolución de 0.2 cada 20 grados. Estos puntos, al no estar distribuidos de una forma simétrica se observa como en algunas zonas del mapa (Figura 5.90) los círculos concéntricos están difusos.

Una vez hallada la diferencia entre los mapas de cobertura (Figura 5.91) se observa gracias a la tabla de atributos (Figura 5.92) que el 43.3% de las celdas dentro del entorno presenta una diferencia menor a 1 dB, valor que ha disminuido en relación con el apartado anterior.

*Cada 40 grados*

A)

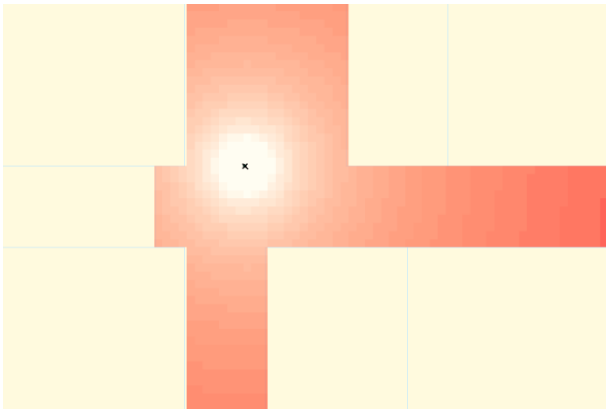


Figura 5.93. Cobertura Óptica geométrica con paredes absorbentes

B)

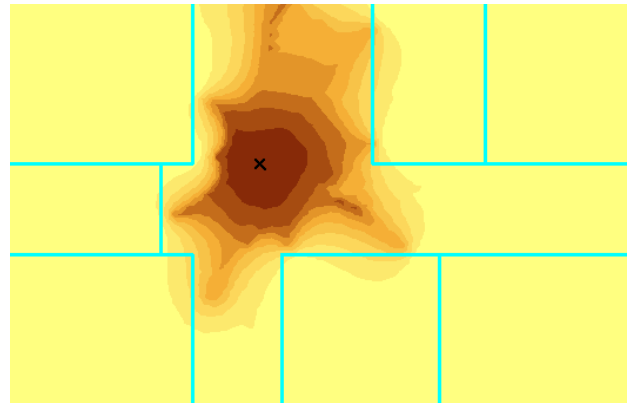


Figura 5.94. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 40 grados

C)

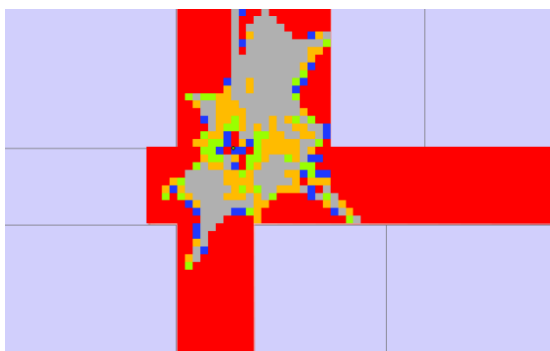


Figura 5.95. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 40 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	201
1	1	94
2	2	43
3	3	33

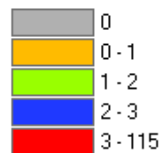


Figura 5.96. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 40 grados



Se han de destacar varios aspectos importantes. Visualmente, se puede ver la diferencia entre el mapa de cobertura radioeléctrica original (Figura 5.93) y el mapa de cobertura predicha (Figura 5.94) en la figura 5.95, donde se ha llegado a un resultado porcentual en el que el 26.3% de las celdas del espacio *indoor* presentan un valor inferior a 1 dB. Un valor pequeño pero coherente con respecto a la cantidad de puntos de potencia cogidos para predecir el mapa de cobertura radioeléctrica (Figura 5.94). Estos puntos no son cogidos de una manera simétrica, así que, el resultado será un mapa de cobertura aproximado.

### 5.1.7- Óptica geométrica con una reflexión y reflexión en el suelo. Paredes absorbentes

Cada 5 grados

A)

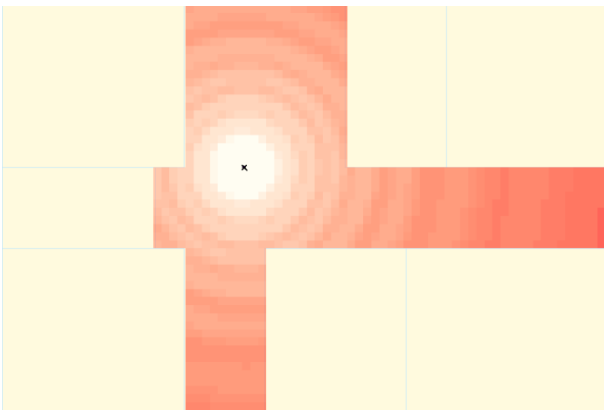


Figura 5.97. Cobertura Óptica geométrica con paredes absorbentes

B)

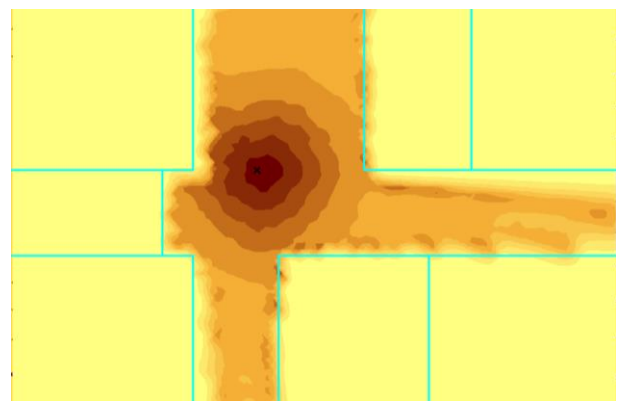


Figura 5.98. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 5 grados

C)

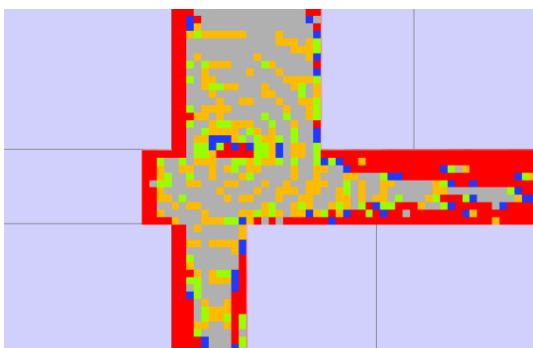


Figura 5.99. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 5 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	429
1	1	200
2	2	94
3	3	47

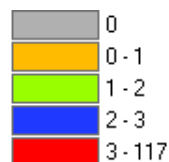


Figura 5.100. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 5 grados

La figura 5.97 representa el mapa de cobertura radioeléctrica estimada a partir del modelo de propagación Óptica geométrica con una única reflexión y reflexión en el suelo en paredes absorbentes. A su derecha, se observa el mapa de cobertura predicha a partir de los valores de potencia obtenidos cada 5 grados (ver Figura 5.98), este mapa presenta unos círculos concéntricos igual que en el mapa de cobertura original. Esta predicción es bastante buena debido a la cantidad de valores usados para calcularla. Una vez calculada la diferencia entre estos dos mapas de cobertura (Figura 5.99), se observa la tabla de atributos (Figura 5.100) donde se obtiene analíticamente un valor porcentual de 56% donde las celdas dentro del entorno de trabajo presentan una diferencia menor a 1 dB, lo cual es un valor pequeño con respecto a la gran cantidad de puntos que se cogen para predecir el mapa de cobertura.

### Cada 10 grados

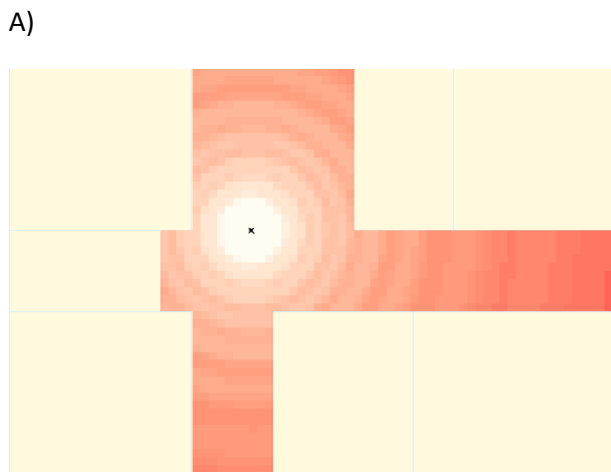


Figura 5.101. Cobertura Óptica geométrica con paredes absorbentes

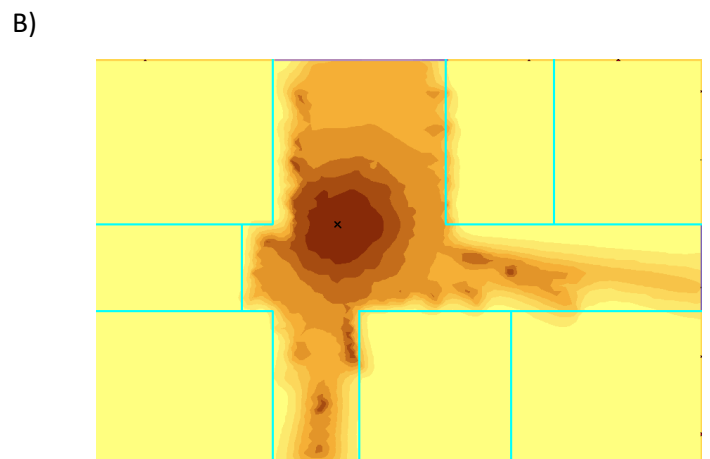


Figura 5.102. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 10 grados

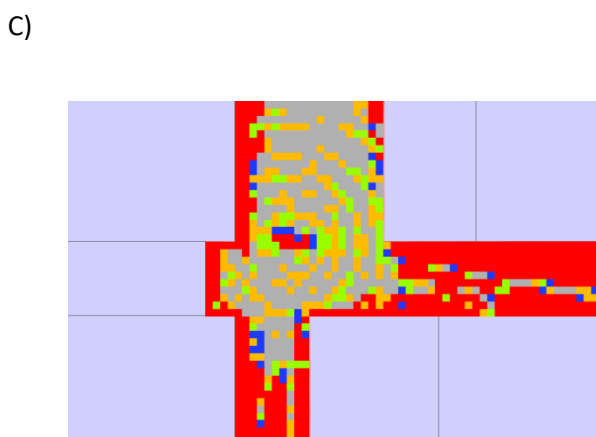


Figura 5.103. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 10 grados

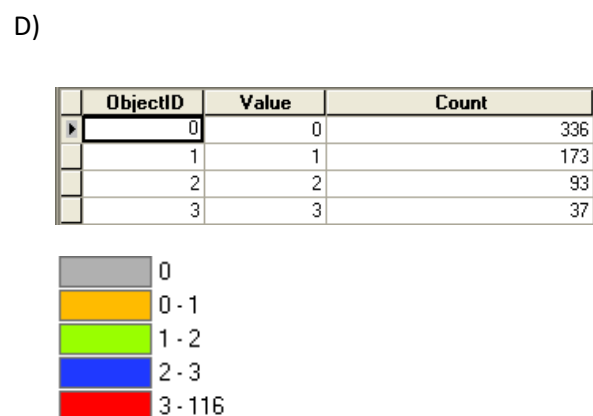


Figura 5.104. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 10 grados

En esta sección se presenta una predicción del mapa de cobertura (ver figura 5.102) usando los valores de los puntos de potencia separados una resolución de 0.2 cada 10 grados.

Una vez hallada la diferencia entre los mapas de cobertura (Figura 5.103) se observa gracias a la tabla de atributos (Figura 5.104) que el 45.7% de las celdas dentro del espacio *indoor* presenta una diferencia menor a 1 dB.

*Cada 20 grados*

A)

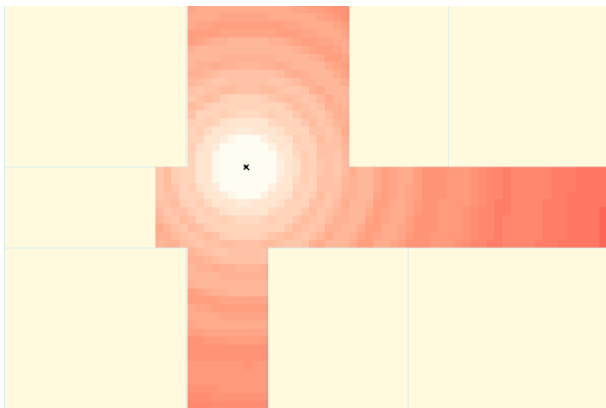


Figura 5.105. Cobertura Óptica geométrica con paredes absorbentes

B)

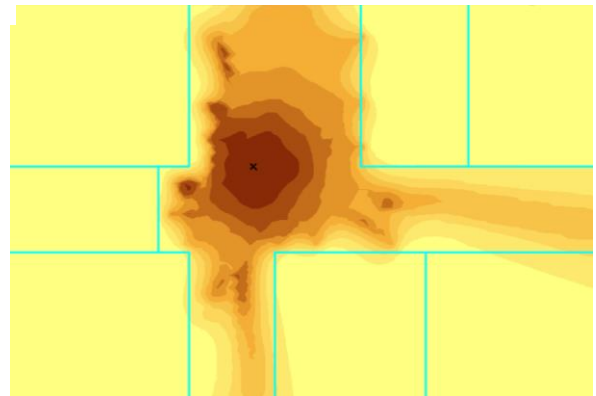


Figura 5.106. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 20 grados

C)

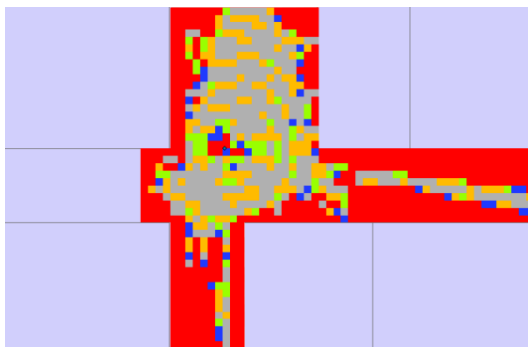


Figura 5.107. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 20 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	300
1	1	161
2	2	71
3	3	44

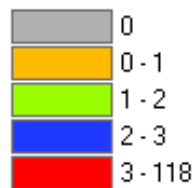


Figura 5.108. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 20 grados

Se visualiza una predicción del mapa de cobertura (ver figura 5.106) obteniendo los valores de los puntos de potencia separados una resolución de 0.2 cada 20 grados. Estos puntos, al no estar distribuidos de una forma simétrica se observa como en algunas zonas del mapa (Figura 5.90) los círculos concéntricos están difusos, desapareciendo por algunas zonas del entorno.

Una vez hallada la diferencia entre los mapas de cobertura (Figura 5.107) se observa gracias a la tabla de atributos (Figura 5.108) que el 41% de las celdas dentro del entorno presenta una diferencia menor a 1 dB, valor que ha disminuido en relación con el apartado anterior.

*Cada 40 gados*

A)

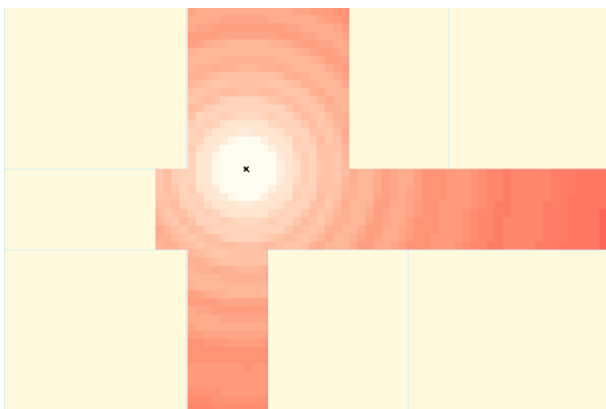


Figura 5.109. Cobertura Óptica geométrica con paredes absorbentes

B)

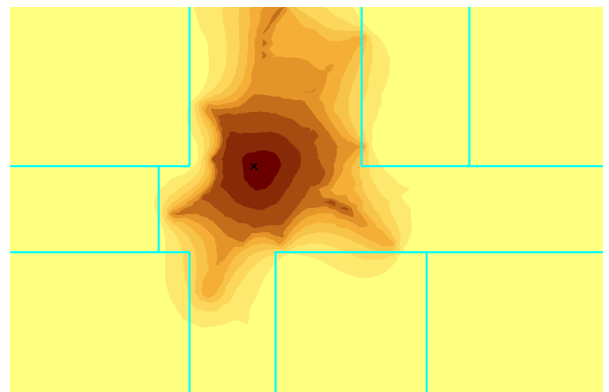


Figura 5.110. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 40 grados

C)

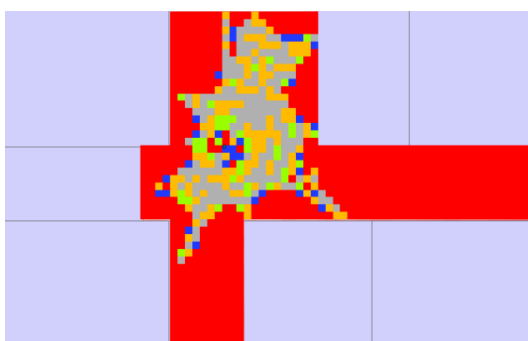


Figura 5.111. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 40 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	162
1	1	127
2	2	43
3	3	32

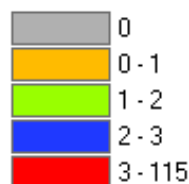


Figura 5.112. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 40 grados

A la vista de los resultados, se pueden destacar una serie de aspectos.

El primer aspecto a resaltar es que en la figura 5.110 vemos un mapa de cobertura predicho con unos círculos concéntricos muy difusos. Esto hace que la diferencia entre ambos mapas sea muy grande. En la figura 5.111 se puede visualizar lo comentado anteriormente, sabiendo que el color rojo pertenece a aquellas celdas del entorno *indoor* que presentan un valor de diferencia mayor a 3 dB y como se puede observar está presente en gran parte del entorno.

De una forma analítica también se puede comprobar, puesto que mediante la figura 5.112 se llega a la conclusión de que el 70.3% de las celdas del espacio de trabajo presenta una diferencia mayor a 3 dB, un valor porcentual bastante alto debido a las condiciones que

**5.1.8- Óptica geométrica con una reflexión, reflexión en el suelo y transmisión.  
Paredes absorbentes**

*Cada 5 grados*

A)

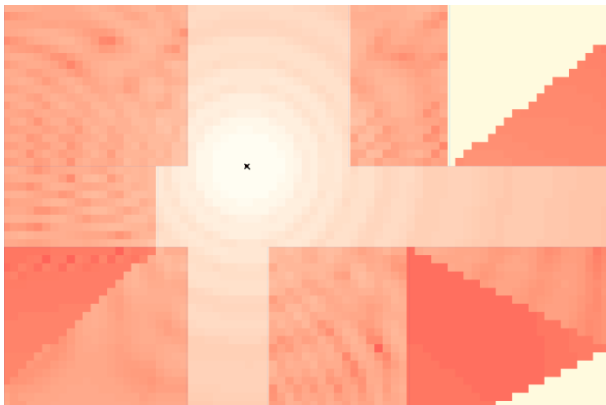


Figura 5.113. Cobertura Óptica geométrica con paredes absorbentes

B)

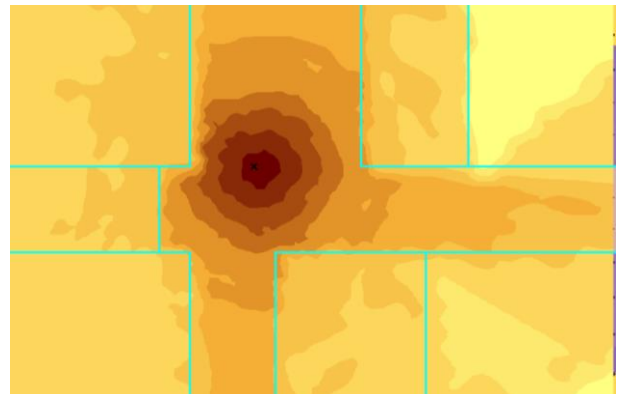


Figura 5.114. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 5 grados

C)

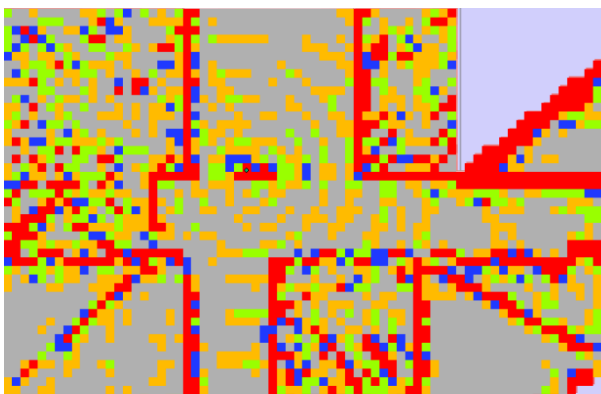


Figura 5.115. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 5 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	1340
1	1	667
2	2	355
3	3	166

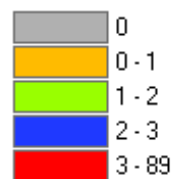


Figura 5.116. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 5 grados

La figura 5.113 representa el mapa de cobertura radioeléctrica estimada a partir del modelo de propagación Óptica geométrica con una única reflexión, reflexión en el suelo y transmisión en paredes absorbentes. A su derecha, se observa el mapa de cobertura predicha a partir de los valores de potencia obtenidos cada 5 grados (ver Figura 5.114), este mapa presenta unos círculos concéntricos igual que en el mapa de cobertura original. Una vez calculada la diferencia entre estos dos mapas de cobertura (Figura 5.115), se observa la tabla de atributos (Figura 5.116) donde se obtiene analíticamente un valor porcentual de 62.5% donde las celdas dentro del entorno de trabajo presentan una diferencia menor a 1 dB.

*Cada 10 grados*

A)

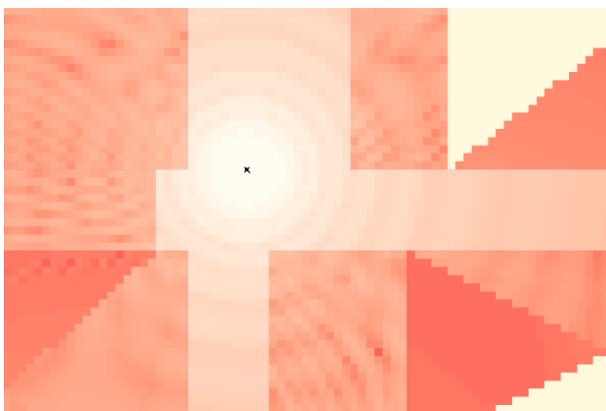


Figura 5.117. Cobertura Óptica geométrica con paredes absorbentes

B)

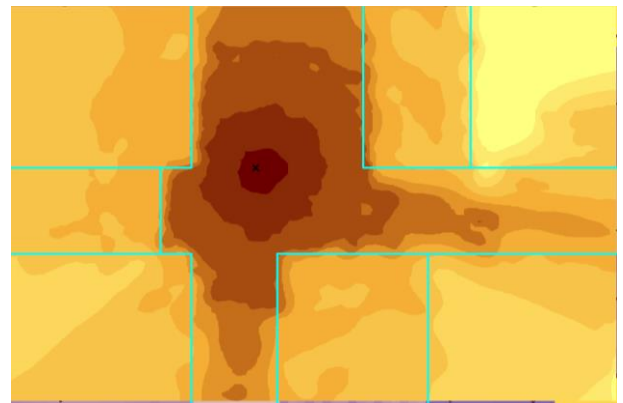


Figura 5.118. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 10 grados

C)

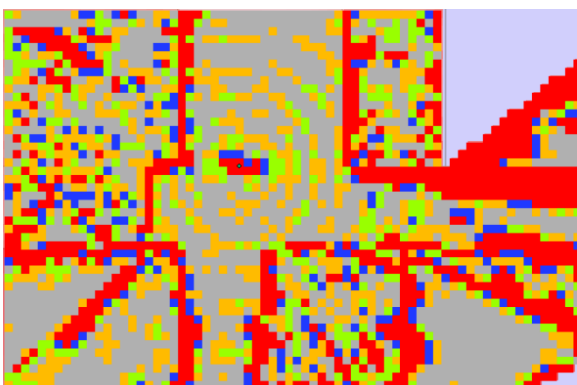


Figura 5.119. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 10 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	1129
1	1	611
2	2	357
3	3	207

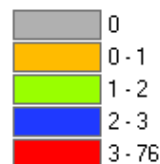


Figura 5.120. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 10 grados

A continuación, se observa una predicción del mapa de cobertura (ver figura 5.118) usando los valores de los puntos de potencia separados una resolución de 0.2 cada 10 grados.

Una vez hallada la diferencia entre los mapas de cobertura (Figura 5.119) se observa gracias a la tabla de atributos (Figura 5.104) que el 54.2% de las celdas dentro del espacio *indoor* presenta una diferencia menor a 1 dB.

*Cada 20 grados*

A)

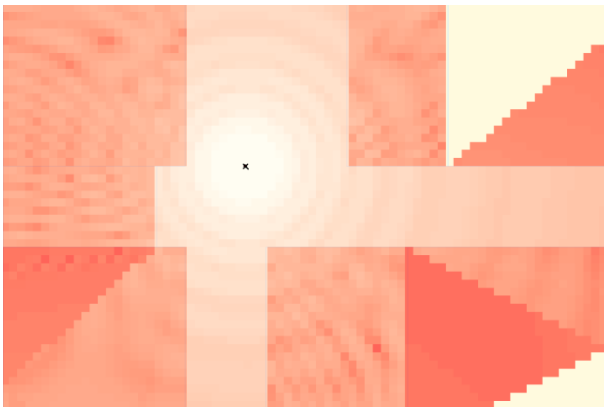


Figura 5.121. Cobertura Óptica geométrica con paredes absorbentes

B)

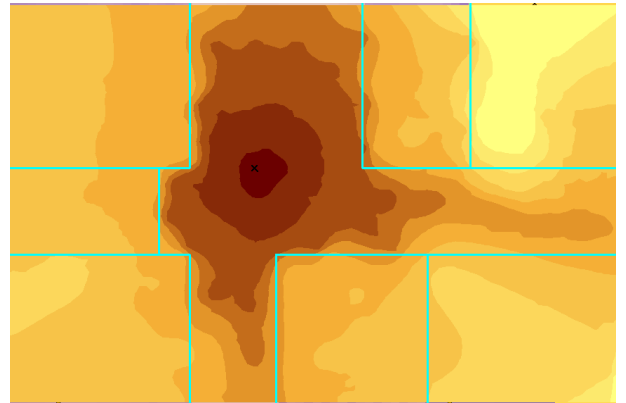


Figura 5.122. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 20 grados

C)

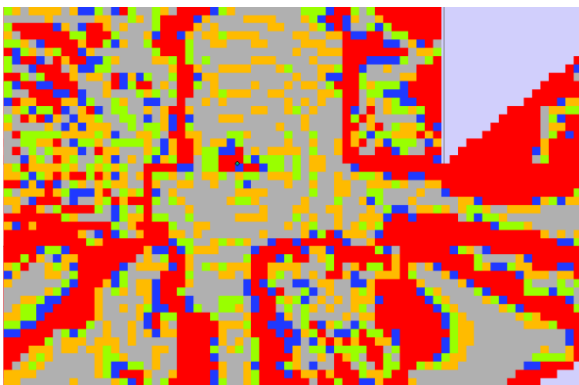


Figura 5.123. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 20 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	898
1	1	551
2	2	349
3	3	251

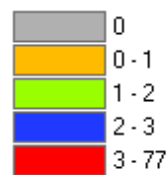


Figura 5.124. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 20 grados

Se muestra una predicción del mapa de cobertura (ver figura 5.122) usando los valores de los puntos de potencia separados una resolución de 0.2 cada 20 grados, de este modo una vez calculada la diferencia entre los mapas de cobertura (Figura 5.123) se presta atención a la tabla de atributos (Figura 5.124), la cual muestra un valor del 45% de las celdas que presentan una diferencia menor a 1 dB, lo cual es un valor inferior a la mitad.

### Cada 40 grados

A)

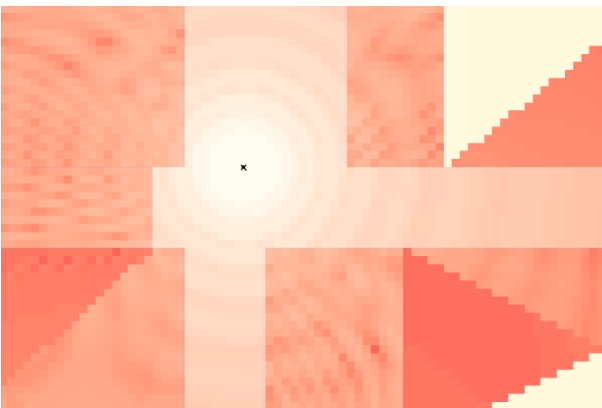


Figura 5.125. Cobertura Óptica geométrica con paredes absorbentes

B)

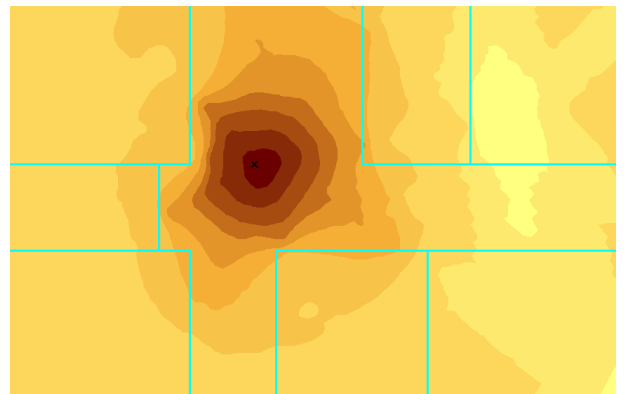


Figura 5.126. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 40 grados

C)

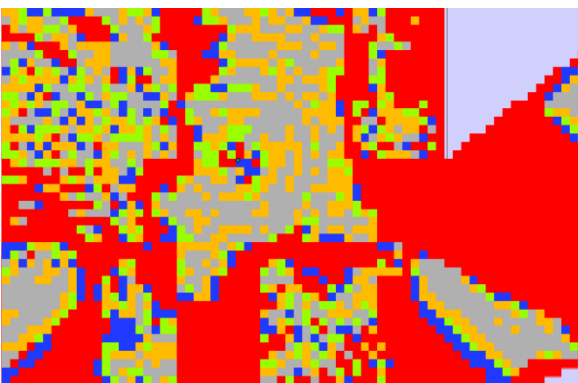


Figura 5.127. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 40 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	620
1	1	509
2	2	282
3	3	235

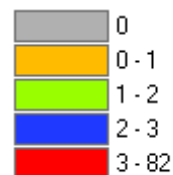


Figura 5.128. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 40 grados

A lo largo de esta sección, se han de destacar varios aspectos importantes. Visualmente, se puede ver la diferencia entre el mapa de cobertura radioeléctrica original (Figura 5.125) y el mapa de cobertura predicha (Figura 5.126) en la figura 5.127, donde se ha llegado a un resultado porcentual en el que el 35% de las celdas del espacio *indoor* presentan



un valor inferior a 1 dB. Un valor pequeño pero coherente con respecto a la cantidad de puntos de potencia cogidos para predecir el mapa de cobertura radioeléctrica (Figura 5.94). Estos puntos no son cogidos de una manera simétrica, así que, el resultado será un mapa de cobertura aproximado.

Otro aspecto a destacar es como tanto en el mapa de cobertura original y el mapa de cobertura predicha hay zonas donde no llega potencia, por lo que esto también es visible en la figura 5.127, la cual muestra la diferencia entre ambas.

**5.1.9- Óptica geométrica con una reflexión, reflexión en el suelo, transmisión y difracción. Paredes absorbentes**

*Cada 5 grados*

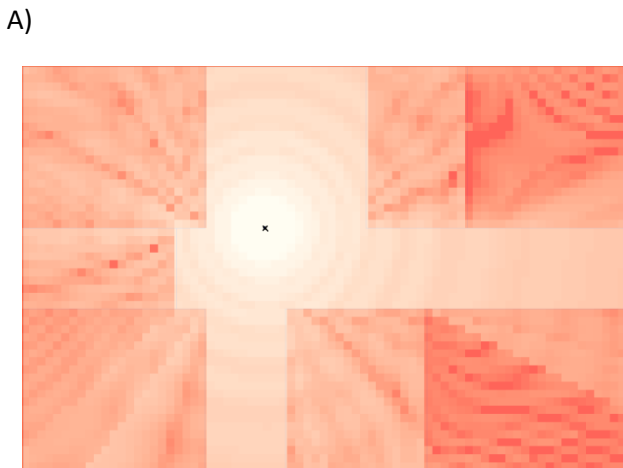


Figura 5.129. Cobertura Óptica geométrica con paredes absorbentes

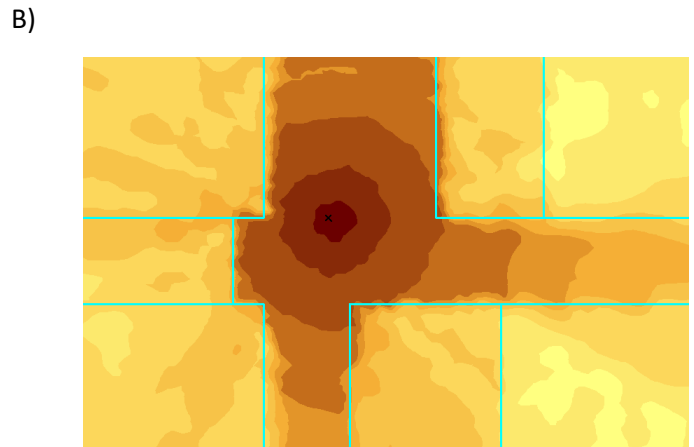


Figura 5.130. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 5 grados

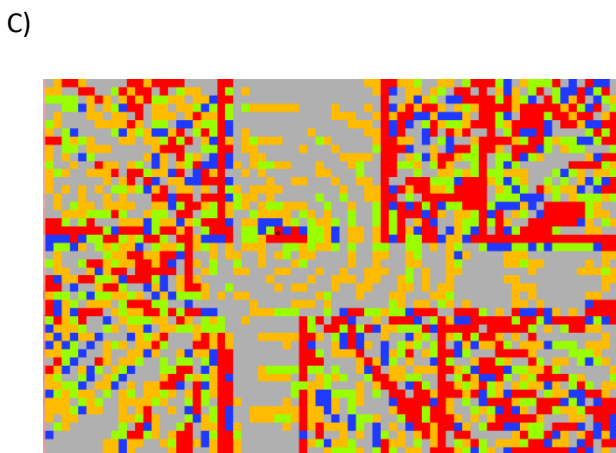


Figura 5.131. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 5 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	1121
1	1	744
2	2	450
3	3	273

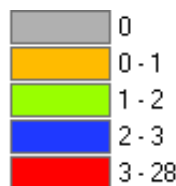


Figura 5.132. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 5 grados

La figura 5.129 representa el mapa de cobertura radioeléctrica estimada a partir del modelo de propagación Óptica geométrica con una única reflexión, reflexión en el suelo, transmisión y difracción en paredes conductoras. A diferencia del apartado anterior, la radiación de potencia llega a todo el entorno de trabajo. A su derecha, se observa el mapa de cobertura predicha a partir de los valores de potencia usados cada 5 grados (ver Figura 5.130). Una vez calculada la diferencia entre estos dos mapas de cobertura (Figura 5.131), se observa la tabla de atributos (Figura 5.132) donde se obtiene un porcentaje de 58% donde las celdas dentro del entorno de trabajo presentan una diferencia menor a 1 dB.

### Cada 10 grados

A)

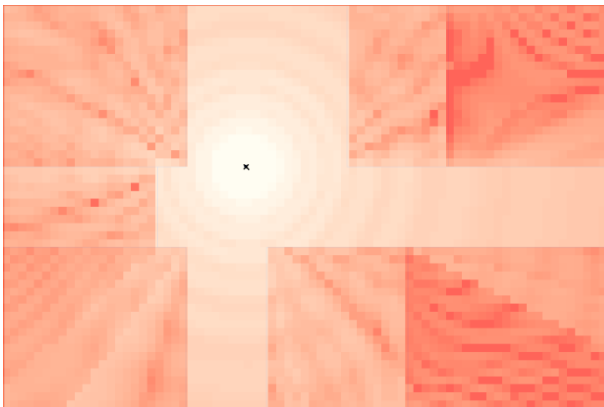


Figura 5.133. Cobertura Óptica geométrica con paredes absorbentes

B)

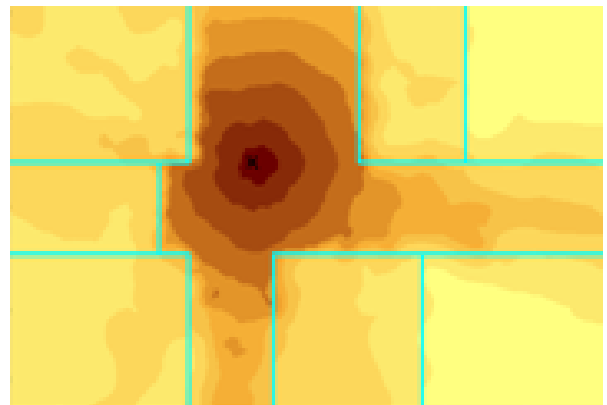


Figura 5.134. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 10 grados

C)

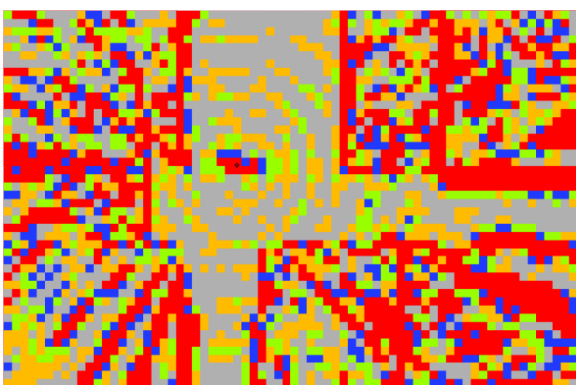


Figura 5.135. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 10 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	937
1	1	637
2	2	428
3	3	321

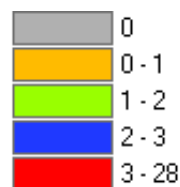


Figura 5.136. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 10 grados

Seguidamente, se observa una predicción del mapa de cobertura (ver figura 5.134) usando los valores de los puntos de potencia separados una resolución de 0.2 cada 10 grados.

Una vez hallada la diferencia entre los mapas de cobertura (Figura 5.135) se observa gracias a la tabla de atributos (Figura 5.136) que el 49% de las celdas dentro del espacio *indoor* presenta una diferencia menor a 1 dB.

### Cada 20 grados

A)

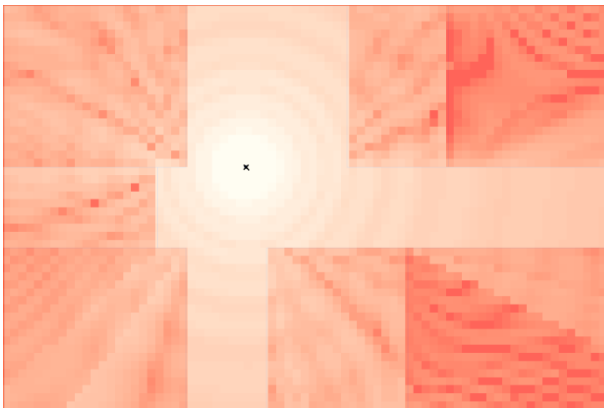


Figura 5.137. Cobertura Óptica geométrica con paredes absorbentes

B)

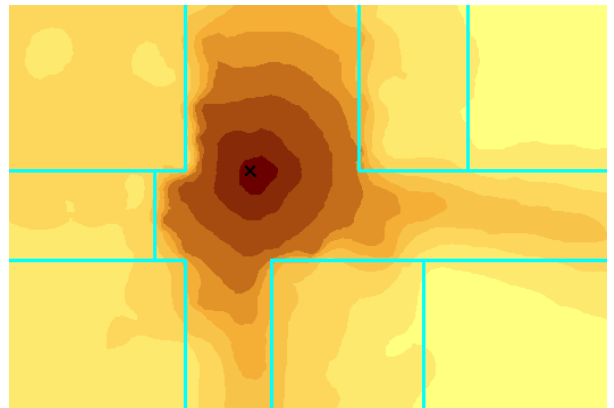


Figura 5.138. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 20 grados

C)

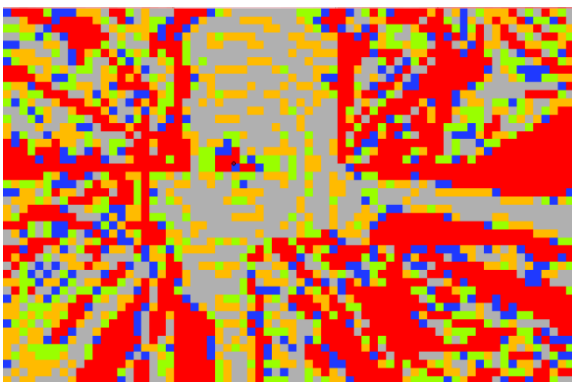


Figura 5.139. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 20 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	835
1	1	583
2	2	410
3	3	300

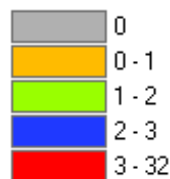


Figura 5.140. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 20 grados

Visualmente, se puede apreciar la diferencia entre el mapa de cobertura radioeléctrica original (Figura 5.137) y el mapa de cobertura predicha (Figura 5.138) en la figura 5.139, donde

la mayoría de las celdas presentan un color gris o amarillo, indicando una mayoría con una diferencia inferior a 1dB.

Análiticamente, se llega a la misma conclusión, a través de la tabla de atributos de la diferencia (Figura 5.140) donde se calcula un porcentaje de 44.1% en el que las celdas tienen un valor inferior a 1 dB.

### Cada 40 grados

A)

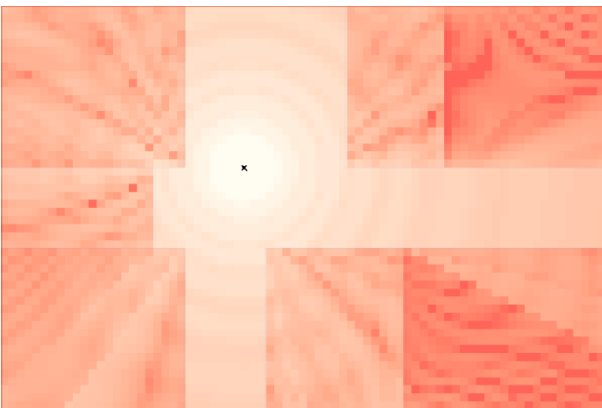


Figura 5.141. Cobertura Óptica geométrica con paredes absorbentes

B)

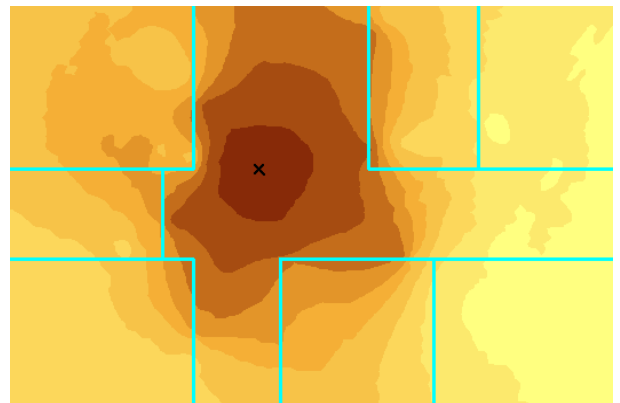


Figura 5.142. Cobertura Óptica geométrica predicha con puntos cada 40 grados

C)

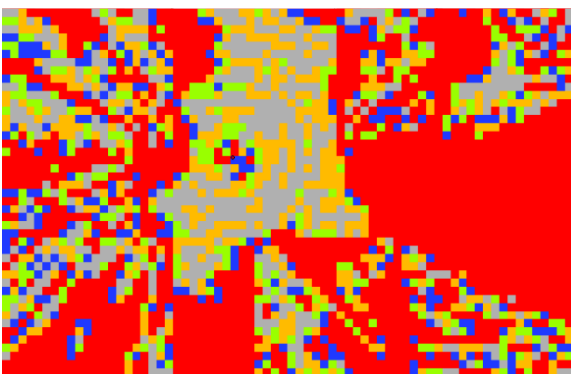


Figura 5.143. Error de la cobertura Óptica geométrica con puntos cada 40 grados

D)

ObjectID	Value	Count
0	0	561
1	1	467
2	2	298
3	3	284

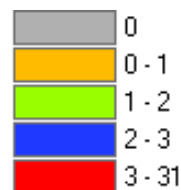


Figura 5.144. Tabla de atributos del error con la cobertura predicha cada 40 grados

Se han de destacar varios aspectos importantes a lo largo de este apartado. Visualmente, se puede ver la diferencia entre el mapa de cobertura radioeléctrica original (Figura 5.141) y el mapa de cobertura predicha (Figura 5.142) en la figura 5.143, donde se ha llegado a un resultado porcentual en el que el 32% de las celdas del espacio *indoor* presentan

un valor inferior a 1 dB. Un valor pequeño pero coherente con respecto a la cantidad de puntos de potencia usados para predecir el mapa de cobertura radioeléctrica (Figura 5.143). Estos puntos no son cogidos de una manera simétrica.

Además, un aspecto a tener en cuenta es como la diferencia entre los dos mapas de cobertura presenta una forma muy parecida al mapa de cobertura predicho.

A continuación, se van a comentar las conclusiones que se han sacado de todos los resultados obtenidos.

## Capítulo 6. Conclusiones y líneas futuras

---

## 6.1- CONCLUSIONES

En el primer capítulo se describieron los objetivos de este proyecto. De forma resumida éstos eran:

- El primer objetivo es estimar un mapa de cobertura radioeléctrica en un área determinada a partir de un número finito de celdas en esa área, en las que se conoce previamente las pérdidas de propagación al haberse obtenido mediante RADIOGIS. Dicha estimación es realizada mediante la extensión de ArcGIS 9.1 denominada 'Geostatistical Analyst'.
- El segundo objetivo es analizar la diferencia entre el mapa de cobertura radioeléctrica original (estimado mediante RADIOGIS) y el mapa de cobertura predicha (estimado mediante la extensión Geostatistical Analyst de ArcGIS).

El primero de los objetivos ha abarcado aproximadamente la mitad de la duración del proyecto. Se ha conseguido la estimación de coberturas radioeléctrica mediante el modelo de propagación en entornos interiores y el modelo de lanzamiento de rayos. Aunque inicialmente fue complicado debido a numerosos obstáculos, finalmente se logró solventar los problemas.

Esta primera parte ha permitido conocer en profundidad el funcionamiento básico de varios programas, principalmente RADIOGIS, y ArcMap, Geostatistical Analyst y Spatial Analyst de ArcGIS, así como MATLAB.

A la vista de los resultados obtenidos, se observa que, al utilizar el modelo en espacio libre para el entorno interior, por encima del 70% el error es nulo, lo cual es un valor porcentual muy bueno, es decir, la diferencia entre coberturas de potencia es muy parecida. En cambio, usando el modelo de propagación Óptica Geométrica con solo una única reflexión, este valor es de 37%, a partir de aquí, a medida que se han ido cogiendo menos puntos de valores de potencia en nuestro espacio *indoor* de  $4 \times 10$  (m) estos porcentajes van disminuyendo, viendo así un valor porcentual de 25.8% cuando los valores son cogidos cada 10 grados, 20.8% y 15.7%, cada 20 y 40 grados respectivamente.

Se ha realizado un cálculo estadístico de las diferencias entre 0-3 dBs, prescindiendo de los valores intermedios, donde en la figura 5.1 se observa la cantidad de dBs frente a la cantidad de celdas que tienen esa diferencia.

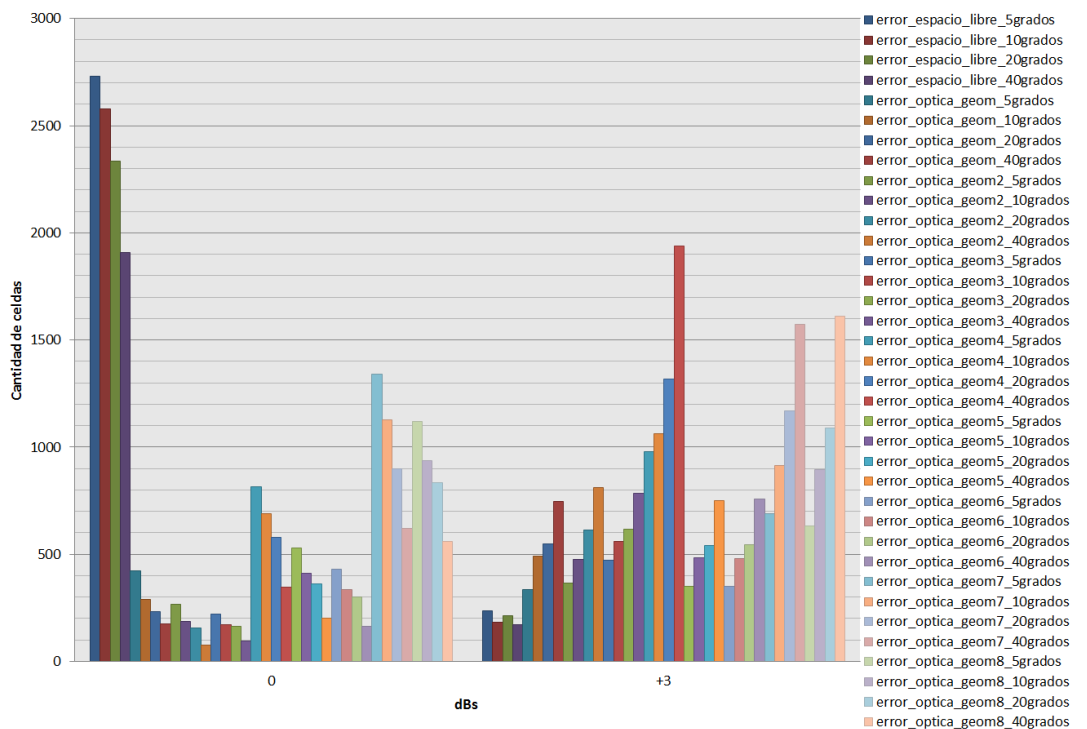


Figura 6.1. Error para cada cobertura

A modo de resumen, se puede observar en la figura 6.1:

- La diferencia hallada con el método de espacio libre usando puntos de potencia cada 5 grados presenta un valor porcentual de 85.1% en el que las celdas del entorno de trabajo presentan un valor de 0 dB, un valor bastante significativo en la figura 6.1.
- A la vista está también cómo la diferencia mayor se da en las simulaciones realizadas con Óptica geométrica, añadiéndole reflexión, reflexión en el suelo, transmisión y difracción en paredes conductoras. Esta diferencia presenta un porcentaje de 68.2%, el cual representa la cantidad de celdas que tienen una diferencia superior a 3 dB. Esto se puede observar también en la figura 6.1.

## 6.2- LÍNEAS FUTURAS

A partir de este proyecto se pueden hablar de unas líneas de trabajo derivadas de este.

La primera de ellas podría ser haber realizado este proyecto cambiando la frecuencia para cada cobertura realizada, puesto que en la línea seguida en la realización de este trabajo se ha dejado una frecuencia de 900 MHz para cada una de ellas.

En segundo lugar, este proyecto se ha realizado con el método 'kriging' en la predicción de un mapa de cobertura, así que otra vía importante a seguir sería usando otro método, por ejemplo, 'cokriging', con el fin de observar las diferencias en los resultados.



En tercer lugar, si en vez de simulaciones de cobertura radioelétrica se dispone de medidas en un entorno se podría utilizar la metodología de este proyecto para analizar si es posible obtener mapas de cobertura en un área a partir de medidas de potencia en ciertos puntos de esa área.

## Capítulo 7. Bibliografía

---

## Bibliografía

- [1] José María Hernando Rábanos, Comunicaciones Móviles, Ed. Centro de estudios Ramón Areces, 1997.
- [2] José María Hernando Rábanos, Transmisión por Radio, Ed. Centro de estudios Ramón Areces, 1997.
- [3] Fco. Javier Ponce Juan, José María Molina García-Pardo, José Víctor Rodríguez Rodríguez, Leandro Juan Llácer, "RAGIS: herramienta de gestión y de cálculo de cobertura radioeléctrica basada en sistemas de información geográfica", Asociación Hispanoamérica de Centros de Investigación y Empresas de Telecomunicaciones, vol. 101, pp. 59-63, Enero 2005.
- [4] <http://www.esri.es/>
- [5] Manual de ArcGIS: What is ArcGIS 9.1?
- [6] <http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/internet/sistemainformaciongeografica.pdf>
- [7] <https://langleruben.wordpress.com/%C2%BFque-es-un-sig/>
- [8] Manual de ArcGIS: Getting Started With ArcGIS.
- [9] Manual de ArcGIS: Exploring ArcObjetcts. Vol.1- Applications and Cartography
- [10] Manual de ArcGIS: Exploring ArcObjetcts. Vol.2- Graphics Data Management
- [11] Google, Imágenes, Ventana de Catálogo, ArcGIS, obtenido de:[https://www.google.es/search?biw=1350&bih=635&tbm=isch&sa=1&ei=Hi1HW\\_HrEc2jUObWlJgN&q=ventana+de+catalogo+de+arcgis&oq=ventana+de+catalogo+de+arcgis&gs\\_l=img.3...3874.5792.0.5886.10.10.0.0.0.100.752.9j1.10.0....0...1c.1.64.img..0.1.76...0i8i30k1.0.KDRRReiubJk](https://www.google.es/search?biw=1350&bih=635&tbm=isch&sa=1&ei=Hi1HW_HrEc2jUObWlJgN&q=ventana+de+catalogo+de+arcgis&oq=ventana+de+catalogo+de+arcgis&gs_l=img.3...3874.5792.0.5886.10.10.0.0.0.100.752.9j1.10.0....0...1c.1.64.img..0.1.76...0i8i30k1.0.KDRRReiubJk)
- [12] Google, Imágenes, Marco de datos, ArcMap, obtenido de:[https://www.google.es/search?biw=1350&bih=635&tbm=isch&sa=1&ei=Hi1HW\\_HrEc2jUObWlJgN&q=ventana+de+catalogo+de+arcgis&oq=ventana+de+catalogo+de+arcgis&gs\\_l=img.3...3874.5792.0.5886.10.10.0.0.0.100.752.9j1.10.0....0...1c.1.64.img..0.1.76...0i8i30k1.0.KDRRReiubJk](https://www.google.es/search?biw=1350&bih=635&tbm=isch&sa=1&ei=Hi1HW_HrEc2jUObWlJgN&q=ventana+de+catalogo+de+arcgis&oq=ventana+de+catalogo+de+arcgis&gs_l=img.3...3874.5792.0.5886.10.10.0.0.0.100.752.9j1.10.0....0...1c.1.64.img..0.1.76...0i8i30k1.0.KDRRReiubJk)
- [13] <http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/geostat.pdf>
- [14] <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-kriging-works.htm>
- [15] <http://www.geotecnologias.com/Documentos/GIS.pdf>
- [16] Manual de ArcGIS: Using ArcGIS Spatial Analyst
- [17] <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/1862/tfm8.pdf?sequence=1>

- [18] Juan Pascual García, José María Molina García-Pardo, Leandro Juan Llácer, Sistemas de Comunicaciones Móviles, Universidad Politécnica de Cartagena, 2010.
- [19] Google, Imágenes, Rayo directo,  
[https://www.google.es/search?biw=1350&bih=635&tbm=isch&sa=1&ei=0y1HW5zLLYL6UtiZsZgE&q=rayo+directo+y+reflejado&oq=rayo+directo+y+reflejado&gs\\_l=img.3...3172.18400.0.18625.12.12.0.0.0.0.81.849.12.12.0...0...1c.1.64.img..0.0.0...0.SBPOTGbkNFQ](https://www.google.es/search?biw=1350&bih=635&tbm=isch&sa=1&ei=0y1HW5zLLYL6UtiZsZgE&q=rayo+directo+y+reflejado&oq=rayo+directo+y+reflejado&gs_l=img.3...3172.18400.0.18625.12.12.0.0.0.0.81.849.12.12.0...0...1c.1.64.img..0.0.0...0.SBPOTGbkNFQ)
- [20] Camargo Olivares, Trazado de rayos, Capítulo 7, Volumen 3
- [21] Manual ArcGIS: Using Geostatistical Analyst