

**Verificación y Sintonización del Algoritmo de Radio-propagación DeJong-
RadioGIS en una Zona Piloto de Bucaramanga**

Por:

**Adriana Lucía Moreno Vergel
Luis Ferley Sierra Jaimes**

**Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas
Ingeniería Electrónica
Bucaramanga
2010**

**Verificación y Sintonización del Algoritmo de Radio-propagación DeJong-
RadioGIS en una Zona Piloto de Bucaramanga**

**Adriana Lucía Moreno Vergel
Luis Ferley Sierra Jaimes**

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electrónico

**Director:
PhD. Homero Ortega Boada**

**Codirector:
Ing. Celso Andrés Forero**

**Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas
Ingeniería Electrónica
Bucaramanga
2010**

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Dios por permitir que este trabajo fuera una realidad y haberlo llevado a buen término.

PhD. Homero Ortega Boada e Ing. Celso Andrés Forero, directores del proyecto, por su orientación y colaboración en la ejecución de la investigación.

Grupo de investigación RadioGIS por contribuir al desarrollo del algoritmo de radiopropagación DeJong-RadioGIS.

Los directivos y profesores de la Universidad Industrial de Santander, que de manera directa o indirecta hicieron parte del presente trabajo al haber puesto sus conocimientos al servicio del estudiantado.

Familiares y amigos que brindaron apoyo y ánimo en los momentos necesarios.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. PRESENTACIÓN DEL PREOYECTO	20
1.1 INTRODUCCIÓN	20
1.2 TRABAJO PREVIO REALIZADO EN RADIOGIS	24
1.2.1 Herramienta de acceso remoto (Geoportal)	25
1.2.2 CellGIS	26
1.2.3 Algoritmo DeJong-RadioGIS basado en el modelo DeJong	27
1.3 OBJETIVOS	28
1.3.1 Objetivo general	28
1.3.2 Objetivos específicos	28
1.4 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	29
2. FUNDAMENTOS DEL ALGORITMO DEJONG-RADIOGIS	31
2.1 INTRODUCCIÓN	31
2.2 MODELO DEJONG	31
2.3 MODELO DE RADIOPROPAGACIÓN DEJONG RADIOGIS	34
2.3.1 Mecanismos de propagación del modelo implementado	35
2.3.1.1 Transmisión directa con línea de vista	35
2.3.1.2 Reflexiones en las paredes de las edificaciones	38
2.3.1.3 Transmisión a través de las edificaciones	40
2.4 MODELO DE TRAZADO DE RAYOS	42

2.4.1	Descripción del modelo	43
2.4.1.1	Estimación de parámetros del canal	43
2.4.1.2	Estimación de la potencia media local	44
3.	METODOLOGÍA DE SINTONIZACIÓN	46
3.1	INTRODUCCIÓN	46
3.2	CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE SINTONIZACIÓN	46
3.2.1	Ajuste de las características del entorno	47
3.2.2	Factor de atenuación efectivo	47
3.2.3	Pérdidas por reflexión	48
3.2.4	Pérdidas por transmisión	48
3.2.5	Permitividad compleja y conductividad	49
3.3	ESTRATEGIA DE SINTONIZACIÓN	49
3.3.1	Modelado de las características del entorno	50
3.3.2	Obtención del coeficiente de reflexión y transmisión	52
3.3.3	Verificación del algoritmo sintonizado	55
3.4	ELECCIÓN DE LOS SITIOS DE MEDICIÓN	56
4.	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	57
4.1	INTRODUCCIÓN	57
4.2	SINTONIZACIÓN DEL ENTORNO DE MEDICIÓN	58
4.2.1	Mediciones en espacio libre	58
4.2.2	Ajuste de las condiciones del medio	62

4.3	CARACTERIZACIÓN DE LOS EDIFICIOS EN EL ALGORITMO	63
4.3.1	Mediciones en un ambiente <i>semi-controlado</i>	64
4.3.2	Sintonización de los coeficientes de reflexión y transmisión	66
4.3.3	Sintonización del factor de atenuación efectivo α_b	67
4.3.4	Simulación y reducción del error cuadrático medio	68
4.3.5	Cálculo y ajuste de los parámetros de sintonización en Hidráulica	71
4.4	VERIFICACIÓN DEL ALGORITMO SINTONIZADO	73
	RECOMENDACIONES	82
	CONCLUSIONES	84
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 4.1 Resultados de las mediciones en el estadio <i>primero de mayo</i>	60
Tabla 4.2 Sintonización de las pérdidas por espacio libre	62
Tabla 4.3 Datos resultantes de medición en LAT	66
Tabla 4.4 Cálculo del error medio cuadrático para las curvas de la Figura 4.6	70
Tabla 4.5 Datos resultantes de medición en Hidráulica	71
Tabla 4.6 Cálculo del error medio cuadrático para las curvas de la Figura 4.6	72
Tabla 4.7 Cálculo del error cuadrático medio para la ruta 1 (Color amarillo)	75
Tabla 4.8 Ruta 1 de medición (color amarillo)	76
Tabla 4.9 Ruta 2 de medición (color rojo)	77
Tabla 4.10 Error cuadrático medio calculado en la ruta 2 (color rojo en la Figura 4.8)	77
Tabla 4.11 Ruta 3 de medición (color azul)	78
Tabla 4.12 Error cuadrático medio calculado en la ruta 3 (color azul en la Figura 4.8)	79
Tabla 4.13 Ruta 4 de medición (color verde)	79
Tabla 4.14 Error cuadrático medio calculado en la ruta 4 (color verde en la Figura 4.8)	80
Tabla A1 Pérdidas en el cable a diferentes frecuencias y potencia transmitidas	95

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1. Plataforma integral de servicios RadioGIS	25
Figura 2.1. Mecanismos de propagación incluidos en el modelo DeJong	32
Figura 2.2. Transmisión directa con línea de vista	36
Figura 2.3. Reflexión y transmisión a través de una pared dieléctrica	39
Figura 2.4. Ilustración del modelo para un edificio (vista superior)	40
Figura 2.5. Ilustración del modelo simplificado del edificio	42
Figura 3.1. Campaña de medidas en el estadio <i>primero de mayo</i> de la UIS	50
Figura 3.2. Esquemas de rutas	51
Figura 3.3. Frecuencia y nivel en el generador (R&S SMB 100A <i>Signal generator</i>)	51
Figura 3.4. Rutas de medición, LAT	53
Figura 3.5. Trazado de rayos para los puntos de observación 5, 21 y 30 de la ruta 1 (distancia en metros)	54
Figura 3.6. Frecuencia y nivel en el generador (R&S SMB 100A <i>Signal generator</i>)	55
Figura 4.1. Estadio <i>primero de mayo</i> (UIS)	59
Figura 4.2.1. Mediciones en el estadio <i>primero de Mayo</i> (UIS)	61
Figura 4.2.2. Gráfica de los resultados de medición en espacio libre. Estadio <i>primero de Mayo</i> (UIS)	61
Figura 4.3. Ajuste de las pérdidas por espacio libre	62
Figura 4.4. Zona de medición edificios LAT e Hidráulica (vista superior)	65

Figura 4.5.	Rutas de medición edificios LAT e Hidráulica	65
Figura 4.6.	Resultados de medición, cálculo y simulación para LAT	69
Figura 4.7.	Resultados de medición y simulación para el edificio de Hidráulica.	72
Figura 4.8.	Zona de medición edificios, barrio El Prado (vista superior)	74
Figura 4.9.	Comparación de resultados medidos vs simulados en la ruta 1 (color amarillo de la Figura 4.8)	76
Figura 4.10.	Comparación de resultados medidos vs simulados en la ruta 2 (color rojo de la Figura 4.8)	78
Figura 4.11.	Comparación de resultados medidos vs simulados en la ruta 3 (color azul de la Figura 4.8)	79
Figura 4.12.	Comparación de resultados medidos vs simulados en la ruta 4 (color verde de la Figura 4.8)	80
Figura A1.	Analizar de espectros (ROHDE&SCHWARZ ZVL6 <i>network analyser</i>)	90
Figura A2.	Generador de señales (ROHDE&SCHWARZ SMB 100A <i>signal generator</i>)	90
Figura A3.	Antena 11 dBi (HG1911U)	91
Figura A4.	Patrón de radiación de la antena (HG1911U)	91
Figura A5.	Antena 3.5 dBi (HG2404CU)	92
Figura A6.	Patrón de radiación de la antena (HG2404CU)	92
Figura A7.	Información del cable coaxial utilizado en las campañas de medidas	93
Figura B1.	Potencia en dBm en función de la distancia para un radioenlace	96
Figura D1.	Campaña de medidas en el estadio <i>primero de mayo</i> de la Universidad Industrial de Santander (todas las rutas)	99

Figura D2.	Campaña de medidas en El Prado, Bucaramanga (ruta 1)	99
Figura D3.	Campaña de medidas en El Prado, Bucaramanga (ruta 2)	100
Figura D4.	Campaña de medidas en El Prado, Bucaramanga (ruta 3)	100
Figura D5.	Campaña de medidas en El Prado, Bucaramanga (ruta 4)	101
Figura D6.	Campaña de medidas en El Prado, Bucaramanga	101
Figura D7.	Interfaz gráfica del algoritmo DeJong-RadioGIS, El Prado	102
Figura D8.	Interfaz gráfica del algoritmo DeJong-RadioGIS, LAT	102

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A Dispositivos de medición	90
Anexo B Cálculo de radioenlace	96
Anexo C Error cuadrático medio y mínimos cuadrados	98
Anexo D Herramientas de RadioGIS	99

GLOSARIO

Atenuación del espacio libre	Atenuación causada una señal en ausencia de cualquier obstáculo y de absorción. Es proporcional al cuadrado de la distancia y al cuadrado de la longitud de onda.
dB (decibel)	Una medida utilizada para expresar la proporción que relaciona dos valores, usualmente la potencia de señales eléctricas, ópticas o acústicas, igual a 10 veces el logaritmo del cociente de los dos niveles de potencia expresados en watts (W).
dBi	Decibelios respecto a una antena isotrópica. Medida de la ganancia de una antena con relación a la ganancia de una antena isotrópica, es decir la que irradia con la misma intensidad en todas las direcciones. La antena isotrópica no es físicamente realizable por lo que esta medida es siempre indirecta.
dBm	Decibelio referido a un miliwatt (mW). La potencia de una señal relativa a un miliwatt (0 dBm corresponde a 1 mW).
Ganancia de la antena	Cociente entre la cantidad de energía irradiada en la dirección preferencial y la que irradiaría una antena isotrópica alimentada por el mismo transmisor.
Longitud de onda	Distancia entre dos puntos consecutivos que están en fase. Se calcula dividiendo la velocidad de propagación entre la frecuencia.
Omnidireccional	Dícese de la antena que transmite en todas direcciones del plano horizontal con la misma ganancia.
Patrón de radiación, diagrama de radiación	Gráfico de la intensidad de la radiación emitida o recibida por una antena (en dB) en función del ángulo respecto al eje de la antena. Este diagrama es tridimensional, por lo que generalmente se grafica el diagrama de radiación horizontal y vertical.
Polarización	Dirección del vector campo eléctrico de una onda electromagnética. Puede ser vertical, horizontal, circular o elíptica. La desadaptación de polarización

puede introducir una pérdida mayor de 20 dB.

RESUMEN

TÍTULO: VERIFICACIÓN Y SINTONIZACIÓN DEL ALGORITMO DE RADIO-PROPAGACIÓN DEJONG-RADIOGIS EN UNA ZONA PILOTO DE BUCARAMANGA*

AUTORES: Adriana Lucía Moreno Vergel, Luis Ferley Sierra Jaimes.**

Palabras claves: radiopropagación, sintonización, verificación, trazado de rayos, pérdidas por trayectoria.

El algoritmo de radiopropagación DeJong-RadioGIS (modelo DeJong modificado que aún está en fase de desarrollo) implementado por el grupo de investigación RadioGIS*** hace parte de un conjunto de proyectos que contribuyen al desarrollo de una herramienta de apoyo a la gestión del espectro radioeléctrico.

La sintonización de los parámetros que implementa el algoritmo se realizó en tres escenarios diferentes. El ajuste del factor A , que modela las condiciones del medio, se realizó en un escenario despejado y promediando los resultados de cuatro rutas diferentes para mayor precisión, mientras que para la sintonización de las variables relacionadas con las edificaciones se usaron dos edificios en el campus universitario de la UIS ya que contaban con características un tanto diferentes.

El Proceso de verificación se realizó en una zona urbana de Bucaramanga. En este lugar se encontraban los factores que el algoritmo desarrollado desprecia, pero que están presentes en la práctica y afectan constantemente los niveles de potencia en los distintos puntos que conforman la microcelda. En este entorno se utilizaron los valores de los parámetros previamente sintonizados, la comparación entre los datos medidos y los simulados arrojó resultados satisfactorios.

El cálculo del error cuadrático medio en las condiciones adecuadas no supera los 8 dB para ninguna de las zonas de medición. Errores del orden de 20, 25 y hasta 30 [dB] que se obtuvieron en algunos puntos de observación, son debido a la sensibilidad (piso de ruido) del equipo de medición y no influyen negativamente en la verificación de resultados obtenidos mediante simulación con el algoritmo DeJong-RadioGIS.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Ph.D. Homero Ortega Boada. Codirector: Ing. Celso Andrés Forero.

*** Grupo de investigación y desarrollo de la UIS: <http://radiogis.uis.edu.co>.

ABSTRACT

TITLE: VERIFICATION AND TUNING OF DEJONG-RADIOGIS RADIO-PROPAGATION ALGORITHM IN A BUCARAMANGA'S PILOT ZONE*

AUTHORS: Adriana Lucía Moreno Vergel, Luis Ferley Sierra Jaimes.**

Keywords: radio-propagation, tuning, verification, ray tracing, path loss.

DeJong-RadioGIS radio-propagation algorithm (modified DeJong model; it is still under development) implemented by the research group RadioGIS*** is part of a set of projects, in order to contribute on the development of a tool that support radio spectrum management.

Parameters tuning implemented by the algorithm were tested in three different scenarios. The adjustment for A factor, which models environmental conditions, was conducted in an outdoor environment and averaging the results of four different routes to increase accuracy; while parameters tuning related to buildings were adjusted in two buildings on the campus because they had somewhat different characteristics.

Verification process was conducted in a Bucaramanga's urban area. In this urban environment were found factors that the developed algorithm despises, but they are present in real environments and constantly affect power levels at several points that are part of the microcell. In this environment were used parameters values previously tuned, the comparison between measured and simulated data were satisfactory.

Mean square error calculation under right conditions does not exceed 8 dB for any measurement areas. Some errors about 20, 25 and 30 [dB] were obtained due to sensitivity (noise level) of measuring equipment and it does not negatively affect the verification results obtained by DeJong-RadioGIS algorithm simulation.

* Thesis work.

** Faculty of Physicomechanical Engineering, School of Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering. Director: PhD. Homero Ortega Boada. Codirector: Eng. Celso Andrés Forero.

*** Research and Development Group at UIS University: <http://radiogis.uis.edu.co>.

1. PRESENTACIÓN DEL PROYECTO

1.1. INTRODUCCIÓN

El mundo enfrenta actualmente una alta demanda de ancho de banda la cual es causada por un aumento progresivo en el número de usuarios y el uso cada vez más frecuente de sistemas de comunicación y tecnologías inalámbricas que implementan servicios más complejos, con mayor transferencia de información. Por esta razón, los sistemas móviles buscan alternativas innovadoras que optimicen el uso del espectro radioeléctrico y satisfacer así la demanda creciente por el canal de radiopropagación. Una alternativa que está tomando gran fuerza es el uso de redes con tamaño de celda cada vez menor (microceldas), que aumentan el número de canales haciendo uso de la reutilización de frecuencias.

El uso de microceldas urbanas presenta dos grandes ventajas, las cuales son: dar cobertura en áreas específicas (aeropuertos, centros comerciales, entre otros) o lugares donde no llega señal y mejorar el manejo del tráfico donde usualmente se presenta congestión alrededor de las macroceldas instaladas. La estación radio base da cobertura en los lugares mencionados anteriormente, haciendo uso del mismo espectro radioeléctrico (en la banda UHF – *Ultra High Frequency*). La radiopropagación a su vez, abarca complejos fenómenos de desvanecimiento (por trayectoria o por sombra), reflexión (en las paredes y otros obstáculos), difracción (en las esquinas de los edificios) y dispersión (por árboles o rugosidad del terreno

u objetos). La precisión en las predicciones de cobertura inalámbrica que se pueda obtener, es fundamental para la adecuada planeación de la red y hacer óptimo uso del espectro, brindando al mismo tiempo servicios con alta calidad, sin embargo, no siempre es posible realizar mediciones físicas debido a la complejidad que ello implica. Haciendo uso de herramientas de software se pueden lograr resultados aceptables en la práctica, permitiendo al usuario analizar sistemas de gran perspectiva para el mundo.

Se han desarrollados varios modelos de propagación, cada uno con distintas aplicaciones ya sea por la frecuencia, la potencia, el patrón de la antena utilizada, la altura a la cual se encuentra la estación base con respecto a la estación móvil, la geometría del entorno, etc. El grupo de investigación RadioGIS, de la escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander, está a cargo de la implementación del algoritmo DeJong-RadioGIS (modelo DeJong modificado que aún está en fase de desarrollo) como parte de un conjunto de proyectos, junto con el grupo de investigación I2T de la universidad ICESI de Cali, con el fin de desarrollar una herramienta de apoyo a la gestión del espectro radioeléctrico [4]. El modelo DeJong [11] es un modelo determinístico basado en trazado de rayos (*ray-tracing*) en un espacio bidimensional, el cual usa varios parámetros que se deducen a partir de la experimentación práctica [5], [6], [7], [8], [9], [10] como por ejemplo los coeficientes de reflexión, difracción y transmisión los cuales dependen de características propias de cada entorno.

El grupo de investigación RadioGIS ha implementado un algoritmo propio para la predicción de cobertura de redes inalámbricas basado en el modelo de radiopropagación diseñado por Yvo DeJong [11] el cual aún no ha sido validado. Un requerimiento fundamental antes de llevar a la práctica, el algoritmo, es la respectiva sintonización y verificación del mismo mediante mediciones en

ambientes reales con características especificadas. Con este fin se usaron herramientas propias de RadioGIS, destacando entre ellas la utilización del GeoSpectScanner (software encargado de tomar los datos medidos desde el analizador de espectros y enviarlos a un servidor remoto del grupo), Geoportal (herramienta de acceso remoto en el que se pueden visualizar las campañas de medición referenciadas geográficamente) y el algoritmo DeJong-RadioGIS implementado en java (ejecutado sobre la plataforma NetBeans).

En la presente tesis se lleva a cabo el proceso de verificación y sintonización del algoritmo DeJong-RadioGIS, describiendo detalladamente los mecanismos de radiopropagación que se tienen en cuenta (Capítulo 2), la metodología utilizada (Capítulo 3), el análisis y los resultados obtenidos luego de sintonizar los parámetros del algoritmo para su verificación (Capítulo 4).

El algoritmo (basado en trazado de rayos 2D) asume que los edificios son objetos infinitamente altos, por lo que no tiene en cuenta las reflexiones en los techos; tampoco tiene en cuenta el ángulo de incidencia para el cálculo de las pérdidas por reflexión, debido a esto, dichas pérdidas se modelan como un parámetro de valor constante al igual que las pérdidas por transmisión; la difracción en las esquinas de los edificios y la dispersión por árboles aún están en fase de desarrollo, por lo que no se tuvieron en cuenta para la presente tesis. Por el momento el algoritmo cuenta con tres mecanismos de radiopropagación, los cuales son: transmisión directa con línea de vista, transmisión a través de los edificios y reflexión en las paredes de los edificios. Las entradas y los parámetros internos del algoritmo se describen en la Sección 2.3.

Para que el algoritmo funcione adecuadamente, se implementó una metodología basada en gran parte a recomendaciones y planteamientos hechos por Yvo DeJong en su tesis doctoral [11]. Con el fin de sintonizar cada uno de los parámetros involucrados en el algoritmo (Sección 3.3), se realizaron tres

campañas de medidas, la primera y la segunda fueron realizadas dentro del campus universitario de la Universidad Industrial de Santander, y la tercera en un entorno urbano de Bucaramanga (Sección 3.2). Cada uno de estos sitios fue escogido de acuerdo a las razones señaladas en la Sección 3.4.

Los parámetros a sintonizar fueron: el factor que modela las características del medio para pérdidas en el espacio libre (Sección 3.3.1), las pérdidas por reflexión (Sección 3.3.3), las pérdidas por transmisión (Sección 3.3.4), el factor de atenuación efectiva (Sección 3.3.2), la permitividad compleja y la conductividad (Sección 3.3.5); los tres últimos parámetros son valores constantes seleccionados de acuerdo al modelo implementado por DeJong [6][28]. Para la sintonización de los tres primeros parámetros se llevaron a cabo tres campañas de mediciones, la primera se realizó en el estadio *primero de mayo* de la Universidad Industrial de Santander con el fin de caracterizar el factor que modela las características del medio para pérdidas en el espacio libre (Sección 3.2.1); la segunda campaña de medidas en el laboratorio de alta tensión (LAT) e Hidráulica de la UIS, se realizó con el fin de obtener las pérdidas de potencia a través de los edificios por unidad de longitud α_b y los coeficientes de reflexión y transmisión (Sección 3.2.2). Luego de tener los parámetros sintonizados, se realizó una verificación final del algoritmo DeJong-RadioGIS (Sección 3.2.3) en una zona urbana de Bucaramanga (El Prado), un entorno donde se presentan diversos factores que el algoritmo no tiene en cuenta como dispersión por árboles y otros mecanismos de radio propagación mencionados anteriormente; en el Capítulo 4 se muestra que los resultados obtenidos mediante simulación se comportan de forma similar a la realidad, por lo que se concluye que el algoritmo es totalmente funcional de acuerdo con los resultados obtenidos por DeJong, a pesar de encontrarse en fase de desarrollo.

La presente tesis describe documentación detallada acerca de la fundamentación teórica, elección de los entornos de medidas, metodología de sintonización, resultados y verificación del algoritmo con el fin de que sirva de referencia para la

realización de trabajos futuros del mismo tipo en diferentes zonas de Bucaramanga y su posterior uso a nivel nacional, así como para la publicación de artículos internacionales. Este algoritmo permite que el usuario conozca el nivel aproximado de potencia recibida en la estación móvil (punto de observación) dentro del área de cobertura y como resultado indirecto dar uso soporte en la planeación de redes inalámbricas y hacer uso eficiente del espectro radioeléctrico.

1.2. TRABAJO PREVIO REALIZADO EN RADIOGIS

Actualmente el grupo RadioGIS se encuentra desarrollando de manera paralela los proyectos Gestel y Gisgerram. Como parte de los mismos, en el grupo de investigación se han implementado dos herramientas de software con acceso remoto desde un servidor local llamadas CellGIS y Geoportal respectivamente, y además de ellas, una serie de herramientas adicionales que son base para el correcto funcionamiento de los servicios que RadioGIS ofrece por medio de las herramientas mencionadas en primera instancia. Entre las que se destacan GeoSpectScanner, GeoRadScanner y un algoritmo basado en el modelo de radiopropagación para entornos urbanos desarrollado por Yvo DeJong.

Todo lo mencionado anteriormente se integra en una plataforma virtual con acceso remoto. Dicha plataforma tiene como objetivo brindar un entorno abierto para el ofrecimiento de servicios que pueden ser utilizados por *DSTels* (desarrolladores de telecomunicaciones), para la creación de soluciones informáticas conformadas por servicios novedosos y aplicaciones cliente basadas en servicios. En la Figura 1.1 se observan los componentes que hacen parte de la plataforma y la forma en la que interactúan entre sí.

El componente central de la plataforma es el *ViewService*, allí se alojan los servicios básicos de la plataforma y todos aquellos desarrollados por los *DSTels*

internos de RadioGIS. Su funcionalidad está orientada a la gestión de servicios, haciendo una división entre servicios básicos y servicios especializados. Desde allí se realiza la conectividad con los servidores de recursos de RadioGIS. La plataforma está implementada actualmente en un servidor de pruebas adaptado en la oficina de RadioGIS cuyo dominio es <http://200.21.228.30:8080>

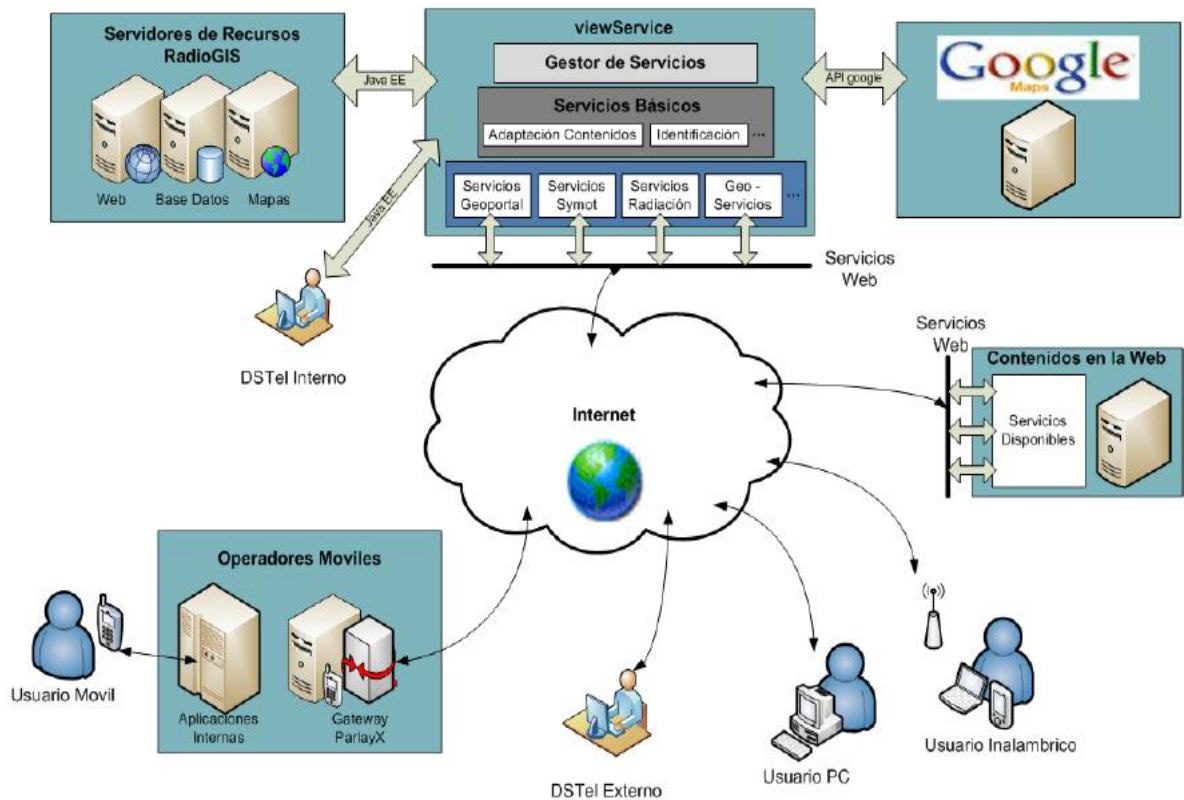


Figura 1.1. Plataforma integral de servicios RadioGIS.

1.2.1. Herramienta de acceso remoto (Geoportal)

El Geoportal hace parte de la plataforma de servicios implementada por el grupo RadioGIS y ha sido ampliamente utilizada en las mediciones necesarias para el desarrollo de la presente tesis, permite visualizar las campañas de medidas de una manera geo-referenciada así como el nivel de potencia medido en cada punto.

La herramienta GeoSpectScanner junto con un sistema de posicionamiento global (GPS) se encarga de exportar los datos medidos por el usuario de manera georeferenciada hacia un servidor ubicado en la oficina principal de RadioGIS, al cual se puede acceder remotamente vía internet a través del siguiente enlace: <http://200.21.228.30:8080/geoportal/> con usuario *admin* y contraseña *123*. Además, GeoSpectScanner también permite exportar datos hacia Google Earth brindando la posibilidad de contar con una resolución mayor, que estará limitada finalmente por los errores de medición propios del sistema GPS que está por el orden de 5 metros aproximadamente.

1.2.2. CellGIS

CellGIS (elaborada por la universidad ICESI de Cali, aún está en fase de desarrollo), es otra de las herramientas utilizadas en el grupo de investigación, la cual está diseñada para ofrecer facilidad de uso a los desarrolladores de telecomunicaciones en sus labores de planeación de redes inalámbricas. Presenta una interfaz amigable que brinda facilidad de manejo por parte del usuario ya que realiza un análisis gráfico de cobertura para un mejor entendimiento y mayor agilidad en el proceso. Toma como entrada un mapa vectorial, en el que se introduce información como las coordenadas de las edificaciones y posición de la estación base para su posterior análisis. Esta herramienta tiene dentro de su estructura interna, un módulo que se encarga de tomar el algoritmo de radiopropagación DeJong-RadioGIS mediante un *plug-in* para ponerlo en ejecución. Este *plug-in* está siendo desarrollado actualmente por la universidad ISECI de Cali, la cual aún no ha terminado dicho proceso. Sin embargo, el algoritmo es independiente de CellGIS, por tanto, la verificación y sintonización de sus parámetros se pueden llevar a cabo sin dificultad, sobre otra plataforma que soporte Java. En nuestro caso se utilizó NetBeans para dicha labor.

1.2.3. Algoritmo DeJong-RadioGIS basado en el modelo DeJong

Como parte del Proyecto GISGERRAM se ha desarrollado un algoritmo para el análisis de la radiopropagación en entornos de microceldas. Dicho algoritmo se implementó sobre la plataforma NetBeans, proyecto de código abierto fundado por *Sun Microsystems* [2], esta plataforma soporta lenguaje Java, lo cual es de gran importancia para lograr una perfecta compatibilidad con las demás herramientas desarrolladas y servicios brindados por RadioGIS. El funcionamiento de este algoritmo se basa principalmente en trazado de rayos 2D y tiene en cuenta las pérdidas por reflexión, transmisión y en el espacio libre; sin embargo, el algoritmo presentado en esta tesis no tiene en cuenta fenómenos como difracción (en las esquinas de los edificios) y dispersión (por árboles o rugosidad del terreno u objetos), estos fenómenos se tendrán en cuenta a posteriori como parte de otro proyecto que actualmente se encuentra en marcha.

Como se mencionó anteriormente el algoritmo DeJong-RadioGIS se encuentra implementado sobre la plataforma NetBeans (ver Figuras D7 y D8, en el Anexo D). Como parámetros de entrada se introducen las coordenadas de las edificaciones que conforman el entorno de medición, la posición de la estación base, potencia emitida, el área de cobertura de la misma, la longitud de onda y el orden de rayos que se desea tener en cuenta, además permite modificar el tamaño de la ventana de análisis.

Gran parte del trabajo realizado en la presente tesis se centra en esta herramienta, ya que es donde se lleva a cabo el proceso de sintonización del algoritmo para su posterior verificación. Una vez sintonizado y verificado el correcto funcionamiento del mismo mediante mediciones en entornos reales, el grupo RadioGIS continuará desarrollando y se procederá a incluir los mecanismos de radiopropagación faltantes con el fin de implementar la versión final de algoritmo DeJong-RadioGIS para finalmente incluir la herramienta terminada en la

plataforma de servicios desarrollada por el grupo RadioGIS. Cuando se haya culminado el proceso de desarrollo, un determinado usuario, podrá tener acceso al servicio para realizar sus labores de planeación, con la tranquilidad de contar con un algoritmo sintonizado y validado en entornos como los encontrados en la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Verificar y sintonizar el Algoritmo DeJong-RadioGIS sobre la herramienta CellGIS con mediciones reales en una zona urbana de Bucaramanga donde la cobertura es limitada por la potencia de la estación base.

1.3.2. Objetivos específicos

- Describir los fundamentos del algoritmo DeJong-RadioGIS. Definiendo las variables a ajustar en el proceso de sintonización.
- Desarrollar una metodología de sintonización para el algoritmo DeJong-RadioGIS, donde se tengan en cuenta factores como la ubicación espacial de las estaciones base y móvil, frecuencia de transmisión (1.9 GHz), entorno de la zona piloto y fuentes de error para garantizar el correcto cálculo de las variables descritas anteriormente.
- Realizar la sintonización y posterior verificación del algoritmo mediante un piloto que involucre mediciones y simulaciones. De manera que se puedan

comparar los resultados teóricos contra los experimentales y hacer una estimación sobre la exactitud obtenida con la metodología desarrollada.

1.4. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

El presente trabajo de investigación realiza una importante contribución al desarrollo de nuevas herramientas computacionales diseñadas para optimizar el proceso de planeación de redes inalámbricas al interior del territorio colombiano. A lo largo de la tesis se realizará todo un proceso de mediciones y análisis de resultados, haciendo énfasis en los mecanismos de medición y factores a tener en cuenta al momento de modelar entornos reales mediante simulación. Se presentan las herramientas de análisis utilizadas, la formulación matemática necesaria para realizar las tareas desarrolladas en el presente estudio y el respectivo análisis de resultados, de modo que el trabajo realizado pueda servir como punto de partida en futuras investigaciones.

La primera parte de la tesis está dedicada a la presentación del proyecto. Se hace mención de las investigaciones y modelos de radio propagación que se han venido trabajando e implementando a nivel mundial para la planeación de cobertura inalámbrica, se presenta el caso particular de Colombia y algunas de las dificultades por las que podría pasar un planeador de red al hacer uso de los modelos existentes. También se menciona el papel activo que juega el grupo de investigación RadioGIS para ayudar a optimizar las tareas de planeación mencionadas y las herramientas con las que cuenta el grupo.

En la segunda parte de la tesis se describe el marco teórico en que se basa el análisis y los resultados que se obtienen en el Capítulo 4. Se mencionan los fundamentos del algoritmo de radiopropagación DeJong-RadioGIS, los factores que este toma en cuenta, y las limitaciones en el mismo; por otra parte se hace

referencia al modelo de DeJong, del cual se basa el algoritmo a excepción de algunas modificaciones mencionadas en el Capítulo 2.

En el tercer Capítulo se define la metodología a implementar para llevar a cabo la correcta sintonización y verificación del algoritmo DeJong-RadioGIS. Se define el plan de medición, sintonización y posterior verificación, para lo cual se hace necesario elegir apropiadamente los lugares de medición, y las estrategias con el fin de obtener los parámetros requeridos para el adecuado funcionamiento del algoritmo a partir de las campañas realizadas.

La tesis termina con el Capítulo cuatro, donde se entrega el informe de resultados obtenidos tanto en mediciones reales como en simulaciones y se analiza la precisión en las predicciones. Se obtiene el cálculo del error cuadrático medio correspondiente a los datos obtenidos en las campañas de medidas y la predicción realizada por el algoritmo implementado; posteriormente se hacen los comentarios respectivos en cada caso. Finalmente se presenta un informe de resultados donde se muestran los resultados más significativos y el valor de las variables después de haber sido sintonizado el algoritmo.

2. FUNDAMENTOS DEL ALGORITMO DEJONG-RADIOGIS

2.1. INTRODUCCIÓN

En este Capítulo se describe la fundamentación teórica del algoritmo de radiopropagación DeJong-RadioGIS en la que se basan los posteriores análisis y resultados obtenidos en el Capítulo 4. Se mencionan los mecanismos de radiopropagación que hasta el momento están implementados en el algoritmo así como sus limitaciones, sus entradas, parámetros internos a sintonizar, y la información final entregada al usuario.

La organización de este Capítulo es la siguiente. En la Sección 2.2 se presenta el modelo DeJong. En la Sección 2.3 se describe el modelo de radiopropagación DeJong-RadioGIS. La Sección 2.4 presenta los mecanismos de propagación del modelo que tiene en cuenta el algoritmo implementado. Y por último la Sección 2.5 explica en que consiste el modelo de trazado de rayos, base del modelo de radiopropagación implementado finalmente.

2.2. MODELO DEJONG

El modelo de predicción de radiopropagación diseñado por Yvo DeJong es un modelo cuasi-2D (también llamado modelo de dos dimensiones o 2D), es decir,

que la geometría de los objetos que causan dispersión se describen en dos dimensiones y la antena de estación base se modela a la misma altura de la estación móvil (aunque normalmente no es el caso en una aplicación real), de modo que todos los rayos se propagan en un plano horizontal. A excepción de modelos completamente 2D [12] [13], la estación base se modela como una fuente puntual en un espacio de tres dimensiones, lo que implica que el campo radiado diverge en el plano horizontal y vertical. Como se menciona en [14] y [15], los modelos de trazado de rayos cuasi-2D son adecuados si las alturas de las antenas de transmisión y recepción están por debajo de la altura media de los edificios, como es el caso en microceldas urbanas. Bajo estas condiciones, la propagación se realiza principalmente a nivel del suelo y la que se propaga sobre los techos de las edificaciones es insignificante. La principal ventaja de los modelos de trazado de rayos cuasi-2D, en comparación con modelos totalmente 3D, es su complejidad computacional relativamente baja. El modelo de predicción propuesto por DeJong tiene en cuenta los siguientes mecanismos de propagación (ver Figura 2.1):

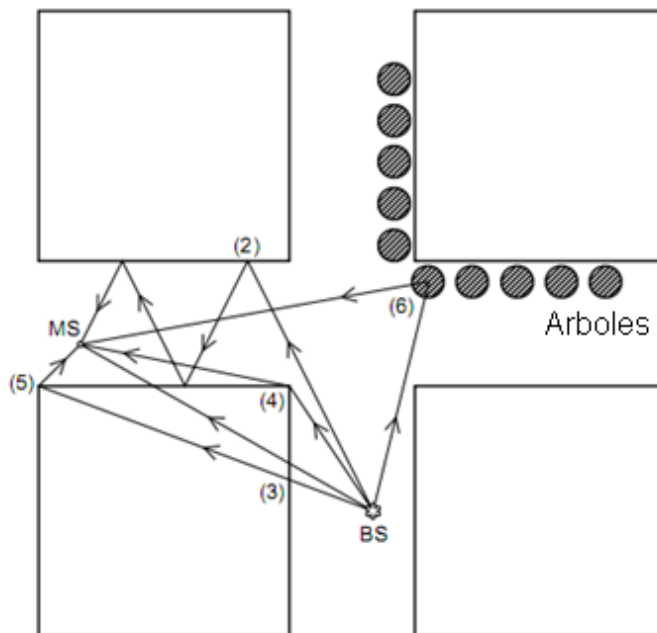


Figura 2.1. Mecanismos de propagación incluidos en el modelo DeJong. [11]

1. Directa, propagación sin obstrucciones (no se muestra en la Figura 2.1),
2. Reflexión en las paredes del edificio,
3. Transmisión a través de las paredes del edificio,
4. Difracción externa en las esquinas del edificio,
5. Difracción interna en las esquinas del edificio,
6. Dispersión coherente e incoherente debido a los árboles (la cual tiene lugar en el centro del árbol),

Y todas las posibles combinaciones de los mecanismos mencionados anteriormente, hasta un número específico de interacciones. Se desprecian las reflexiones en el suelo y los rayos sobre los techos de los edificios. Se asume que el campo eléctrico es paralelo a las paredes del edificio (polarización vertical). La Transmisión a través de los edificios y la dispersión de los árboles se modelan de acuerdo con la teoría presentada en [16] y [17].

Las entradas para el modelo incluyen datos especificando las coordenadas 2D de las esquinas de los edificios y sus ubicaciones, radio y altura de los árboles, permitividad compleja ϵ_r , factores de atenuación específicos α_b de las edificaciones [18], tablas que contienen amplitudes de dispersión y secciones transversales de las copas de los arboles por unidad de volumen [19]. Además, del patrón de localización y radiación (en el plano horizontal) de la estación base se debe especificar la frecuencia y otros parámetros de simulación, tales como la resolución espacial de la predicción y el orden de rayos permitido. Los árboles y la estación base no pueden estar ubicados dentro del edificio, pero el punto de observación puede ser elegido arbitrariamente. El modelo desarrollado por DeJong predice la intensidad de campo en un área especificada o a lo largo de una trayectoria, y el trazado de todas las trayectorias de los rayos para una serie de puntos de observación.

La predicción de la propagación se realiza básicamente en tres fases. La primera fase, consiste en el pre-procesamiento de datos, este sirve para disminuir la complejidad computacional de la segunda fase, que está formada por el trazado de rayos. En la última fase, a partir de los datos obtenidos en la fase anterior se predicen los parámetros relevantes del canal [1].

2.3. MODELO RADIOPROPAGACIÓN DEJONG-RADIOGIS

El modelo de radiopropagación DeJong-RadioGIS es un modelo de propagación semi- determinístico basado en las recomendaciones de DeJong. Este es un modelo 2D basado en trazado de rayos para la planeación de microceldas en un entorno urbano. Utiliza fuentes virtuales, con el fin de modelar los fenómenos de radiopropagación (reflexiones en las paredes de los edificios) de una estación base que irradia incluso a edificios que están fuera del alcance de la línea de vista, también tiene en cuenta la influencia del canal en parámetros de señal como amplitud y frecuencia. El modelo se encuentra en fase de desarrollo y por el momento solo tiene en cuenta tres mecanismos de radiopropagación, mencionados en la Sección 2.4 [4] [20].

Al igual que el modelo desarrollado por Yvo DeJong, el algoritmo DeJong-RadioGIS asume que la estación base y la estación móvil están a la misma altura, y que los edificios son objetos infinitamente altos por lo que se desprecian los rayos sobre los techos de las edificaciones. Los parámetros de entrada para la interfaz del algoritmo incluyen datos especificando las coordenadas 2D de las esquinas de los edificios; también se debe ingresar la ubicación de la estación base (antena transmisora), al igual que su potencia radiada y el área de cobertura (en el plano horizontal), la longitud de onda con la que se desea simular y el orden de rayos permitido (orden de descendencia). Además de estos, existen otros parámetros que deben ser modificados en la programación interna del algoritmo

(Sección 2.4.3) tales como La permitividad compleja ϵ_r , el factor de atenuación específico α_b de los edificios y parámetros como el factor que modela las características del medio para el espacio libre y las pérdidas por reflexión y transmisión.

Otra similitud que guarda el modelo que se implementó finalmente en el algoritmo desarrollado es que la estación base no pueden estar ubicada dentro del edificio, pero el punto de observación puede ser elegido arbitrariamente. El algoritmo está en capacidad de predecir la potencia recibida en cierto punto de observación escogido por el usuario, en una coordenada específica así como mostrar las trayectorias del trazado de rayos.

2.3.1. Mecanismos de propagación del modelo implementado

El algoritmo de radiopropagación DeJong-RadioGIS (basado en trazado de rayos 2D) tiene en cuenta los siguientes mecanismos de radiopropagación:

1. Transmisión directa con línea de vista.
2. Reflexión en las paredes del edificio.
3. Transmisión a través de las paredes del edificio.

En la Sección 2.3.1.1, 2.3.1.2 y 2.3.1.3 respectivamente, se describen cada uno de ellos.

2.3.1.1. Transmisión directa con línea de vista

Para la transmisión directa con línea de vista (Ver Figura 2.2) solo se presentaran pérdidas en el espacio libre debido a que no hay obstrucciones presentes.

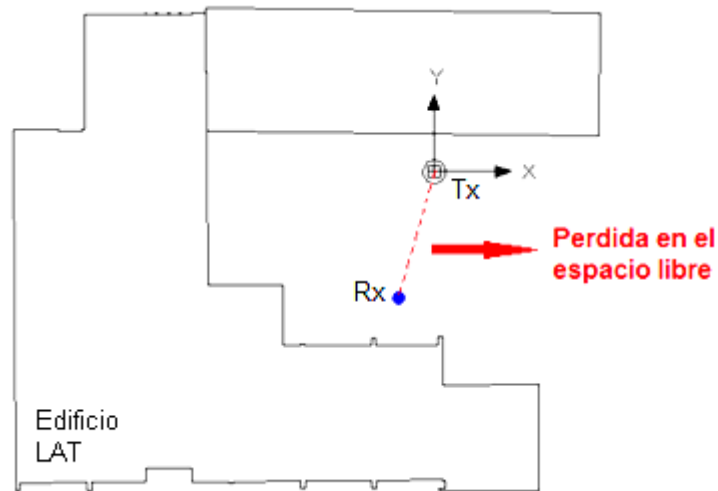


Figura 2.2. Transmisión directa con línea de vista.

Las pérdidas de propagación en el espacio libre, están relacionadas con la atenuación que tiene efecto sobre la señal, cuando esta sale de la antena transmisora, hasta que llega a la receptora atravesando únicamente el espacio vacío entre ambas. Las pérdidas en el espacio libre (FSPL – *Free-space path loss*), miden la relación que existe entre la potencia transmitida y la recibida como se muestra en la ley de decaimiento exponencial, ecuación 2.1. Esta pérdida es causada por una dispersión espacial de las ondas formando cascarones esféricos cada vez más grandes a medida que la distancia entre el punto de observación y la antena transmisora aumenta, de este modo, este efecto dispersivo se puede apreciar como una pérdida de energía en el espacio libre (de acuerdo con los principios de Huygens). Así, la pérdida en el Espacio libre es proporcional al cuadrado de la distancia y también proporcional al cuadrado de la frecuencia.

$$FSPL = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{4\pi df}{c}\right)^2 = \frac{P_t}{P_r} \quad (2.1)$$

Donde:

λ : Longitud de onda de la señal (en metros)

f : Frecuencia de la señal (en Hertz)

d : Distancia entre la antena transmisora y la receptora (en metros)

c : Velocidad de la luz en el vacío, 3×10^8 m/s

P_t : Potencia transmitida

P_r : Potencia recibida

Esta ecuación no es adecuada cuando la antena receptora está cerca de la antena transmisora, porque a medida que la separación d entre ellas disminuye, la potencia recibida se volverá mayor que la transmitida, lo cual es imposible en la realidad, ya que el espacio libre no amplifica. [21]

En términos de dB , resulta la siguiente ecuación:

$$FSPL(dB) = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + k \quad (2.2)$$

k : Constante que depende de las unidades usadas para la distancia y la frecuencia.

Si d se mide en metros, f en Hz y el enlace usa antenas isotrópicas, la fórmula es:

$$FSPL(dB) = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) - 147.5 \quad (2.3)$$

Los valores que resultan de las ecuaciones (2.2) y (2.3) son teóricos y pueden diferir de las mediciones tomadas. El término “espacio libre” no es siempre tan “libre”, y las pérdidas pueden ser más grandes debido a las condiciones climáticas. En particular, las reflexiones en cuerpos de agua o en objetos conductores pueden introducir pérdidas significativas [22]. Para simular estas pérdidas mencionadas anteriormente, en el algoritmo DeJong-RadioGIS se hace uso del parámetro A que modela las características del entorno en espacio libre (ver Sección 4.2.3) [23],

donde se modelan los efectos ambientales con una constante que introduce una pérdida adicional a la que se predice con la ecuación (2.1)

2.3.1.2. Reflexiones en la paredes de las edificaciones

La reflexión ocurre principalmente en el metal, pero también en superficies de todo tipo como gotas de agua, paredes de edificios, bloques de madera, e incluso con el suelo. El principio básico del fenómeno, es que si una onda incide sobre una superficie formando un ángulo de θ grados con respecto a la normal, la onda saldrá reflejada con el mismo ángulo con el que incidió pero una potencia menor (ver Figura 2.3 región 2) [24], la cual dependerá específicamente del material con el que impactó y la rugosidad en su superficie.

$$R(r) = \frac{\sin \theta_i - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}} \quad (2.4)$$

DeJong hace uso del coeficiente de reflexión de Fresnel (ver Figura 1 .2 para la definición del ángulo de incidencia θ_i). Este coeficiente de reflexión junto con un valor de permitividad compleja ϵ_r , dentro de un rango que aplica a los materiales de construcción más comunes, proporciona una aproximación exacta de los campos reflejados en las paredes de los edificios (para polarización vertical), y es utilizado en la mayoría de modelos determinísticos de predicción de propagación. Se demostró en dos estudios independientes [14] [25] que una permitividad igual a 5 (y conductividad igual a cero) es una buena elección, estos estudios fueron realizados en zonas urbanas donde los edificios en su mayoría están contruidos de concreto, ladrillo seco y vidrio, muy similar al material de los edificios de Bucaramanga, por ende se utiliza $\epsilon_r = 5$ en el algoritmo DeJong-RadioGIS.

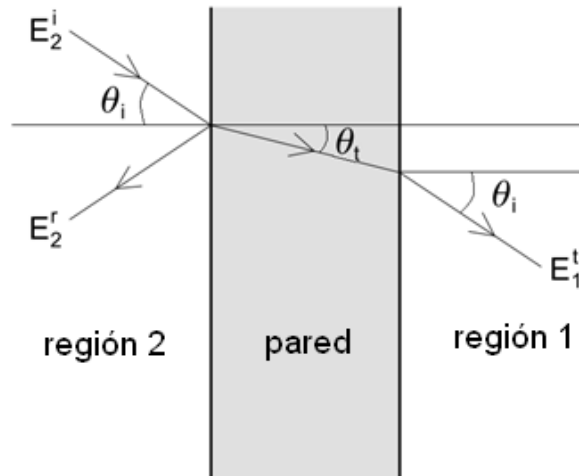


Figura 2.3. Reflexión y transmisión a través de una pared dieléctrica. Tomado de [11]

Los efectos de reflexión y dispersión al interior del muro son despreciados debido a que requiere de un conocimiento detallado del grosor y su estructura interna, por simplicidad, las pérdidas dentro del muro no están incluidas en el coeficiente de transmisión. Las pérdidas dentro del edificio están incluidas en el factor de atenuación efectivo α_b [26].

Con las aproximaciones mencionadas en [27], el coeficiente de transmisión es:

$$T(r) = T_1 T_2 = 1 - R_2(r) \quad (2.5)$$

En el algoritmo de radiopropagación DeJong-RadioGIS, las pérdidas por reflexión y transmisión se calculan en la Sección 4.3 y su metodología de sintonización se describe en las Secciones 3.3.3 y 3.3.4.

2.3.1.3. Transmisión a través de las edificaciones

En el algoritmo DeJong-RadioGIS, los edificios son modelados como estructuras de altura infinita con paredes planas. Estas paredes (incluyendo ventanas, puertas, etc.) y el interior del edificio, son modeladas como una estructura sólida con permitividad compleja uniforme ϵ_r . Además, se supone que solo las coordenadas de las esquinas exteriores del edificio son conocidas. En el modelo actual no se incluyen los siguientes tipos de propagación de onda: dispersión por árboles o por cualquier otro objeto, difracción (interna y externa) en las esquinas y propagación sobre los techos.

Un ejemplo de este modelo se da en la Figura 2.4. Donde la región 1 denota el interior del edificio y la región 2 es el espacio libre que lo rodea. Estas regiones están separadas por la superficie cerrada S , lo que representa la pared exterior del edificio.



Figura 2.4. Ilustración del modelo para un edificio (vista superior).

Este modelo complementa el modelo de trazado de rayos tradicional ya que adiciona los efectos de transmisión determinados por el coeficiente de permitividad ϵ_r , el cual permite la interacción de los campos externos sumados a los efectos de los campos internos los cuales son independientes entre sí. [27]

Al igual que en ambientes al aire libre, la radiopropagación dentro de los edificios se rige por mecanismos tales como la reflexión, la difracción y dispersión por varios objetos. La distribución de la intensidad de campo dentro de un edificio depende de las características específicas de su estructura interna (por ejemplo: diseño y materiales de construcción). En este caso, debido a que no se conocen con exactitud estas características, es imposible predecir la distribución exacta de campos internos. En su lugar se modela el comportamiento global de los campos penetrados y transmitidos en el interior del edificio como un medio uniforme en el cual las pérdidas de propagación, pérdida por trayectoria relativa a la pérdida de espacio libre, pueden ser descritas por un factor de atenuación específico α_b , expresado en decibelios por metro (dB/m), y la velocidad de propagación es igual a la de espacio libre.

Las pérdidas por transmisión al atravesar el edificio están dadas por,

$$L_t = \alpha_b d_{in} - 20\log|T(r_1)| - 20\log|T(r_2)| \quad [dB] \quad (2.6)$$

Donde d_{in} es la longitud de la trayectoria del rayo transmitido dentro del edificio, r_1 y r_2 son los puntos de transmisión sobre la superficie del edificio, $T(r_1)$ y $T(r_2)$ son los coeficientes de transmisión asociados. En la Figura 2.5, los ángulos θ_1 y θ_2 son iguales, de modo que $T(r_1) = T(r_2)$.

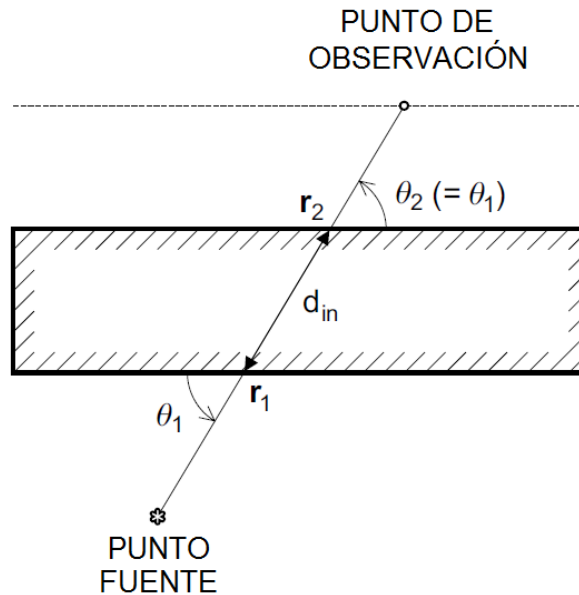


Figura 2.5. Ilustración del modelo simplificado del edificio. [28]

El parámetro α_b se relaciona con la estructura interna del edificio de forma compleja y por lo tanto se obtiene a partir del ajuste de la expresión (2.6). El factor de atenuación α_b se selecciona de tal forma que el error cuadrático medio de la fórmula teórica L_t con respecto a los datos medidos promediados sea mínimo. Para el modelo descrito en la Sección 2.3, se escoge un valor de $\alpha_b = 2 \text{ dB/m}$, el cual corresponde a un promedio de factores de atenuación α_b obtenidos empíricamente por DeJong en 22 edificios de diferentes características [28].

2.4. MODELO DE TRAZADO DE RAYOS

El algoritmo DeJong-RadioGIS se basa en trazado de rayos 2D, utilizando el concepto de fuentes virtuales, las cuales representan las reflexiones resultantes de la interacción del campo radiado por estación base con el ambiente que la rodea [14]. Tal como su nombre lo indica, estas fuentes virtuales no son fuentes reales, sino imaginarias; las fuentes virtuales en combinación con la fuente real

(estación base) forman un sistema equivalente que reemplaza el real y da el mismo campo radiado tal como el propio sistema real [29].

2.4.1. Descripción del modelo

En cualquier punto de la superficie exterior S del edificio (ver Figura 2.4) iluminado por el campo incidente, una parte de la potencia se refleja en la región 2 y otra parte se transmite en el interior del edificio [3].

De acuerdo a lo mencionado en la Sección 2.5, se tiene dos tipos de fuentes virtuales: fuente por reflexión y por transmisión. En presencia de edificios, la fuente real (estación base) crea una o más fuentes virtuales. Además, cuando estas fuentes virtuales interactúan con el entorno, se generan fuentes virtuales secundarias. Este proceso se repite hasta alcanzar el máximo orden de rayos especificado. Teniendo en cuenta las zonas adecuadas en las que cada fuente es “visible” (posiblemente a través de una o más paredes de los edificios), se calcula que el campo total recibido en cualquier punto de observación (punto donde se ubica la MS - Estación Móvil) es la suma vectorial resultante de las contribuciones de todas las fuentes [29].

2.4.1.1. Estimación de parámetros del canal

Para un determinado punto de observación y orden de rayos permitido, el algoritmo genera el conjunto de todas las trayectorias de rayos válidas, y la potencia recibida correspondiente. La antena transmisora se asume omnidireccional en el plano horizontal, de modo que se puede caracterizar por un solo valor de ganancia.

En la planeación de redes celulares, los parámetros del canal son por lo general determinados por un conjunto de puntos discretos, se asume que estos puntos (llamados pixeles) representan un área de observación alrededor de cada punto. La dimensión de esa área para el algoritmo DeJong-RadioGIS equivale a un metro cuadrado. Se asume aleatoriamente la ubicación del receptor en el área de cobertura, y las propiedades del canal en este lugar se caracterizan principalmente por la potencia media local. La estimación de la potencia media local es el tema de la siguiente Sección [29].

2.4.1.2. Estimación de la potencia media local

El parámetro de canal más importante utilizado en la planeación de redes de radio es la potencia media local, la cual corresponde a la intensidad total de la señal recibida, promediada en el espacio con el fin de eliminar el desvanecimiento a pequeña escala (cambios bruscos en amplitud y fase de la señal que resultan de pequeños cambios en la posición espacial – alrededor de media longitud de onda - entre el transmisor y el receptor). DeJong presenta [29] un método alternativo, basado en el promedio espacial (*Spatial Average* - SA) de la potencia recibida en un pixel dado, y no requiere trazado de rayos para más de un punto de observación por pixel [10]. El método de promedio espacial (SA) consiste en la evaluación de una expresión para potencia media local, es exacta si se asume que las amplitudes de los rayos y AOA's (Ángulos de Llegada) son constantes en el pixel [29].

La potencia media local \bar{P} en un punto de observación dado (pixel) [4] está dada por:

$$\bar{P} = \sum_{n=1}^N \mu_n^2 + 2 \sum_{m=1}^N \sum_{n < m} \mu_m \mu_n \operatorname{Re}\{\rho_{mn}\} \quad (2.7)$$

Donde:

$$\rho_{mn} = \frac{\sin[kD_x(\cos\varphi_m + \sin\varphi_n)/2]}{kD_x(\cos\varphi_m + \sin\varphi_n)/2} \times \frac{\sin[kD_y(\cos\varphi_m + \sin\varphi_n)/2]}{kD_y(\cos\varphi_m + \sin\varphi_n)/2} \exp[j(\phi_m - \phi_n)] \quad (2.8)$$

μ_n : Amplitud asociada a cada rayo.

φ_n : Fase asociada a cada rayo.

N : Numero de rayos que inciden sobre el punto de observación.

ρ_{mn} : Escalar complejo que se encuentra en el límite o dentro del círculo unitario y representa la correlación entre las señales de trayectoria múltiple m-ésima y n-ésima en el pixel (área de observación).

D_y : Longitud de la componente en y para un área de observación rectangular centrada en el eje de coordenadas.

D_x : Longitud de la componente en x para un área de observación rectangular centrada en el eje de coordenadas.

3. METODOLOGÍA DE SINTONIZACIÓN

3.1. INTRODUCCIÓN

La metodología de sintonización para el algoritmo de radiopropagación DeJong-RadioGIS, sigue tres pasos (Sección 3.3) fundamentales para la obtención de los siguientes parámetros: el factor que modela las características del medio para pérdidas en el espacio libre (Sección 3.2.1), las pérdidas por reflexión (Sección 3.2.3), pérdidas por transmisión (Sección 3.2.4); el factor de atenuación efectiva (Sección 3.2.2), la permitividad compleja y la conductividad (Sección 3.2.5) son valores constantes seleccionados de acuerdo al tipo de edificaciones presentes en Bucaramanga y acorde con las recomendaciones y estudios realizados por Yvo DeJong [6][28]. En la Sección 3.4 se explica cuales entornos de medición fueron escogidos y las razones para esta elección.

3.2. CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE SINTONIZACIÓN

En esta Sección se explica detalladamente el proceso llevado a cabo para la sintonización de cada uno de los parámetros del algoritmo DeJong-RadioGIS.

3.2.1. Ajuste de las características del entorno

La ecuación (2.3) de pérdidas en el espacio libre, es teórica y puede diferir de las mediciones tomadas al ser usada en una atmósfera con características físicas reales. El parámetro A en el algoritmo DeJong-RadioGIS corresponde al factor que modela las características del medio para el espacio libre, esto es: Presión, temperatura y humedad relativa principalmente, en el entorno de medición [22] [23]. Su efecto es el de añadir una pérdida adicional a la que predice la ley de decaimiento exponencial de la ecuación (2.1).

Para la sintonización de este parámetro es recomendable realizar una campaña de medidas en un espacio lo más abierto y despejado posible, donde se puedan visualizar directamente los efectos que la atmósfera tiene sobre las mediciones, sin la intervención de factores que sumen fenómenos de radiopropagación que compliquen los cálculos. Para lograr esta caracterización del entorno se realizó la campaña de medidas descrita en la Sección 3.3.1, con los datos de potencia recibida para los puntos de observación 1, 2, 3, 4 y 5 en cuatro rutas mutuamente perpendiculares, se promedian los puntos correspondiente para cada ruta, obteniendo un total de cinco potencias promedio (ver Tabla 4.2, Sección 4.2.2), partiendo de los valores teóricos de la expresión (2.3), se ajusta el valor de A de tal forma que el error cuadrático medio sea mínimo, Sección 4.2.2.

3.2.2. Factor de atenuación efectivo

El factor de atenuación efectivo α_b , modela las pérdidas dentro de la estructura interna del edificio (no necesariamente es igual para todo tipo de edificación). Por medio de un método simple y preciso que se presenta en la tesis doctoral de DeJong [28], para un conjunto de 22 edificios de diferentes características se obtienen valores empíricos de α_b (Sección 2.4.3) entre el rango de 1.3 a 3.7 dB/m,

pero la mayoría se aproxima al valor promedio de 2 dB/m . De acuerdo a las sugerencias planteadas por DeJong [28], se escoge $\alpha_b = 2 \text{ dB/m}$ en el algoritmo DeJong-RadioGIS.

3.2.3. Pérdidas por reflexión

Debido a que el algoritmo DeJong-RadioGIS no tiene en cuenta el ángulo de incidencia para las pérdidas por reflexión, sino un valor constante de las mismas para todos los rayos que inciden sobre las paredes de las edificaciones; este parámetro se ajusta siguiendo la metodología que se describe a continuación: el procedimiento a seguir consiste en hallar un valor constante para el coeficiente de reflexión mediante el promedio de una serie de coeficientes obtenidos individualmente (Ecuación 2.4), luego de seleccionar adecuadamente la permitividad compleja y realizar un barrido a lo largo de un ángulo igual a noventa grados sobre alguna edificación con formas predominantemente rectangulares que son comunes en las construcciones halladas en Bucaramanga. Las pérdidas por reflexión son obtenidas por medio de la ecuación (4.1).

3.2.4. Pérdidas por transmisión

Para el algoritmo DeJong-RadioGIS, el parámetro pérdidas por transmisión, de acuerdo a la expresión (2.5), es constante debido al coeficiente de reflexión obtenido según la Sección 3.2.3 también lo es. Las pérdidas por transmisión son obtenidas por medio de la ecuación (4.2).

3.2.5. Permitividad compleja y conductividad

Estos dos coeficientes son constantes en el algoritmo. De acuerdo a [6] [14] [25] se escoge permitividad (constante física que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio) $\epsilon_r = 5$ y conductividad (capacidad de un cuerpo para permitir el paso de la corriente eléctrica) $\sigma = 0$. Estos estudios [14] [25] fueron realizados en zonas urbanas donde los edificios en su mayoría están contruidos de concreto, ladrillo seco y vidrio, muy similar al material de los edificios de Bucaramanga.

3.3. ESTRATEGIA DE SINTONIZACIÓN

Primeramente se sintoniza el parámetro A, de modo que el ambiente de medición sea caracterizado desde el principio ya que este estará presente en todas las campañas posteriores y no depende del tipo de edificaciones que estén presentes, sino únicamente de la atmósfera y sus cambios. Posteriormente se sintoniza el coeficiente de reflexión, el cual solo requiere contar con un valor adecuado para el coeficiente de permitividad ϵ_r y una geometría rectangular típica de edificaciones en Bucaramanga que permita realizar un barrido de 90°, con esto se calcula una muestra suficientemente completa de coeficientes de reflexión para proceder a su promediado y hallar así un valor constante que es el que reconoce la versión del algoritmo desarrollado actualmente. Una vez se tiene sintonizado el coeficiente de reflexión el siguiente paso consiste en el cálculo del coeficiente de transmisión que se calcula directamente haciendo uso de la ecuación 2.5. Luego de esto se procede a la sintonización del coeficiente de atenuación efectivo α_b para el cual se parte de los resultados obtenidos por Yvo DeJong [11], y se verifica constantemente que los resultados obtenidos mantengan el error en los márgenes permisibles. Finalmente una vez terminado el proceso de sintonización, debe procederse a la verificación correspondiente en una zona urbana típica hallada al

interior de Bucaramanga y consolidar así los resultados obtenidos a lo largo de la tesis.

3.3.1. Modelado de las características del entorno

En el estadio *primero de mayo* de la Universidad Industrial de Santander (ver Figura 3.1) se realizó una campaña de medidas compuesta por cuatro rutas, cada una con 5 puntos de medición separados 4.5 metros cada uno.

El esquema de rutas utilizado en la medición se muestra de la Figura 3.2, estas medidas se realizaron con el fin de caracterizar el parámetro A (Sección 3.2.1), que será utilizado en campañas de medición posteriores para la verificación del algoritmo.



Figura 3.1. Campaña de medidas en el estadio *primero de mayo* de la Universidad Industrial de Santander

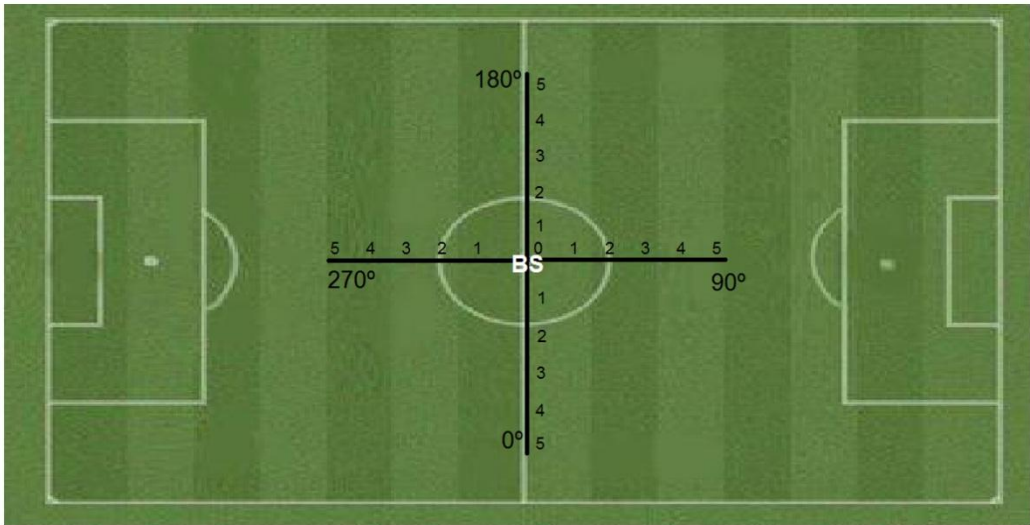


Figura 3.2. Esquemas de rutas

La potencia transmitida por la estación base – antena omnidireccional 11 dBi (HG1911U-PRO) – en esta campaña de medidas fue de 25 dBm a una frecuencia central de 1.883 GHz (ver Figura 3.3), la estación base se ubicó aproximadamente en el centro de la cancha como se aprecia en la Figura 3.2 a una altura de 2.6 metros.

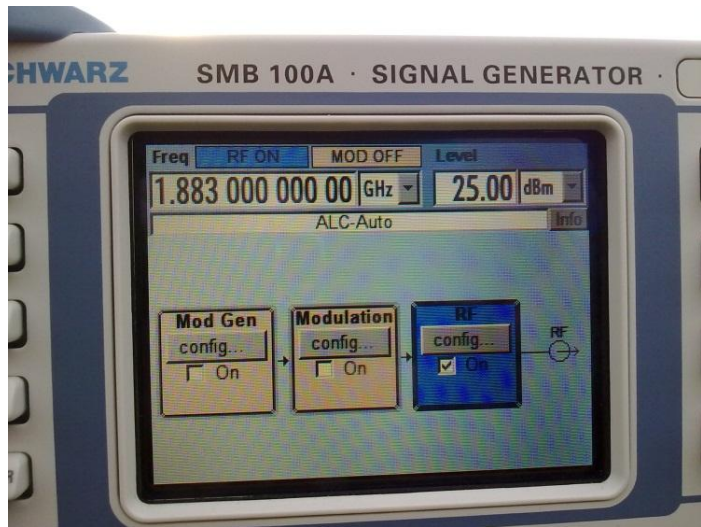


Figura 3.3. Frecuencia y nivel en el generador (R&S SMB 100A *Signal generator*)

Para la medición de potencia recibida en cada uno de los puntos del esquema de rutas se utilizó un analizador de espectros (ROHDE&SCHWARZ ZVL *Network Analyser*) conectado a la antena MS (estación móvil); la antena receptora y transmisora usadas en esta campaña de medición son del mismo modelo y están a la misma altura. Para mayor información acerca del equipo de medición, ver Anexo A.

3.3.2. Obtención del coeficiente de reflexión y transmisión

De acuerdo a los análisis y planteamientos realizados por Yvo DeJong para el cálculo de parámetros como el factor de atenuación efectivo $\alpha_b = 2 \text{ dB/m}$ (Sección 3.2.2), coeficiente de permitividad compleja $\epsilon_r = 5$, y conductividad $\sigma = 0$ (Sección 3.2.5); estos tres parámetros se asumen del mismo valor para el algoritmo DeJong-RadioGIS.

Partiendo de estos parámetros ya establecidos, y teniendo en cuenta que el algoritmo DeJong-RadioGIS requiere valores constantes para el coeficiente de reflexión y transmisión, se realizó otra campaña de medidas alrededor de LAT e Hidráulica de la Universidad Industrial de Santander (Ver Figura 4.4) con el fin de obtener un valor promedio para estos coeficientes adecuado para la verificación del algoritmo en un entorno urbano.

Para esta campaña de medidas se realizaron dos rutas (ver Figura 3.4), la ruta 1 se realizó alrededor del edificio de alta tensión y la ruta 2 alrededor del edificio de Hidráulica, la distancia entre cada punto de medida es aproximadamente 3 metros. Estas rutas se escogieron de la manera mostrada en la Figura 3.4, debido a que en la mayoría de estos puntos de observación las contribuciones por transmisión son las que determinan principalmente el campo. Se dispone de un mapa detallado de las paredes externas para estos edificios (ver Figura 3.5), para la ruta

1 se realizó el trazado de rayos correspondiente con el fin de obtener la distancia que atraviesa el edificio, la distancia desde la antena transmisora hasta la receptora y el ángulo de incidencia respecto a la normal de la pared externa del edificio (ver Figura 2.6). En las Secciones 3.2.3 y 3.2.4 se explica la obtención de estos coeficientes. Para la ruta 2 se realizó en mismo procedimiento de la ruta 1, en la Sección 4.3.3 se aprecia que el cambio en el promedio calculado de estos dos coeficientes obtenidos en ambas rutas no es tan significativo y no afecta considerablemente el resultado final del algoritmo. Los valores escogidos, de acuerdo a las razones mencionadas en la Sección 4.3.3, son verificados comparando potencia recibida obtenida en el algoritmo y la potencia real medida en la ruta 1 y 2 (Sección 4.3).

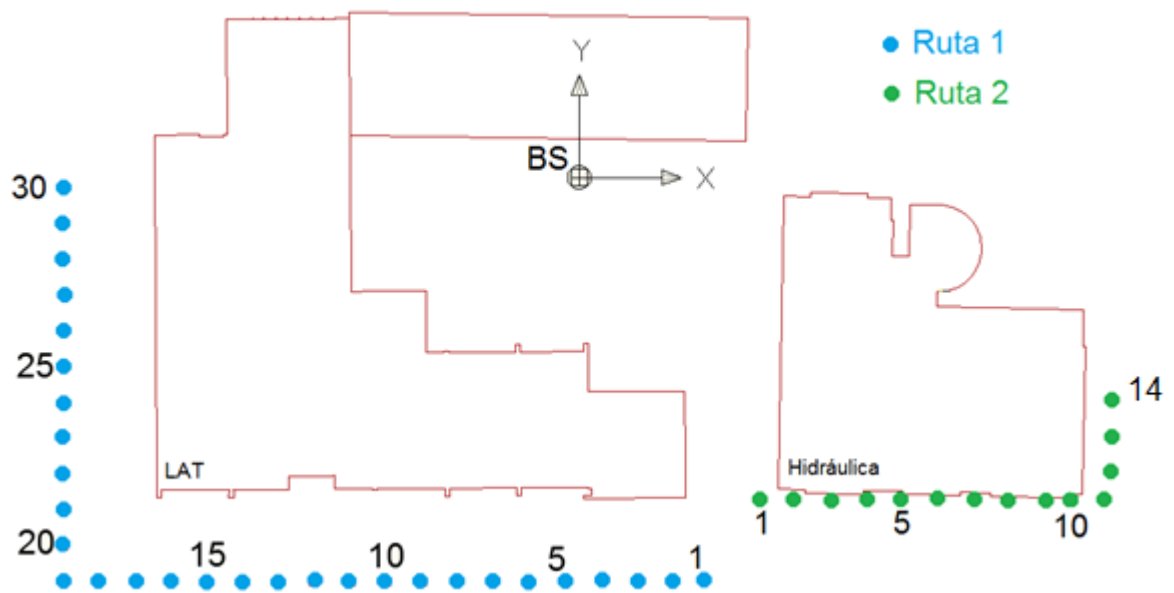


Figura 3.4. Rutas de medición, LAT.

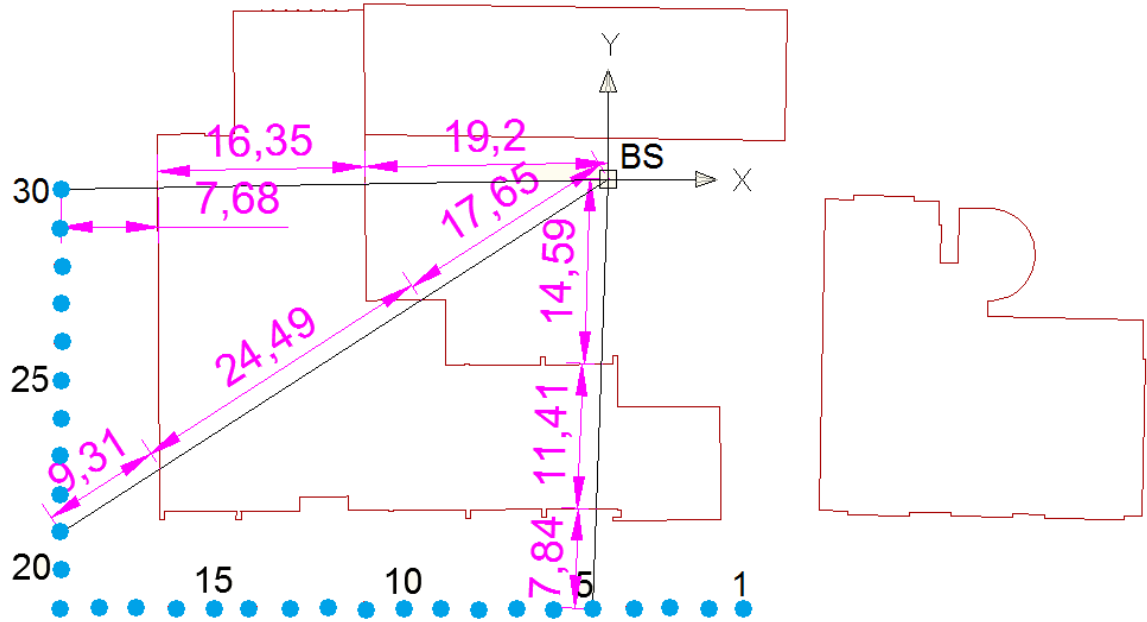


Figura 3.5. Trazado de rayos para los puntos de observación 5, 21 y 30 de la ruta 1 (distancia en metros).

La potencia transmitida para esta campaña fue 1.9 GHz – 22dBm en la estación base – antena omnidireccional 3.5 dBi (HG2404CU) – situada a una altura de 2.3 metros.

Para la medición de potencia recibida en cada uno de los puntos del esquema de rutas se utilizó un analizador de espectros (ROHDE&SCHWARZ ZVL *Network Analyser*) conectado a la antena MS (estación móvil); la antena receptora y transmisora usadas en esta campaña de medición son del mismo modelo y están a la misma altura. Para mayor información acerca del equipo de medición, ver Anexo A.

3.3.3. Verificación del algoritmo sintonizado

Con los parámetros calculados para el algoritmo en las dos campañas de medidas anteriores, se hace una nueva campaña en una ambiente urbano (Bucaramanga, El Prado – ver Figura 4.8) con el fin de verificar la correcta sintonización del algoritmo DeJong-RadioGIS.

Para esta campaña de medidas se establecieron cuatro rutas (ver Figura 4.8), con el fin de comparar la potencia recibida real y la predicción de potencia obtenida en el algoritmo (Sección 4.4).

La potencia transmitida por la estación base – antena omnidireccional 11 dBi (HG1911U-PRO) – en esta campaña de medidas fue a 1.83 GHz – 25dBm (ver Figura 3.6), la estación base está situada aproximadamente en el centro de la cancha como se aprecia en la Figura 3.6, a una altura de 2.6 metros aproximadamente.

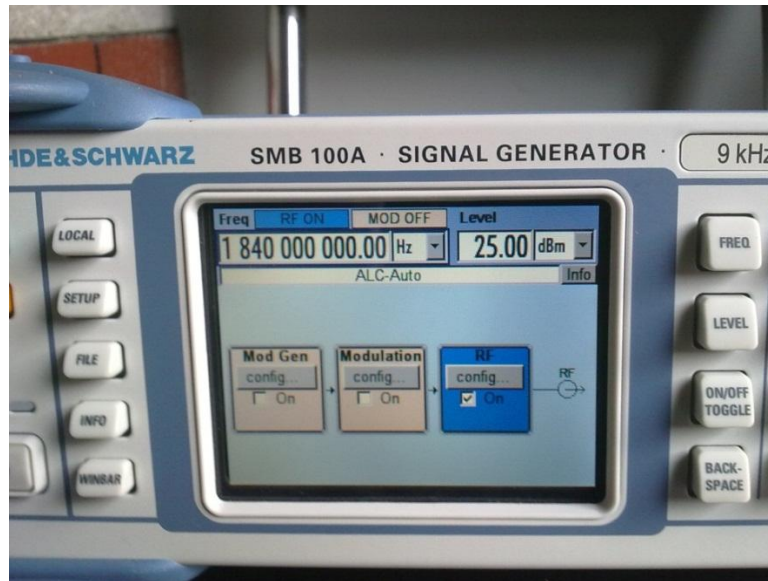


Figura 3.6. Frecuencia y nivel en el generador (R&S SMB 100A *Signal generator*)

Para la medición de potencia recibida en cada uno de los puntos del esquema de rutas se utilizó un analizador de espectros (ROHDE&SCHWARZ ZVL *Network Analyser*) conectado a la antena MS (estación móvil); la antena receptora y transmisora usadas en esta campaña de medición son del mismo modelo y están a la misma altura. Para mayor información acerca del equipo de medición, ver Anexo A.

3.4. ELECCIÓN DE LOS SITIOS DE MEDICIÓN

Se realizaron tres campañas de medidas en Bucaramanga: La primera zona de medición escogida fue el estadio *primero de mayo* de la Universidad Industrial de Santander, se escogió este entorno porque el espacio libre (no hay edificios cercanos) es considerablemente amplio y plano, lo que lo hace adecuado para caracterizar el factor que modela las características del medio para pérdidas en el espacio libre.

La segunda zona de medición escogida fue el laboratorio de alta tensión e Hidráulica de la Universidad Industrial de Santander, este ambiente *semi-controlado* (no hay tráfico de automóviles) es adecuado para obtener los parámetros de pérdidas por reflexión y transmisión.

La última zona de medición escogida fue El Prado (Bucaramanga), este es un entorno urbano donde intervienen factores (difracciones, dispersión por árboles, automóviles, entre otros) que introducen una alta cuota de aleatoriedad en las predicciones de simulación, debido a que el algoritmo actualmente no considera estos mecanismos de radiopropagación en sus cálculos; en este entorno se realizó la verificación final del algoritmo, obteniendo resultados de comportamiento similar a la realidad.

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. INTRODUCCIÓN

Para la verificación y sintonización del algoritmo desarrollado, se realizaron una serie de mediciones en entornos cuyas características fueron previamente seleccionadas. Se eligieron tres escenarios diferentes que permitieron evaluar de manera separada los diversos efectos que intervienen en los resultados finales. El primer escenario fue un terreno despejado, donde se realizó una caracterización básica de los elementos empleados para las demás mediciones, y se modelaron las características del ambiente. Posteriormente se midió en una zona al interior de la Universidad Industrial de Santander, la cual fue seleccionada para evaluar el comportamiento del algoritmo y sintonizar sus variables más significativas. Finalmente se realizó una campaña de pruebas en un ambiente urbano típico donde intervienen factores que introducen una alta cuota de aleatoriedad en las predicciones de simulación al no estarlas teniendo en cuenta para sus cálculos.

En el presente capítulo se realiza la presentación de los resultados obtenidos mediante mediciones en campo y su análisis respectivo. En la primera parte se muestran los resultados de mediciones en ambientes *semi-controlados*, la segunda parte del Capítulo está dedicada a verificar el correcto funcionamiento del algoritmo una vez ha sido sintonizado en diferentes ambientes urbanos en Bucaramanga y su área metropolitana. Posteriormente se realizan las respectivas

simulaciones haciendo uso del algoritmo de radiopropagación implementado por el grupo RadioGIS y finalmente se realiza una comparación entre los resultados obtenidos, contra los que predice un algoritmo punto a punto de pruebas, el cual se usó como soporte en el proceso de sintonización. Finalmente el Capítulo termina con un análisis de los resultados y se dan las conclusiones respectivas.

4.2. SINTONIZACIÓN DEL ENTORNO DE MEDICIÓN

La propagación de ondas en el espacio libre se rige principalmente por la ley de decaimiento exponencial como se muestra en la Sección 2.4.1.1. Dicha ley es válida para el caso de espacio libre ideal, es decir, en el vacío. Sin embargo, los entornos reales de propagación de ondas electromagnéticas en la atmósfera poseen características tales como humedad relativa, presión atmosférica, temperatura ambiente y corrientes de aire; dichas características generan una desviación en las pérdidas predichas por la ley de decaimiento y por ende deben ser modeladas adecuadamente con el fin de reducir los errores de medición. En esta Sección se realizará un análisis sobre los efectos ambientales, se compararán los resultados obtenidos mediante mediciones contra los que predice la ecuación (2.1) y se realizará la respectiva sintonización del algoritmo con el factor A que modela las condiciones del medio. Para este fin se hará el cálculo del error cuadrático medio el cual se reducirá al mínimo ajustando A . Finalmente se realizará una nueva predicción haciendo uso del algoritmo sintonizado con este factor para verificar el resultado.

4.2.1. Mediciones en el espacio libre

Basados en las razones expuestas en la Sección 3.4 se eligió el estadio *primero de mayo* de la UIS para realizar la caracterización de las pérdidas en espacio libre.

Las medidas se realizaron en cuatro direcciones diferentes y mutuamente perpendiculares con las adyacentes para tener en cuenta las variaciones de ganancia que tienen las antenas transmisoras y receptoras dependiendo del ángulo de emisión y recepción de la señal, además al medir en direcciones diferentes se pueden apreciar de mejor manera el efecto de árboles y algunas fuentes de reflexión en los alrededores del estadio las cuales pueden afectar los resultados e incidir negativamente en la óptima caracterización del entorno en espacio libre.

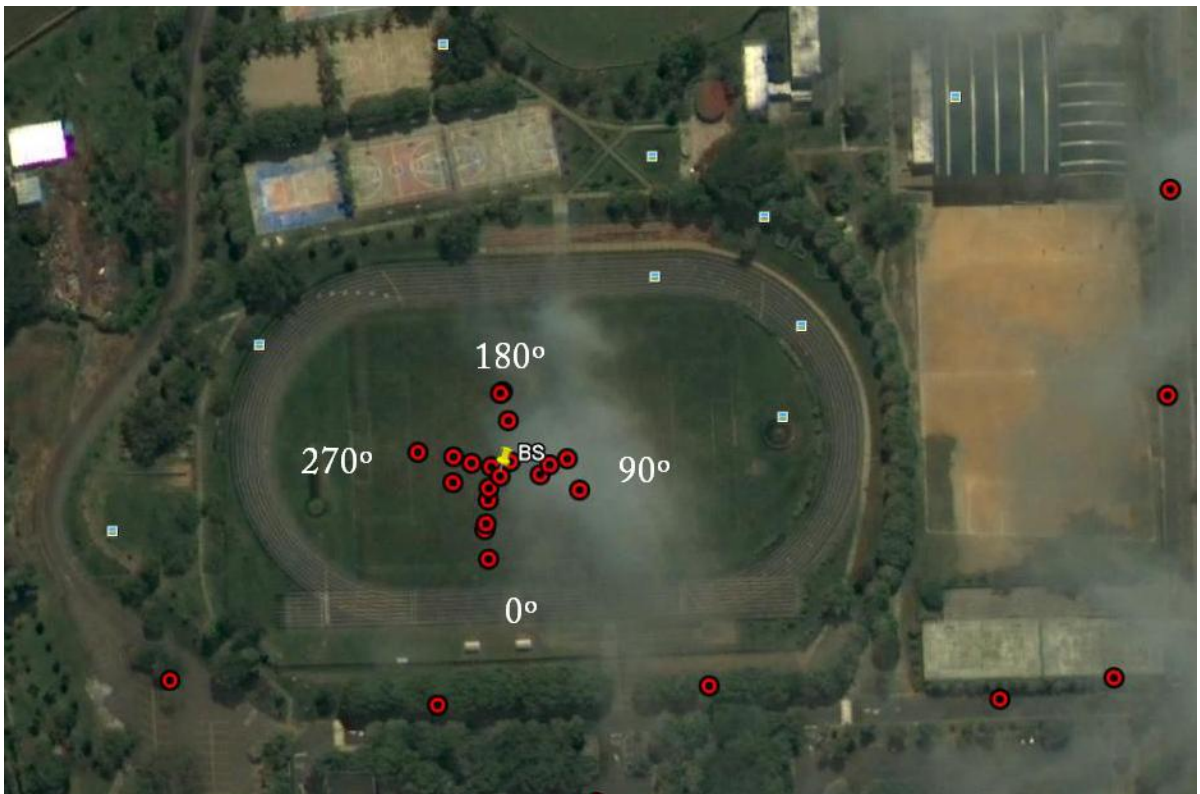


Figura 4.1. Estadio *primero de mayo* (UIS).

La Figura 4.1 muestra las rutas de medidas mencionadas anteriormente y en el centro de las mismas se identifica la antena transmisora con el indicador BS. Cada ruta se identifica con el nombre 0°, 90°, 180° y 270° respectivamente y consta de cinco puntos de medición separados una distancia de 4.5 metros entre sí. Cada

nombre representa la orientación en grados de la ruta respecto a la dirección de la entrada oriental del estadio y en el sentido inverso al giro de las agujas del reloj. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.1 y las Figuras 4.2.1 y 4.2.2, presentando además las predicciones teóricas usando la ley de decaimiento exponencial.

90°		180°		270°	
PUNTO	Potencia Rx [dBm]	PUNTO	Potencia Rx [dBm]	PUNTO	Potencia Rx [dBm]
0	-1,6529051065445				
1	-15,7058925628662	1	-16,4128913879394	1	-15,5866088867187
2	-17,5940113067626	2	-18,3201713562011	2	-20,9236946105957
3	-22,1625537872314	3	-19,55598831	3	-23,3141059875488
4	-23,7208633422851	4	-21,4480648040771	4	-27,97050858
5	-26	5	-25,4208106994628	5	-27,83444023
0°		Decay law		Frecuencia	
PUNTO	Potencia Rx [dBm]	PUNTO	Potencia teórica [dBm]	1883000000 HZ	
				Potencia_T	
1	-11,7950019836425	1	-8,0893	25 dBm	
2	-18,1056003570556	2	-14,1099	Ganancia Antena	
3	-19,6464881896972	3	-17,6317	11 dBi	
4	-22,9857482910156	4	-20,1305	Pérdidas en el cable	
5	-27,64864922	5	-22,0687	0,47 dB	

Tabla 4.1. Resultados de las mediciones en el estadio *primero de mayo*.

Los gráficos de las Figuras 4.2.1 y 4.2.2 muestran el comportamiento de la potencia medida en cada uno de los puntos para las rutas de medición señaladas en la Figura 4.1. En la figura 4.2.2 puede apreciarse en color azul claro la potencia teórica predicha por la ley de decaimiento exponencial para el espacio vacío y se aprecia claramente que esta predicción está muy por encima al de la potencia obtenida para cada punto mediante mediciones en campo. Si se compara la curva en color naranja (Promedio de la potencia medida) con la celeste (Predicción de la ley de decaimiento exponencial) en la Figura 4.3, resulta obvio que la tendencia de

ambos trazos es muy similar, salvo alguna diferencia por el orden de 4.7 dB, lo cual es justificable debido a las pérdidas que adicionan las variables climáticas y del entorno mencionadas con mayor detalle en las secciones 3.2.1 y 3.3.1.

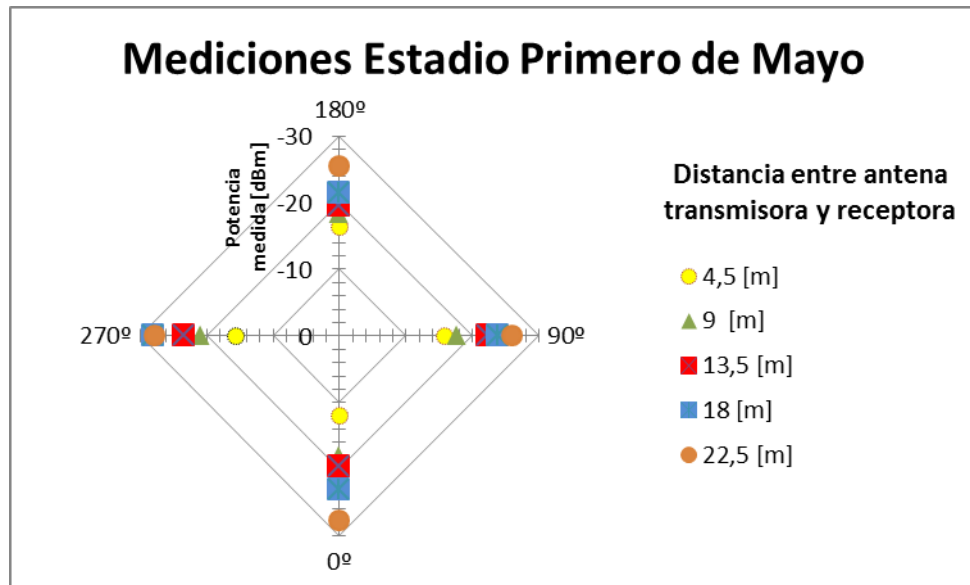


Figura 4.2.1. Mediciones en el estadio *primero de Mayo* (UIS)

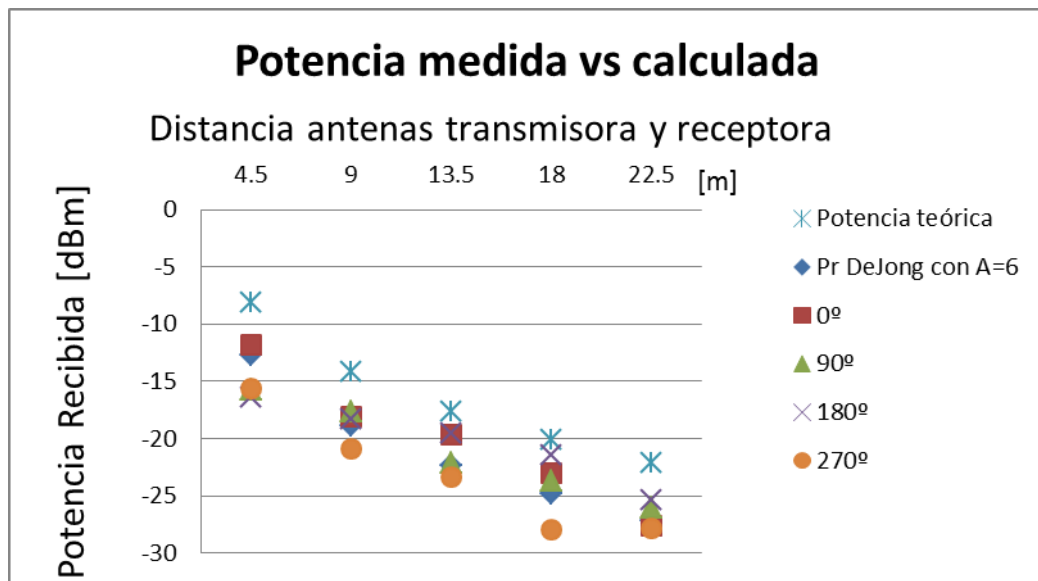


Figura 4.2.2. Gráfica de los resultados de medición en espacio libre. Estadio *primero de Mayo* (UIS)

4.2.2. Ajuste de las condiciones del medio

Tomando como referencia la gráfica mostrada en la Figura 4.3, obtenida apartir de la figura 4.2.1 y la tabla 4.2, se hizo variar el valor del factor A hasta reducir el error cuadrático medio al mínimo posible, luego de esto se eligió un valor $A = 6$ con el cual se redujo el error cuadrático medio hasta 1.177 dB, y el algoritmo DeJong-RadioGIS obtuvo las predicciones que se muestran en la curva de color azul oscuro mostrada en la figura 4.3.

Potencia teórica [dBm]	Potencia Promedio [dBm]	Potencia simulada en [dBm] (A=6)
-8,0893	-14,8750987052917	-12,74
-14,1099	-18,7358694076538	-18,82
-17,6317	-21,1697840690612	-22,4
-20,1305	-24,0312962532043	-24,84
-22,0687	-26,7259750366210	-27,17

Tabla 4.2. Sintonización de las pérdidas por espacio libre.

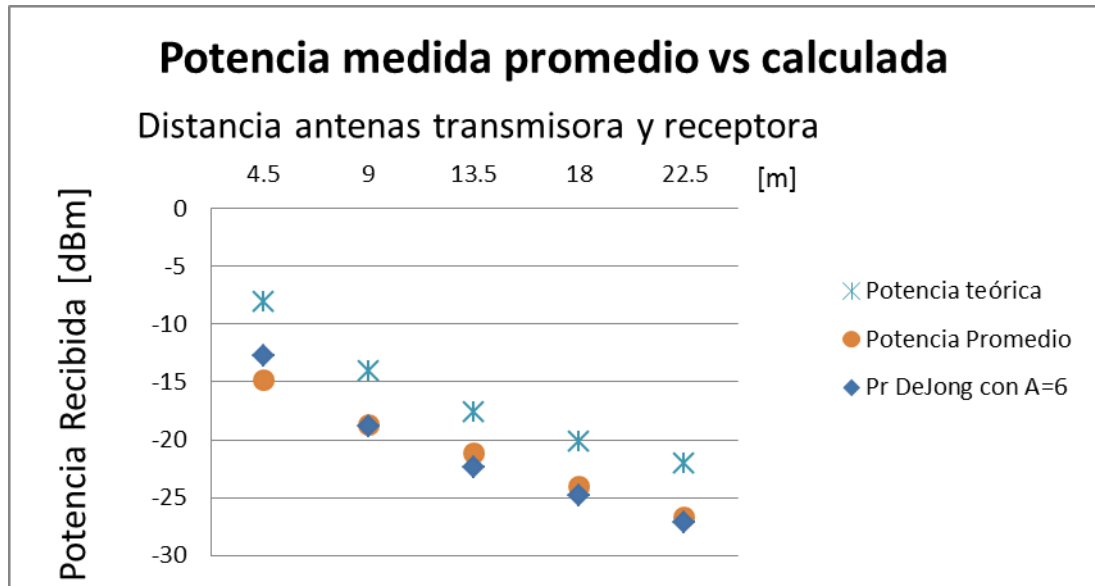


Figura 4.3. Ajuste de las pérdidas por espacio libre

De las variables que permite modificar el algoritmo DeJong-RadioGIS, ya se ha sintonizado el factor A y en las secciones siguientes se muestran los resultados de sintonización para las demás variables. De aquí en adelante y para todas las simulaciones que se realicen en la presente tesis con la herramienta de software desarrollada en RadioGIS, se mantendrá fijo este valor ($A = 6$) para el factor A .

4.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS EDIFICIOS EN EL ALGORITMO

Las pérdidas de potencia en un determinado punto de observación, cuando una onda transmitida por la estación base atraviesa un edificio, depende de factores como el material con el cual están construidas las paredes, la configuración interna de las mismas al interior del edificio, el ángulo con el cual incide la onda en las paredes de la edificación y hasta de factores dinámicos como la posición de personas u objetos que estén al interior de la estructura analizada.

La precisión en las medidas y el análisis adecuado de los resultados obtenidos, son de vital importancia para la correcta sintonización de los parámetros que caracterizan los fenómenos en los cuales las edificaciones presentes en el área de medición juegan un papel significativo. Una explicación más detallada acerca de la zona de medición seleccionada para la sintonización de estos parámetros se encuentra en la Sección 3.3. Es por estas causas que se eligió como escenario el edificio LAT de la Universidad Industrial de Santander para realizar esta labor. Los resultados de medición y los procesos de sintonización se muestran en las secciones subsiguientes.

4.3.1. Mediciones en un ambiente *semi-controlado*

A continuación se realizará un análisis donde se sintonizarán los parámetros que utiliza el algoritmo DeJong-RadioGIS para su correcto funcionamiento. Se mostrarán los resultados obtenidos en una zona de medición alrededor del edificio LAT de la Universidad Industrial de Santander, el cual se puede apreciar con mayor detalle en la Figura 4.4 y sus características se explican con mayor detalle en la Sección 3.2.2.

En la Figura 4.5 se muestran las rutas de medición en las que se realizaron las respectivas mediciones para cada uno de los edificios caracterizados. Se definieron dos rutas, cada una rodeando a un edificio diferente con el fin de evaluar el cambio entre los parámetros calculados para estructuras con dimensiones, construcción y materiales diversos y sintonizar así con mayor exactitud el algoritmo DeJong-RadioGIS.

En la Tabla 4.3 se presentan las medidas de potencia (P_m en dBm), obtenidas en cada uno de los puntos, para simular las características del edificio LAT, junto con su respectiva coordenada en metros relativa a la esquina inferior izquierda de la imagen 4.4, se muestran también las estimación de potencia ($P_{calculada}$ en dBm) realizada por un algoritmo punto a punto de pruebas desarrollado como base de comprobación. Se muestra el ángulo de incidencia de los rayos en las paredes externas del edificio ($Angle_i$ en grados). El coeficiente de reflexión (Coef. Reflexión) calculado tomando como parámetro de entrada el ángulo $Angle_i$ y la constante de permitividad del medio que se tomó $\epsilon_r = 5$, como se menciona en el Capítulo 2. Y la potencia recibida simulada ($P_{simulada}$ en dBm), empleando la herramienta DeJong-RadioGIS.



Figura 4.4. Zona de medición edificios LAT e Hidráulica (vista superior).
Imagen tomada con google earth.

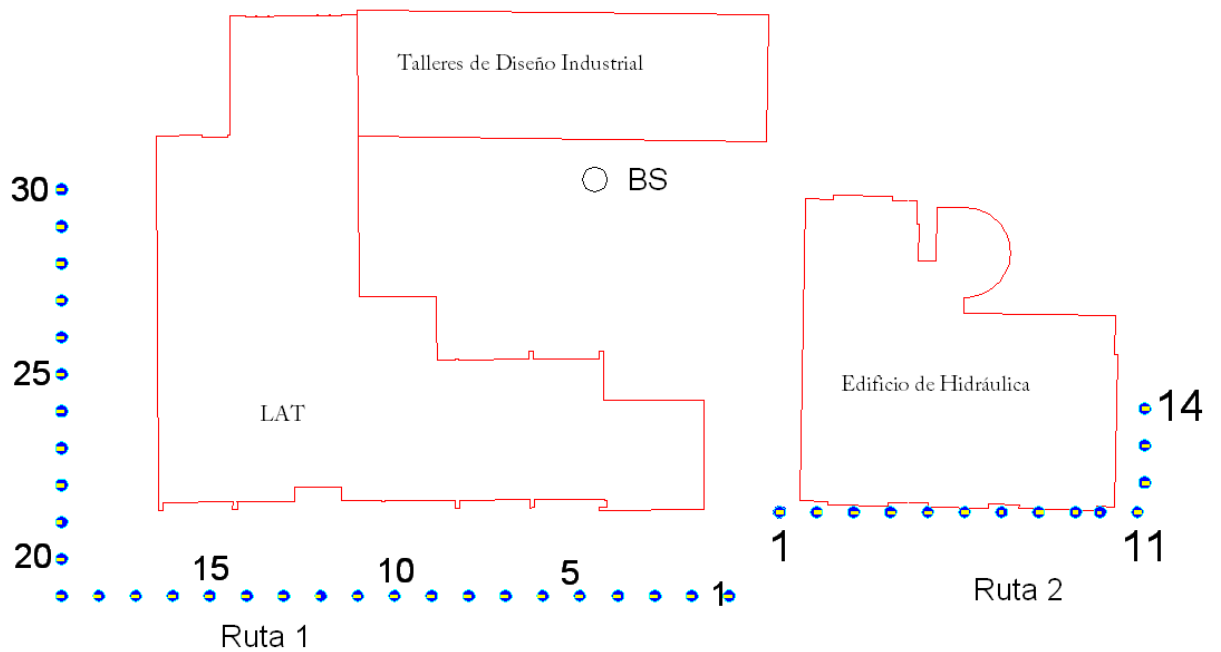


Figura 4.5. Rutas de medición edificios LAT e Hidráulica.

4.3.2. Sintonización de los coeficientes de reflexión y transmisión.

N°	Coordenada [m]			Coef. Reflexion	Pm [dBm]	Prcalculada [dBm]	Prsimulada [dBm]
	X	Y	Angle_i (grados)				
1	76	72	17	-0,397257136	-56,8	-63,185401	-55,2
2	73	72	13	-0,390846303	-51,4	-62,408013	-55,5
3	70	72	8	-0,385308624	-61,3	-62,038238	-55,8
4	67	72	3	-0,382434572	-54,2	-61,809694	-59,9
5	64	72	2	-0,3821742	-58,6	-66,805103	-66,1
6	61	72	7	-0,384522978	-65,9	-66,949369	-69,77
7	58	72	12	-0,389521742	-72,3	-67,590861	-71,63
8	55	72	17	-0,397257136	-77,4	-68,332398	-72,63
9	52	72	22	-0,40786248	-75,5	-69,348333	-74,73
10	49	72	26	-0,418533203	-70,6	-70,508245	-75,73
11	46	72	30	-0,431270938	-68,7	-71,915874	-76,38
12	43	72	34	-0,4462113	-77	-73,688273	-80,24
13	40	72	37	-0,458955167	-79,5	-75,120417	-79,79
14	37	72	40	-0,473098716	-78,6	-73,17558	-74,31
15	34	72	45	-0,500000612	-79,9	-78,08306	-74,78
16	31	72	45	-0,500000612	-78,8	-86,557722	-75,07
17	28	72	45	-0,500000612	-80,5	-92,824952	-75,25
18	25	72	45	-0,500000612	-84,6	-96,85048	-75,41
19	22	72	45	-0,500000612	-84,1	-101,78005	-103,75
20	22	75	45	-0,500000612	-81,6	-103,15065	-101,75
21	22	78	45	-0,500000612	-84	-97,731561	-98
22	22	81	45	-0,500000612	-83,8	-91,975415	-76,43
23	22	84	45	-0,500000612	-83	-84,826143	-76,6
24	22	87	23	-0,410343027	-82,2	-82,63438	-76,82
25	22	90	20	-0,403265441	-83,9	-81,547471	-77
26	22	93	16	-0,395485409	-79,6	-80,604035	-77,1
27	22	96	12	-0,389521742	-79,8	-79,870275	-77,19
28	22	99	9	-0,386200667	-83,5	-79,313537	-77,25
29	22	102	5	-0,383268775	-84,2	-78,980818	-77,62
30	22	105	1	-0,382018049	-83,9	-78,810987	-80,47

Tabla 4.3. Datos resultantes de medición en LAT

El algoritmo DeJong RadioGIS no hace uso del ángulo de incidencia para el cálculo de las pérdidas por reflexión sino que simula esta pérdida por medio de un

parámetro constante llamado pérdidas_por_reflexion el cual debe ser sintonizado. Por esta razón es necesario realizar un promediado de los coeficientes de reflexión, y con este calcular luego la pérdida de potencia media cada vez que una onda es reflejada por las paredes de los edificios en la zona de medición, para realizar esta labor se usó la siguiente ecuación para el cálculo de las pérdidas promedio por reflexión:

$$Losses_{ReflPromedio} = 20 * LOG10 (ABS(PROMEDIO(Coef.Reflexión))) = -7.2667 \text{ dB} \quad (4.1)$$

Del mismo modo, para el cálculo de las pérdidas por transmisión de edificios se utilizó la ecuación que se presenta a continuación:

$$Losses_{TransPromedio} = 20 * log10(1 - (promedio(Coef.Reflexión))^2) = -1.88 \text{ dB} \quad (4.2)$$

Las variables nombradas como: pérdidas_por_reflexión y pérdidas_por_transmisión, en el algoritmo DeJong-RadioGIS; se sintonizan con los valores de -7.2667 dB y -1.88 dB respectivamente. Este valor se considera el más acertado debido a que para este edificio (LAT) se hace un barrido de noventa grados donde intervienen adecuadamente una variedad diversa de ángulos de incidencia que permiten un cálculo acertado para este promedio, el cual a su vez se podrá usar para diferentes configuraciones de edificios y ángulos de incidencia.

4.3.3. Sintonización del factor de atenuación efectivo α_b .

Un parámetro de gran importancia para el proceso de sintonización del algoritmo es el factor de atenuación efectivo α_b , el cual se expresa en [dB/m] y puede variar entre un edificio y otro. Basados en el estudio realizado [11] en más de 20 edificaciones construidas con materiales como ladrillo y concreto al igual que los encontrados en Bucaramanga, se ha llegado a la conclusión que un valor de 2

dB/m resulta adecuado para la mayoría de edificios modernos, sin embargo este parámetro puede cambiar de una estructura a otra, y la predicción es muy sensible a estos cambios, por tales motivos asumiremos en principio que α_b es igual a 2 y dependiendo de la situación se decidirá si es mejor aumentar, disminuir o mantener dicho valor para aproximar de mejor manera la predicción a los resultados esperados.

4.3.4. Simulación y reducción del error cuadrático medio.

Una vez sintonizado el algoritmo con el factor A , hallado empíricamente en la Sección 4.2.2, el factor α_b , hallado en 4.3.3, el coeficiente de reflexión y el de transmisión calculado en las ecuaciones 4.1 y 4.2 se simuló y se obtuvieron los resultados de la Figura 4.6. En color rojo aparecen los datos reales medidos, en color azul la curva de potencia predicha por un algoritmo de prueba realizado como respaldo a los resultados, en color verde los resultados de simulación predichos por el algoritmos DeJong-RadioGIS cuando se elige orden de descendencia de rayos igual a uno y finalmente, en color morado, se muestra la misma simulación pero con un orden de descendencia de rayos igual a tres.

Para medir la fidelidad de cada una de las curvas respecto a los datos medidos en campo utilizaremos como parámetro de comparación el error cuadrático medio. De esta forma el resultado obtenido para cada una de las curvas es como se muestra en la Tabla 4.4, donde se calcula primeramente el error cuadrático medio para todos los puntos de la curva en color azul de la Figura 4.6, y posteriormente el mismo cálculo de error pero despreciando las mediciones con potencia inferior a -80dBm, ya que es justo allí donde se encuentra el piso de ruido en el analizador de espectros y por tal motivo estos datos pierden validez. Las dos filas siguientes presentan el error cuadrático medio para la curva en color verde de la Figura 4.6, en esta se realizó la simulación en el algoritmo DeJong-RadioGIS utilizando un

orden de descendencia de rayos igual a uno, y luego se realizó el mismo cálculo del error hecho con anterioridad donde no se tuvieron en cuenta para dicho error las medidas con predicción de potencia inferior a -80 dBm.

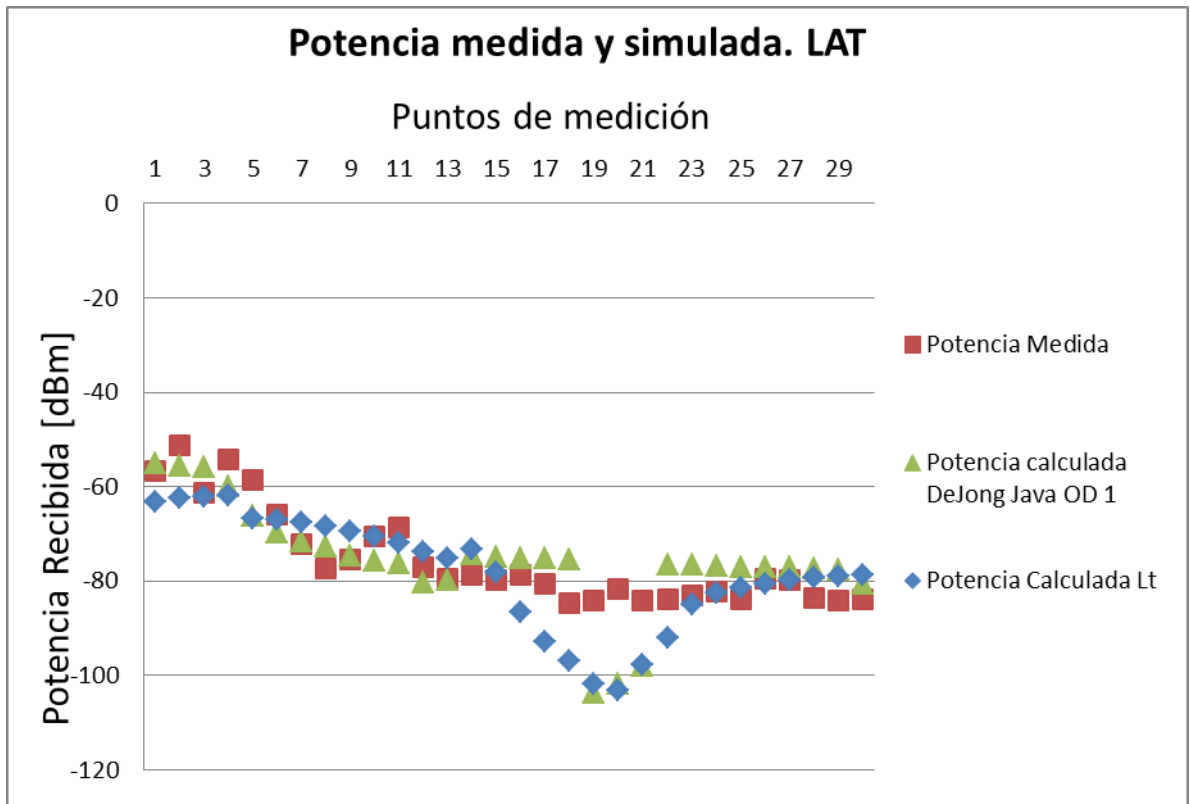


Figura 4.6. Resultados de medición, cálculo y simulación para LAT.

De la Figura 4.6 y la Tabla 4.4 se puede observar que los parámetros de sintonización seleccionados hasta el momento funcionan muy bien para el edificio de LAT, sin embargo, con el fin de intentar mejorar esta sintonización o al menos verificar su óptimo funcionamiento, el proceso realizado con LAT se realizará para el edificio de Hidráulica que se muestra en la Figura 4.5 con la respectiva ruta de mediciones.

<i>Curva analizada</i>	<i>Error cuadrático medio [dB]</i>
Potencia calculada Lt	8,1232
Potencia calculada Lt > -80dBm_Calculado	4,2032
Potencia recibida DeJong_OD1	7,5514
Potencia recibida DeJong_OD1>-80dBm DeJong_OD1	5,2970

Tabla 4.4. Cálculo del error medio cuadrático para las curvas de la Figura 4.6.

4.3.5. Cálculo y ajuste de los parámetros de sintonización en Hidráulica

En la Tabla 4.5 se presentan las medidas de potencia (Pm en dBm), obtenidas en cada uno de los puntos de la ruta 2 en la Figura 4.5 para simular las características del edificio de Hidráulica. En la Tabla 4.5 aparecen las respectivas coordenadas en metros relativas a la esquina inferior izquierda de la imagen 4.4. Se muestra también el ángulo de incidencia de los rayos en las paredes externas del edificio (Angle_i en grados). El coeficiente de reflexión (Coef. Reflexión) calculado tomando como parámetro de entrada el ángulo Angle_i y la constante de permitividad del medio que se tomó $\epsilon_r = 5$, como se menciona en el Capítulo 3. Finalmente se muestra la potencia simulada (Prsimulada en dBm) en cada uno de los puntos de la ruta 2, empleando la herramienta DeJong-RadioGIS.

N°	Coordenada [m]					
	X	Y	Angle_i (grados)	Coef. Reflexion	Pm [dBm]	Prsimulada [dBm]
1	80	79	0	-0,381966011	-59,6	0
2	83	79	55	-0,567797952	-61,8	55
3	86	79	51	-0,538282885	-57,7	51
4	89	79	47	-0,51200183	-57,8	47
5	92	79	44	-0,494272507	-64,9	44
6	95	79	41	-0,478137855	-56,7	41
7	98	79	38	-0,463510359	-64	38
8	101	79	36	-0,454555443	-63,2	36
9	104	79	34	-0,4462113	-64	34
10	106	79	32	-0,438456515	-69	32
11	109	79	30	-0,431270938	-67,3	30
12	110	81	28	-0,424635697	-66,5	28

13	110	84	25	-0,415676588	-70,6	25
14	110	87	22	-0,40786248	-69,9	22

Tabla 4.5 Datos resultantes de medición en Hidráulica

Al igual que para el edificio LAT en este caso las pérdidas por reflexión se simulan por medio de un parámetro constante llamado pérdidas_por_reflexion el cual debe ser sintonizado. Por esta razón es necesario realizar un promediado de los coeficientes de reflexión y con este calcular luego la pérdida de potencia media cada vez que una onda es reflejada por alguna pared de los edificios en la zona de radiación, para realizar esta labor en los datos de la Tabla 4.3 se usó la siguiente ecuación:

$$Losses_{Refl_{Promedio}} = 20 * LOG10 (ABS(PROMEDIO(Coef.Reflexión))) = -6.725 \text{ dB} \quad (4.3)$$

Del mismo modo, para el cálculo de las pérdidas por transmisión de edificios se utilizó la ecuación (4.2) que se presenta a continuación:

$$Losses_{Refl_{Promedio}} = 20 * log10(1 - (promedio(Coef.Reflexión))^2) = -2.076 \text{ dB} \quad (4.4)$$

Se observa que los valores para los coeficientes de reflexión y transmisión en el edificio de Hidráulica varían significativamente en comparación con los obtenidos para LAT. Sin embargo esta es una limitación propia en la herramienta de simulación y deja ver la necesidad que hay de tener en cuenta los ángulos de incidencia para el cálculo de estas pérdidas. En la Figura 4.7 se obtienen las respectivas gráficas que permiten visualizar el comportamiento del algoritmo (obtenido mediante simulación) contra los resultados reales (obtenidos mediante la campaña de medidas realizada, ver Sección 3.3.2).

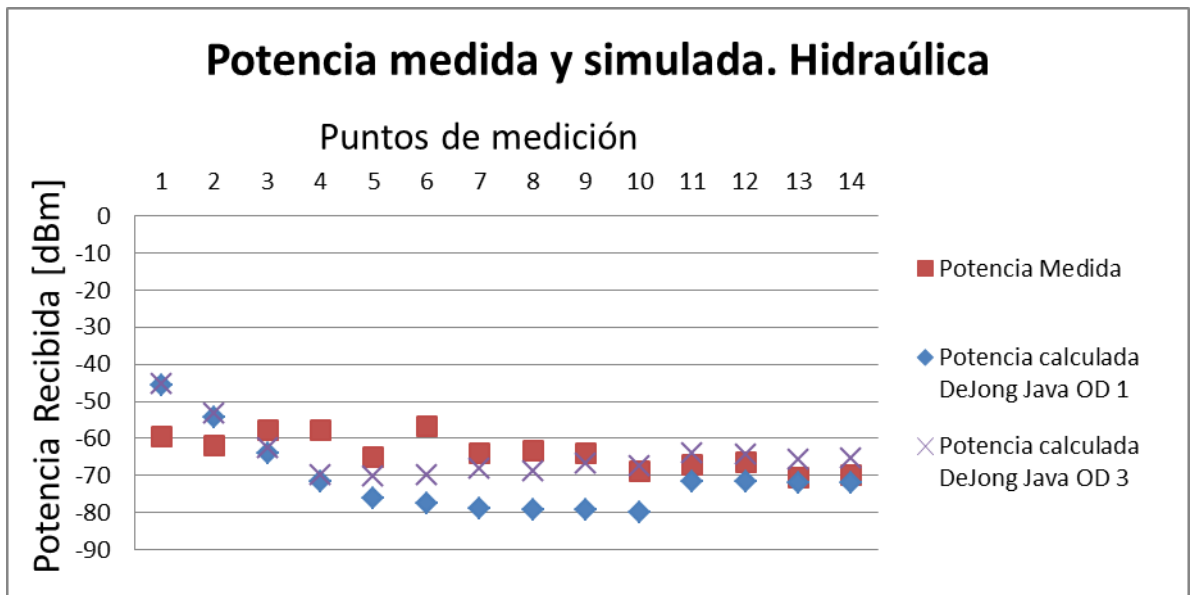


Figura 4.7. Resultados de medición y simulación para el edificio de Hidráulica.

Para medir la fidelidad de las curvas obtenidas mediante simulación haciendo uso del algoritmo DeJong-RadioGIS, respecto a los datos medidos en campo; utilizaremos como parámetro de comparación el error cuadrático medio. De esta forma el cálculo del error obtenido para cada una de las curvas es como se muestra en la Tabla 4.6 donde se calcula el error cuadrático medio para todos los puntos de las curvas en color azul y morado de la Figura 4.6 respecto a los puntos graficados en color rojo, y posteriormente el mismo cálculo de error pero despreciando los puntos de medición donde el algoritmo predice una potencia inferior a -80dBm, ya que es justo allí donde se encuentra el piso de ruido en el analizador de espectros y por estas razón estos valores pierden validez.

<i>Curva analizada</i>	<i>Error cuadrático medio [dB]</i>
Potencia DeJong_OD1	11,7271154
Potencia DeJong_OD3	7,398217449

Tabla 4.6. Cálculo del error medio cuadrático para las curvas de la Figura 4.6.

De la Figura 4.7 y la Tabla 4.6 se puede observar que los parámetros de sintonización seleccionados hasta el momento funcionan adecuadamente para el edificio de Hidráulica, se observa además que para un orden de descendencia de rayos igual a tres, el error disminuye considerablemente. En la siguiente sección se presentarán los resultados de verificación definitiva en una zona urbana común de Bucaramanga con muchas variables aleatorias y dinámicas que pondrán en prueba la aplicabilidad del algoritmo DeJong-RadioGIS en entornos urbanos como los encontrados en ciudades de Colombia.

4.4. VERIFICACIÓN DEL ALGORITMO SINTONIZADO

En la presente Sección se realizará un análisis donde se verificará que los parámetros sintonizados anteriormente funcionen para un escenario urbano común de Bucaramanga y de esta forma demostrar que el proceso de desarrollo llevado a cabo en el grupo RadioGIS ha dado frutos. La zona seleccionada para este fin fue un sector urbano en el barrio El Prado el cual se seleccionó por las razones mencionadas en la Sección 3.4.

La Figura 4.8 muestra una vista superior de la zona de medición. En esta figura se pueden visualizar los puntos que conformaron las rutas en las que se realizaron las respectivas mediciones y la ubicación de la estación base desde donde se estaba transmitiendo la señal electromagnética de prueba. Se definieron cuatro rutas de medición que se expanden por nueve manzanas de apartamentos, casas y edificios donde será posible evaluar los diversos medios de transmisión electromagnética contemplados por el algoritmo DeJong-RadioGIS y hacer de este modo una evaluación final al comportamiento del mismo.

Además, la Figura 4.8 permite identificar las cuatro rutas en las que se realizó la jornada de medición del barrio El Prado; cada una con un color diferente para mayor claridad. En las Tablas 4.8, 4.9, 4.11 y 4.13 se muestran los datos

tabulados de las potencias medidas en campo, comparadas contra los resultados de simulación, y en las Figuras 4.9 hasta la 4.12 se muestran los respectivos gráficos para tener una imagen más clara del comportamiento de ambas señales.



Figura 4.8. Zona de medición edificios, barrio El Prado (vista superior).
Imagen tomada con google earth.

En primera instancia se analizan los datos obtenidos en la ruta número uno, que se muestra de color Amarillo en la Figura 4.8. En este caso el efecto dominante para la mayor parte de los puntos es la transmisión a través de las edificaciones, los datos obtenidos tanto en medición como en simulación se muestran en la Tabla 4.8, y la gráfica comparativa correspondiente se muestra en la Figura 4.9 se aprecia que el algoritmo predice con una alta cuota de exactitud los valores medidos, excepto cuando la potencia que predicha por el algoritmo está por

debajo de -80 dBm, en estos casos el error se incrementa de manera significativa y las predicciones del algoritmo se salen de contexto.

Al realizar el cálculo del error cuadrático medio para los datos tabulados en la Tabla 4.7 se obtiene un error de 18.47 dB, el cual es demasiado grande para un modelo de radio- propagación. Sin embargo, mientras no se tengan en cuenta los datos en los cuales el algoritmo predice potencias inferiores -80 dB para el cálculo del error, el escenario cambia totalmente, y se pasa de tener errores por el orden de 20 dB a tener un error de 4.67 dB. Queda en evidencia el hecho de que las mediciones se ven sesgadas cuando la predicción del algoritmo para la potencia que recibe el analizador de espectros, está por debajo del umbral de -80 dBm y por tal motivo es acertado excluir dichos puntos del cálculo del error cuadrático medio, sin embargo, para todas las rutas se hará mención de ambos casos a modo de comparación.

Error, $P_{sim} > -80dBm$	4,6684 dB
Error	18,746 dB

Tabla 4.7. Cálculo del error cuadrático medio para la ruta 1 (Color amarillo)

En la Tabla 4.7 entiéndase por *Error, $P_{sim} > -80dBm$* al error cuadrático medio para los puntos donde el algoritmo DeJong RadioGIS predice potencias superiores a los -80 dBm, y *Error* al error cuadrático medio incluyendo todos los puntos sin excepción.

En las páginas siguientes se tabulan y grafican los resultados obtenidos mediante mediciones y simulaciones haciendo uso del algoritmo implementado en el grupo RadioGIS, para terminar con un breve análisis de los errores obtenidos.

N°	X [m]	Y [m]	Prmedida [dBm]	Prsimulada [dBm]
1	850	845	-31,7	-28,51
2	835	839	-43,1	-34,14
3	785	830	-67,2	-73,94
4	779	803	-75,7	-76,92
5	786	775	-72,7	-78,94
6	790	745	-73,6	-69,96
7	794	728	-79,2	-82,89
8	799	705	-75,7	-103,75
9	830	673	-73,6	-113,44
10	851	676	-74,21	-109,38
11	875	683	-67,4	-63,94
12	882	680	-38,6	-38,67
13	906	687	-64,7	-83,94
14	923	689	-80,1	-112,99
15	941	694	-79,1	-118,2
16	933	732	-81,7	-94,08
17	928	769	-69,53	-71,94
18	923	796	-80,3	-72,94
19	902	792	-78,8	-75,94
20	900	765	-67,5	-67,62

Tabla 4.8. Ruta 1 de medición (color amarillo)

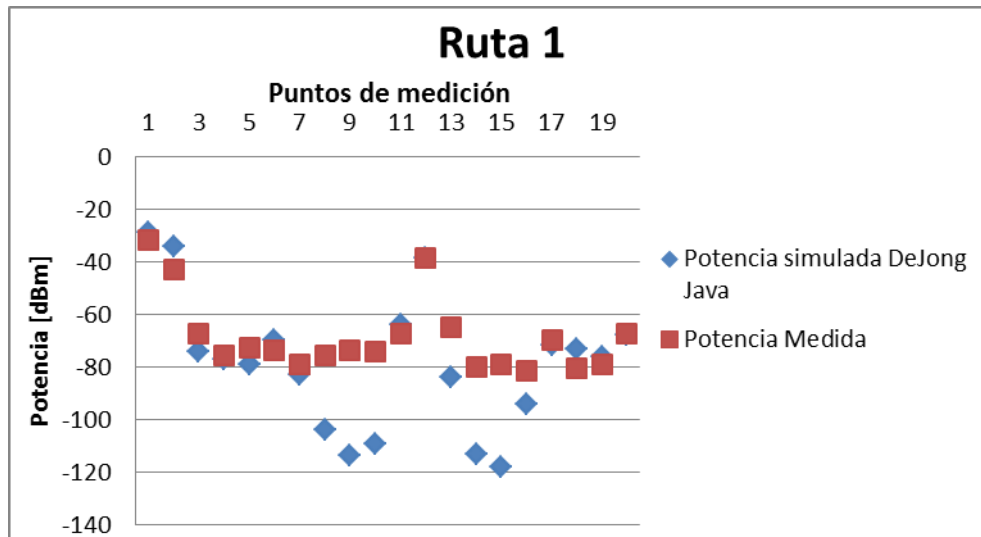


Figura 4.9 Comparación de resultados medidos vs simulados ruta 1 (color amarillo de la Figura 4.8)

N°	X [m]	Y [m]	Prmedida [dBm]	Prsimulada [dBm]
1	891	763	-43,5	-57,94
2	865	761	-34,6	-35,94
3	852	760	-43,8	-34,94
4	834	758	-54,8	-66,94
5	817	753	-65,8	-68,94
6	798	751	-64,6	-70,94
7	772	742	-76,2	-113,94
8	756	741	-68,7	-108,94
9	738	739	-72,4	-109,94
10	718	735	-70,3	-113,94
11	701	734	-74	-120,94
12	692	754	-80,9	-138,94
13	689	776	-81,5	-131,94
14	691	726	-78,9	-128,94
15	730	731	-73	-120,94
16	761	737	-71,3	-116,94
17	862	760	-41,7	-36,94
18	859	784	-30,8	-27,94
19	856	796	-25,3	-22,94
20	853	810	-12,3	-11,94

Tabla 4.9 Ruta 2 de medición (color rojo)

Error, P_{sim}>-80dBm	7,23035269 dB
Error	33,0768046 dB

Tabla 4.10. Error cuadrático medio calculado en la ruta 2 (color rojo en la Figura 4.8)

Una vez más puede apreciarse el cambio tan significativo al que hay lugar entre el cálculo del error que toma en cuenta los puntos con potencia simulada inferior a -80 dBm, y el cálculo de potencia que solo toma en cuenta los puntos donde el algoritmo predice potencias superiores a dicho umbral.

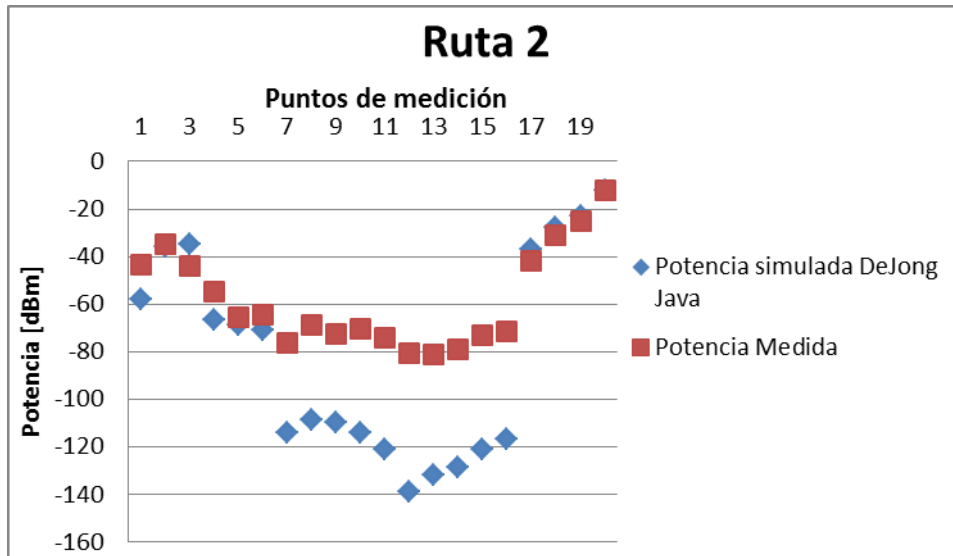


Figura 4.10. Comparación de resultados medidos vs simulados en la ruta 2 (color rojo de la Figura 4.8)

N°	X [m]	Y [m]	Prmedida [dBm]	Prsimulada [dBm]
1	910	908	-71,3	-70,94
2	921	871	-65,9	-66,94
3	896	854	-53,9	-53,94
4	877	850	-43,6	-42,94
5	860	846	-41,7	-33,94
6	839	844	-43,7	-32,94
7	816	839	-62,2	-49,94
8	792	837	-54,9	-53,94
9	756	828	-62,6	-74,94
10	742	826	-71,9	-75,94
11	722	823	-74,2	-76,94
12	701	817	-73,9	-94,94
13	688	759	-81,7	-127,94
14	709	651	-80,9	-145,94
15	736	658	-81,7	-144,94
16	767	663	-79	-129,94
17	798	669	-78,7	-106,94
18	809	645	-81,1	-132,94
19	813	599	-81,6	-138,94
20	854	596	-80,4	-174,94

Tabla 4.11 Ruta 3 de medición (color azul)

Error, Psim>-80dBm	6,77547449 dB
Error	38,48425 dB

Tabla 4.12. Error cuadrático medio calculado en la ruta 3, (color azul en la Figura 4.8)

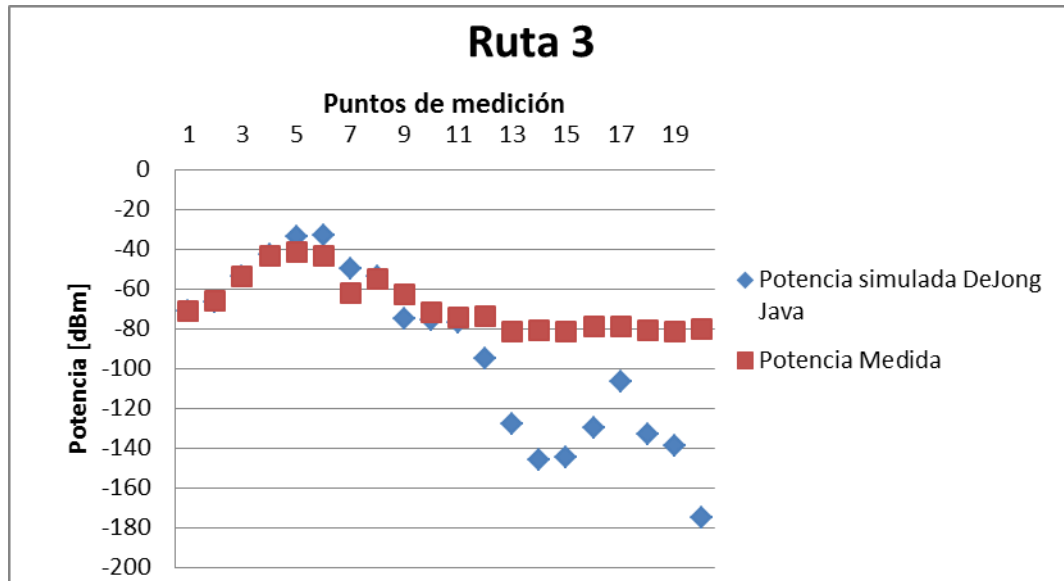


Figura 4.11. Comparación de resultados medidos vs simulados en la ruta 3 (Azul de la Figura 4.8)

N°	X [m]	Y [m]	Prmedida [dBm]	Prsimulada [dBm]
1	890	610	-55,6	-43,94
2	884	642	-45,2	-37,94
3	874	705	-44	-35,94
4	870	725	-40,8	-34,94
5	865	749	-38,6	-31,94
6	861	780	-37,6	-26,94
7	856	798	-24,6	-17,94
8	855	812	-14,9	-14,94

Tabla 4.13. Ruta 4 de medición (color verde)

De la Figura 4.10 cabe resaltar que incluso en las zonas donde el error aumenta considerablemente (Zonas donde la predicción del algoritmo está por debajo de -

80 dBm), la forma de la señal predicha y la medida conservan un comportamiento similar. De esta observación se puede inferir que la potencia medida en el analizador de espectros es producto de la superposición que ocurre entre la potencia del piso de ruido en el analizador y la que llega proveniente de la antena de interés. Este hecho explica que en esos puntos se registre una potencia superior a la que predice el algoritmo, la cual es responsable del dramático aumento en el error cuadrático medio

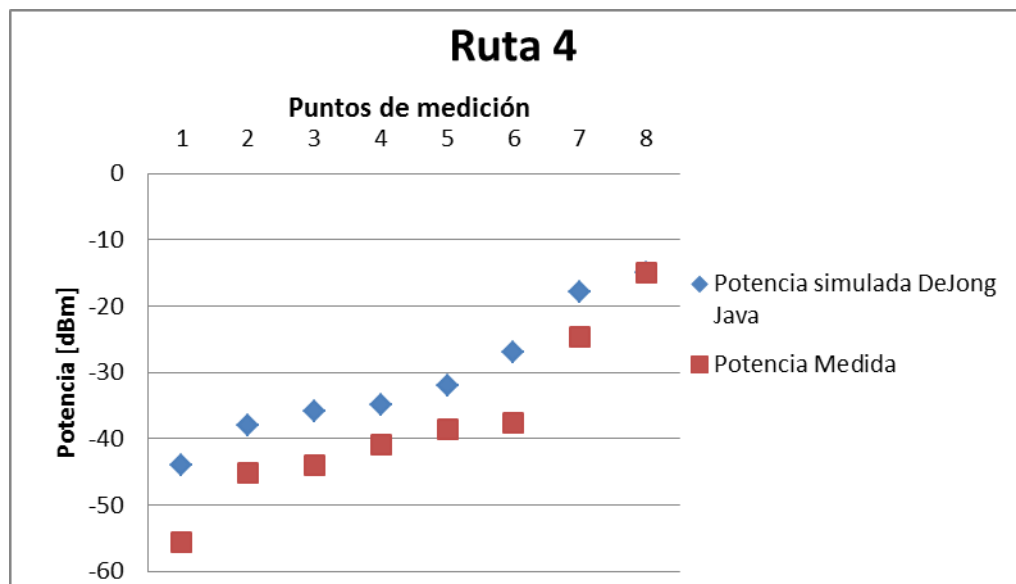


Figura 4.12. Comparación de resultados medidos vs simulados en la ruta 4 (verde de la Figura 4.8)

Error, Psim>-80dBm	7,8287515 dB
Error	7,8287515 dB

Tabla 4.14. Error cuadrático medio calculado en la ruta 4 (color verde en la Figura 4.8)

En primera instancia se analizan los datos obtenidos en la ruta color verde donde el efecto dominante es la transmisión por línea de vista, los datos obtenidos tanto en medición como en simulación se muestran en la Tabla 4.13, y la gráfica comparativa correspondiente se muestra en la Figura 4.12. Se aprecia que el

algoritmo predice un valor más alto de potencia del que realmente está midiendo el analizador de espectro. Si bien la tendencia de ambas curvas es muy similar, puede apreciarse un error de alrededor de 8 dB que aparece como un déficit constante de potencia a lo largo de toda la ruta. La explicación para esta caída sostenida en el recorrido es debido al hecho de que las mediciones se realizaron en un ambiente urbano que posee variables aleatorias para el algoritmo actual (presencia de árboles, movimiento de autos por las calles y desnivel en el trayecto de medición) las cuales se convierten en fuentes de pérdidas adicionales de potencia con respecto a las del espacio libre que es el tipo de propagación dominante para esta ruta.

De los datos y curvas mostradas anteriormente puede concluirse que salvo los problemas ocasionados por el piso de ruido en el analizador, que está alrededor de -80 dBm, las predicciones realizadas por el algoritmo que fue objeto de sintonización arrojan resultados satisfactorios incluso al ser evaluado en una zona urbana con alta concurrencia de personas, autos en las calles y árboles en los alrededores lo cual representa un caso desventajoso para el modelo implementado por el grupo RadioGIS debido a que desprecia algunos factores que en algunos casos pueden ser significativos y sobre todo por tratarse de un algoritmo que aún se encuentra en proceso de desarrollo.

RECOMENDACIONES

Si bien los cálculos que puede realizar el algoritmo DeJong-RadioGIS son acertados y acordes a la realidad con un margen de error aceptable, cabe resaltar que aún tiene algunas carencias que deben solucionarse antes de su implementación final como un servicio prestado por el grupo RadioGIS. A continuación se menciona una serie de recomendaciones a tener en cuenta para futuros trabajos que hagan uso de la herramienta objeto de sintonización y verificación en la presente tesis.

- Teniendo en cuenta que el algoritmo desarrollado tiene fines prácticos para el uso en planeación de redes inalámbricas, resulta de vital importancia realizar cambios sobre la interfaz que actualmente tiene implementada. En primera instancia se requiere que le sea implementado un *zoom* que facilite la toma de medidas y evitar incomodidades por el tamaño con el que se muestran los resultados de simulación. También resultaría interesante que la herramienta final permita la posibilidad de exportar los datos obtenidos en simulación y facilitar procesos de sintonización futuros cuando el algoritmo se tenga que adaptar a diferentes entornos.
- Debido a que las condiciones ambientales varían, al igual que la configuración de las ciudades y los materiales de fabricación usados en las edificaciones actuales; resultaría de gran utilidad que parámetros como el coeficiente de permitividad relativa, el factor de atenuación efectivo y el factor que modela las condiciones del entorno, puedan ser modificadas de manera externa y no necesariamente desde el código fuente. Esto facilitaría el proceso de sintonización al permitir que los usuarios puedan hacer una

retroalimentación al algoritmo, y de esta forma su desempeño se vería considerablemente mejorado.

- Debido al área de cobertura relativamente pequeña de las microceldas urbanas, el ángulo de incidencia de las ondas sobre las paredes externas de las edificaciones se convierte en un factor muy significativo. El hecho de no tenerlo en cuenta, afecta de manera considerable las predicciones y el adecuado comportamiento del algoritmo. Por esta razón es recomendable considerar estos ángulos y evitar inexactitudes como las que se observan en los resultados obtenidos luego de analizar las medidas tomadas en el edificio LAT en el capítulo 4.

CONCLUSIONES

- Actualmente se cuenta con un algoritmo que se encuentra en fase de desarrollo, puede observarse que los resultados predichos por el modelo implementado muestran un comportamiento similar a los resultados obtenidos en las campañas de medida. Comparando los resultados con los que presenta DeJong en su tesis, queda claro que el error obtenido en las mediciones con el algoritmo DeJong-RadioGIS se mantienen en la mayoría de las ocasiones un orden de magnitud igual o incluso inferior al modelo implementado por DeJong. El analizador de espectros no permite mostrar la potencia recibida menor a su piso de ruido, esto demostró ser el factor que mayor efecto tiene en el error cuadrático medio entre los resultados medidos y los que predice el algoritmo, lo cual queda claro en las Tablas de error mostradas en el Capítulo 4.
- El algoritmo implementado hasta el momento no tiene en cuenta el efecto dispersivo de los árboles en el entorno, la difracción en esquinas y bordes, ni el ángulo de incidencia para el cálculo de las pérdidas por reflexión y transmisión. Sin embargo, puede observarse de las mediciones en El Prado, que el efecto total de dichos aportes son relativamente significativos en la mayor parte del área de medición; el hecho de incluir el ángulo de incidencia y estos mecanismos de radiopropagación en una versión futura del algoritmo, influirá directamente en la exactitud de las predicciones y reducirá el error a escalas incluso mejores.
- Las zonas de medición escogidas para sintonizar los parámetros del algoritmo presentaban baja densidad de árboles, debido a que no ha sido

implementado este tipo de dispersión; sin embargo, algunos árboles u otros objetos estaban presentes en el entorno, por esta razón la predicción y los resultados de las mediciones presentaban variaciones considerables en algunos puntos de observación.

- La interfaz gráfica del algoritmo implementado en la plataforma NetBeans se debe mejorar considerablemente, la resolución de la imagen y la falta de *zoom* en la misma fue una dificultad que se tuvo constantemente mientras se realizaba el proceso de toma de datos simulados ya que no existe una manera automatizada para la exportación de información hacia alguna herramienta de análisis estadístico.
- La implementación final del algoritmo sintonizado sobre la herramienta CellGIS no se pudo llevar a cabo debido a que los encargados de crear el *plug-in* de la universidad ICESI en Cali no lograron terminar el proceso de desarrollo necesario. Sin embargo, esta dificultad no afecta los parámetros sintonizados, ni la calidad en las predicciones de simulación ya que dicho *plug-in* solo se encarga de montar el servicio en el servidor local.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Y.L.C. de Jong. "Measurement and modelling of radiowave propagation in urban microcells" Doctor Thesis, Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2001. Proefschrift. – ISBN 90-386-1860-3. Pp 112-114.

- [2] Disponible en: http://NetBeans.org/index_es.html.

- [3] Y.L.C. de Jong. "Measurement and modelling of radiowave propagation in urban microcells" Doctor Thesis, Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2001. Proefschrift. – ISBN 90-386-1860-3. Pp 58.

- [4] Homero Ortega Boada, Marcos Duván Pineda Alhucema, Andres Navarro Cadavid. "Modified Version of DeJong Radiopropagation Model".

- [5] Y.L.C. de Jong and M.H.A.J. Herben, "Accurate identification of scatterers for improved microcell propagation modelling," in Proc. 8th IEEE Int. Symp. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'97), Helsinki, Finland, 1997, vol. 2, pp. 645–649.

- [6] Y.L.C. de Jong and M.H.A.J. Herben. "Experimental verification of ray-tracing based propagation prediction models for urban microcell environments", in Proc. IEEE 50th Veh. Technol. Conf. (VTC'99–Fall), 1999, vol. 3, pp. 1434–1438.

- [7] Y.L.C. de Jong and M.H.A.J. Herben, "High-resolution angle-of-arrival measurement of the mobile radio channel," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 47, no. 11, pp. 1677–1687, Nov. 1999.

- [8] Y.L.C. de Jong, M.H.A.J. Herben, J.-F. Wagen, and A. Mawira, "Transmission of UHF radiowaves through buildings in urban microcell environments," Electron. Lett., vol. 35, no. 9, pp. 743–745, Apr. 1999.

- [9] Y.L.C. de Jong, M.H.J.L. Koelen, and M.H.A.J. Herben, "Measurement of building transmission loss using wideband radio channel sounding," *Electron. Lett.*, vol. 36, no. 12, pp. 1067–1069, June 2000.
- [10] Y.L.C. de Jong and M.H.A.J. Herben, "Prediction of local mean power using 2-D ray-tracing-based propagation models," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 50, no. 1, pp. 325–331, Jan. 2001.
- [11] Y.L.C. de Jong. "Measurement and modelling of radiowave propagation in urban microcells" Doctor Thesis, Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2001. Proefschrift. – ISBN 90-386-1860-3.
- [12] W.M.C. Dolmans, *Effect of indoor fading on the performance of an adaptive antenna system*, Ph.D. thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands, 1997.
- [13] B. Chopard, P.O. Luthi, and J.-F. Wagen, "Lattice Boltzmann method for wave propagation in urban microcells," *IEE Proc.-Microw. Antennas Propag.*, vol. 144, no. 4, pp. 251–255, Aug. 1997.
- [14] K. Rizk, J.-F. Wagen, and F. Gardiol, "Two-dimensional ray tracing modeling for propagation prediction in microcellular environments," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 46, no. 2, pp. 508–518, May 1997.
- [15] V. Erceg, A.J. Rustako, and R.S. Roman, "Diffraction around corners and its effects on the microcell coverage area in urban and suburban environments at 900 MHz, 2 GHz, and 6 GHz," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 43, no. 3, pp. 762–766, Aug. 1994.
- [16] Y.L.C. de Jong. "Measurement and modelling of radiowave propagation in urban microcells" Doctor Thesis, Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2001. Proefschrift. – ISBN 90-386-1860-3. Chapter 4.
- [17] Y.L.C. de Jong. "Measurement and modelling of radiowave propagation in urban microcells" Doctor Thesis, Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2001. Proefschrift. – ISBN 90-386-1860-3. Chapter 5.

- [18]Y.L.C. de Jong. "Measurement and modelling of radiowave propagation in urban microcells" Doctor Thesis, Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2001. Proefschrift. – ISBN 90-386-1860-3. Pp 51-61, Section 4.2.
- [19]Y.L.C. de Jong. "Measurement and modelling of radiowave propagation in urban microcells" Doctor Thesis, Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2001. Proefschrift. – ISBN 90-386-1860-3. Pp 98, Section 5.4.2.
- [20]Y.L.C. de Jong. "Measurement and modelling of radiowave propagation in urban microcells" Doctor Thesis, Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2001. Proefschrift. – ISBN 90-386-1860-3. Pp 112-114.
- [21]Yong Liu, Kairaz Contractor, Yunjuan Kang, "Path Loss For Short Range Telemetry". Pp 2.
- [22]Sebastian Buettrich, wire.less.dk. Editado por Alberto Escudero Pascual, IT +46. "Cálculo de Radioenlace". Pp 8-10. Capítulo 6.
- [23]F. Pérez Fontán and P. Marino Espineira. "Modelling the Wireless Propagation Channel". University of Vigo, Spain. Pp 9.
- [24]Sebastian Buettrich, wire.less.dk. Editado por Alberto Escudero Pascual, IT +46. "Introducción a la Física de la Radio". Pp 9. Capítulo 3.
- [25]G.E. Athanasiadou and A.R. Nix, "Investigation into the sensitivity of the power predictions of a microcellular ray tracing propagation model," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 49, no. 4, pp. 1140–1151, July 2000.
- [26]W.D. Burnside and K.W. Burgener, "High frequency scattering by a thin lossless dielectric slab," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-31, no. 1, pp. 104–110, Jan. 1983.
- [27]Y.L.C. de Jong. "Measurement and modelling of radiowave propagation in urban microcells" Doctor Thesis, Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2001. Proefschrift. – ISBN 90-386-1860-3. Pp 51-53.

[28]Y.L.C. de Jong. "Measurement and modelling of radiowave propagation in urban microcells" Doctor Thesis, Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2001. Proefschrift. – ISBN 90-386-1860-3. Pp 64-77.

[29]Y.L.C. de Jong. "Measurement and modelling of radiowave propagation in urban microcells" Doctor Thesis, Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2001. Proefschrift. – ISBN 90-386-1860-3. Pp 115-122.

Anexo A Equipo de medición



Figura A1. Analizar de espectros (ROHDE&SCHWARZ ZVL6 Network Analyser)

- **Características del instrumento**
- Rango de frecuencias 9 kHz a 6 GHz
- Conexión Ethernet
- Analizador de redes
- Sistema operativo Windows embebido
- Batería externa



Figura A2. Generador de señales (ROHDE&SCHWARZ SMB 100A Signal generator)

- **Características del instrumento**
- Rango de frecuencias 9 kHz a 6 GHz
- Rango de nivel -145 dBm to $+30$ dBm
- Sistema operativo Windows embebido



Figura A3. Antena 11 dBi (HG1911U)

• **Características de la antena HG1911U**

- Rango de frecuencias 1.880 a 1.9 GHz
- Ganancia 11 dBi
- Impedancia de 50 Ohm

• **Patrón de radiación de la antena HG1911U**

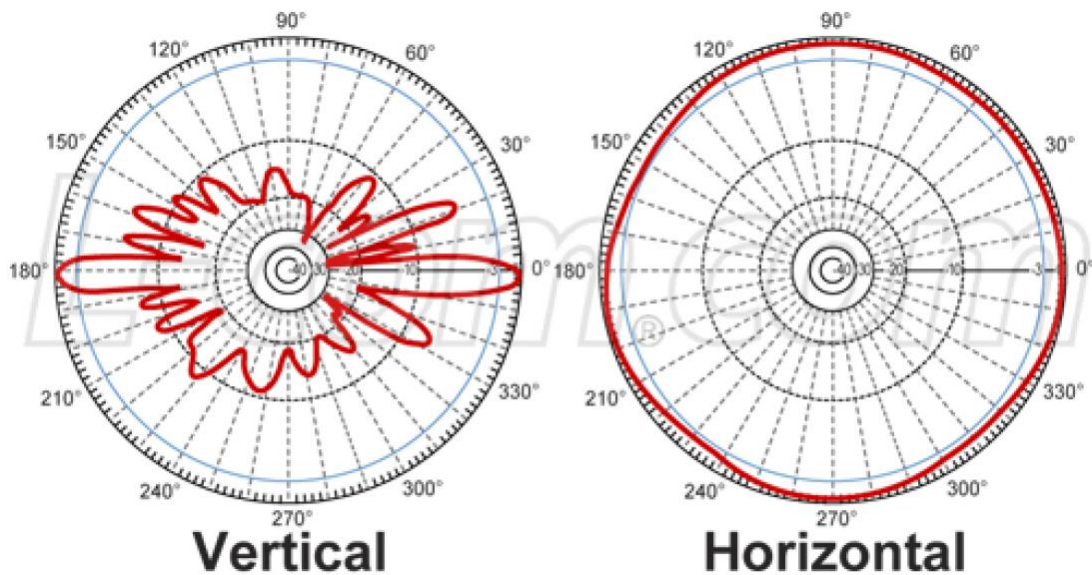


Figura A4. Patrón de radiación de la antena (HG1911U)



Figura A5. Antena 3.5 dBi (HG2404CU)

• **Características de la antena HG2404CU**

- Rango de frecuencias 800 a 3000 MHz
- Ganancia 3.5 dBi
- Impedancia de 50 Ohm

• **Patrón de radiación de la antena HG2404CU**

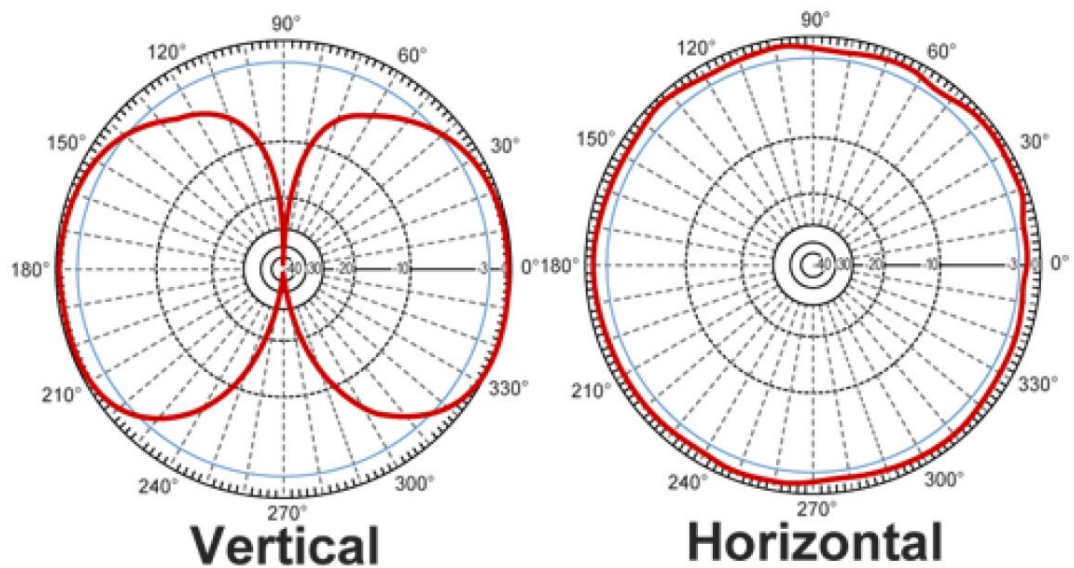


Figura A6. Patrón de radiación de la antena (HG2404CU)

PASTERNAK ENTERPRISES RG213/U

IMPEDANCE: 50 OHMS
 INNER CONDUCTOR DIAMETER: .0888" (7 STRANDS .0296")
 INNER CONDUCTOR MATERIAL: BARE COPPER
 DIELECTRIC DIAMETER: .285"
 DIELECTRIC MATERIAL: SOLID POLYETHYLENE
 NUMBER OF SHIELDS: 1
 SHIELD MATERIAL: BARE COPPER
 OUTER DIAMETER: .405"
 JACKET MATERIAL: BLACK POLYVINYLCHLORIDE, NON CONTAMINATING
 NOMINAL CAPACITANCE (pf/ft): 30.8
 OPERATING TEMPERATURE: -40° TO +80° C
 MAX OPERATING VOLTAGE (VOLTS RMS): 5,000

NOMINAL ATTENUATION (PER 100 FEET)

10 MHz	.66dB
100 MHz	2.20dB
1 GHz	9.00dB
5 GHz	28.00dB
10 GHz	47.00dB

MAXIMUM POWER HANDLING (AVERAGE POWER IN WATTS)

10 MHz	3,700
100 MHz	850
1 GHz	190
5 GHz	65
10 GHz	37

PASTERNAK ENTERPRISES
ESTABLISHED 1972

PASTERNAK ENTERPRISES, INC.
 P.O. BOX 16769, IRVINE, CA 92623
 PHONE (949) 261-1920 FAX (949) 261-7451
 WEB ADDRESS: www.pasternack.com
 E-MAIL ADDRESS: sales@pasternack.com
COAXIAL & FIBER OPTICS

DWG TITLE		DES. 50 OHM COAXIAL CABLE	
RG213/U			
REV. A	FSCM NO. 53919	CAD FILE 022808	SCALE N/A SIZE A 147
NOTES: 1. UNLESS OTHERWISE SPECIFIED ALL DIMENSIONS ARE NOMINAL, 2. ALL SPECIFICATIONS ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE AT ANY TIME. 3. DIMENSIONS ARE IN INCHES.			

Figura A7. Información del cable coaxial utilizado en las campañas de medidas

PÉRDIDAS DE TRANSMISIÓN EN EL CABLE COAXIAL			
FRECUENCIA	POTENCIA DEL GENERADOR [dBm]	POTENCIA EN EL ANALIZADOR [dBm]	PÉRDIDA EN EL CABLE [dB]
30 MHz	25	23.35	1.65
	20	19.52	0.48
	10	9.61	0.39
	0	-0.52	0.52
	-10	-10.16	0.16
	-20	-20.11	0.11
	-30	-31.24	1.24
900 MHz	25	24.38	0.62
	20	19.47	0.53

	10	9.32	0.68
	0	-1.48	1.48
	-10	-11.17	1.17
	-20	-21.17	1.17
	-30	-30.9	0.9
1.8 GHz	25	24.53	0.47
	20	19.18	0.82
	10	8.94	1.06
	0	-1.44	1.44
	-10	-11.44	1.44
	-20	-21.46	1.46
	-30	-31.2	1.2
1.85 GHz	25	24.7	0.3
	20	19.16	0.84
	10	8.34	1.66
	0	-1.32	1.32
	-10	-11.28	1.28
	-20	-21.3	1.3
	-30	-31.13	1.13
1.9 GHz	25	24.59	0.41
	20	19.07	0.93
	10	8.23	1.77
	0	-1.9	1.9
	-10	-11.28	1.28
	-20	-21.27	1.27
	-30	-31.52	1.52
1.95 GHz	25	24.27	0.73
	20	18.78	1.22
	10	8.58	1.42
	0	-1.7	1.7
	-10	-11.68	1.68
	-20	-21.6	1.6
	-30	-31.2	1.2
2 GHz	25	24.01	0.99
	20	18.54	1.46
	10	8.36	1.64
	0	-1.87	1.87
	-10	-11.87	1.87
	-20	-21.87	1.87

	-30	-31.33	1.33
2.5 GHz	25	23.75	1.25
	20	18.81	1.19
	10	8.54	1.46
	0	-2.14	2.14
	-10	-11.89	1.89
	-20	-21.88	1.88
	-30	-31.52	1.52
3 GHz	25	23.68	1.32
	20	18.45	1.55
	10	8.19	1.81
	0	-1.99	1.99
	-10	-11.78	1.78
	-20	-21.77	1.77
	-30	-31.9	1.9

Tabla A1. Pérdidas en el cable coaxial a diferentes frecuencias y potencia transmitidas

Anexo B Cálculo de radio enlace

En la Figura x se observa la potencia en dBm en función de la distancia para un radioenlace.

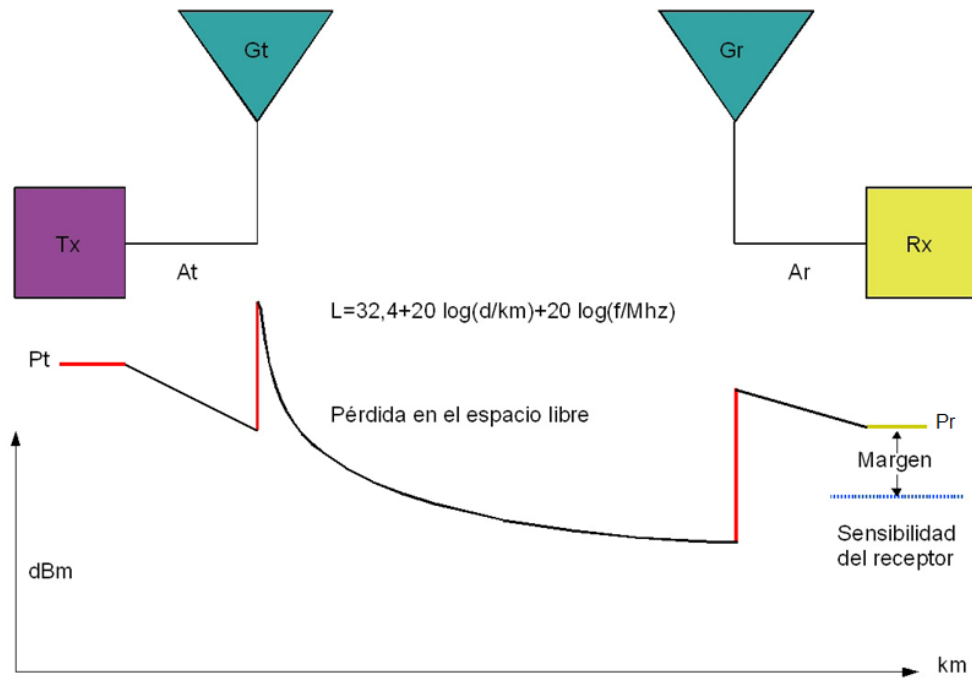


Figura B1. Potencia en dBm en función de la distancia para un radioenlace. [22]

La potencia real obtenida en un punto de observación es,

$$P_{real}[dBm] = potencia\ recibida\ en\ el\ analizador\ [dBm] + perdida\ en\ el\ cable\ [dB] - ganancia\ de\ la\ antena\ [dBi]$$

La potencia irradiada isotrópica efectiva (PIRE) es,

$$PIRE[dBm] = potencia\ del\ transmisor\ [dBm] - perdida\ en\ el\ cable\ [dB] + ganancia\ de\ la\ antena\ [dBi]$$

En los cálculos de radio enlace hay tres tipos de unidades logarítmicas:

1. dB (decibel)

Se usa para medir pérdidas en los cables y conectores o ganancia de antenas y amplificadores. El decibel es una unidad relativa correspondiente al logaritmo decimal del cociente de dos valores de potencia o de tensión.

$$dB = 10 \times \log \frac{P_2}{P_1}$$

$$dB = 20 \times \log \frac{V_2}{V_1}$$

Los dB son positivos cuando se refieren a una ganancia, como la de una antena o un amplificador, y negativos cuando corresponden a una atenuación, como la de un cable.

Duplicar la potencia es igual que agregar 3 dB y reducir la potencia a la mitad es igual que restar 3 dB.

2. dBm (dB referido a un mW)

El dBm es una unidad logarítmica referida a la potencia de 1 mili Watt (0,001 W). Por lo tanto mide potencia absoluta. Será positivo cuando se refiera a valores superiores a 1 mW y negativo para valores inferiores a 1 mW, como los correspondientes a potencias recibidas.

$$dBm = 10 \times \log \frac{P}{1 \text{ mW}}$$

$$dBm = dB - 30$$

3. dBi (decibel respecto a la isotrópica)

Usado para expresar la ganancia de una antena en comparación con una antena isotrópica, es decir aquella que irradia en todas direcciones con la misma intensidad:

$$dBi = dB \text{ relativo a una antena isotrópica}$$

Anexo C Error cuadrático medio y mínimos cuadrados

El Error Cuadrático Medio (E_{mc}) corresponde a la raíz cuadrada de la media aritmética de los cuadrados de los errores verdaderos (E_i)

$$E_{mc} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n E_i^2}{n}}$$

Mínimos cuadrados es una técnica de análisis numérico encuadrada dentro de la optimización matemática, en la que, dados un conjunto de pares (o ternas, etc), se intenta encontrar la función que mejor se aproxime a los datos (un "mejor ajuste"), de acuerdo con el criterio de mínimo error cuadrático.

En su forma más simple, intenta minimizar la suma de cuadrados de las diferencias ordenadas (llamadas *residuos*) entre los puntos generados por la función y los correspondientes en los datos. Específicamente, se llama *mínimos cuadrados promedio* (LMS) cuando el número de datos medidos es 1 y se usa el método de descenso por gradiente para minimizar el residuo cuadrado. Se puede demostrar que LMS minimiza el residuo cuadrado esperado, con el mínimo de operaciones (por iteración), pero requiere un gran número de iteraciones para converger.

Desde un punto de vista estadístico, un requisito implícito para que funcione el método de mínimos cuadrados es que los errores de cada medida estén distribuidos de forma aleatoria. El teorema de Gauss-Márkov prueba que los estimadores mínimos cuadráticos carecen de sesgo y que el muestreo de datos no tiene que ajustarse, por ejemplo, a una distribución normal. También es importante que los datos recogidos estén bien escogidos, para que permitan visibilidad en las variables que han de ser resueltas (para dar más peso a un dato en particular, véase mínimos cuadrados ponderados).

La técnica de mínimos cuadrados se usa comúnmente en el ajuste de curvas. Muchos otros problemas de optimización pueden expresarse también en forma de mínimos cuadrados, minimizando la energía o maximizando la entropía.

Anexo D Herramientas de software empleadas

Geoportal

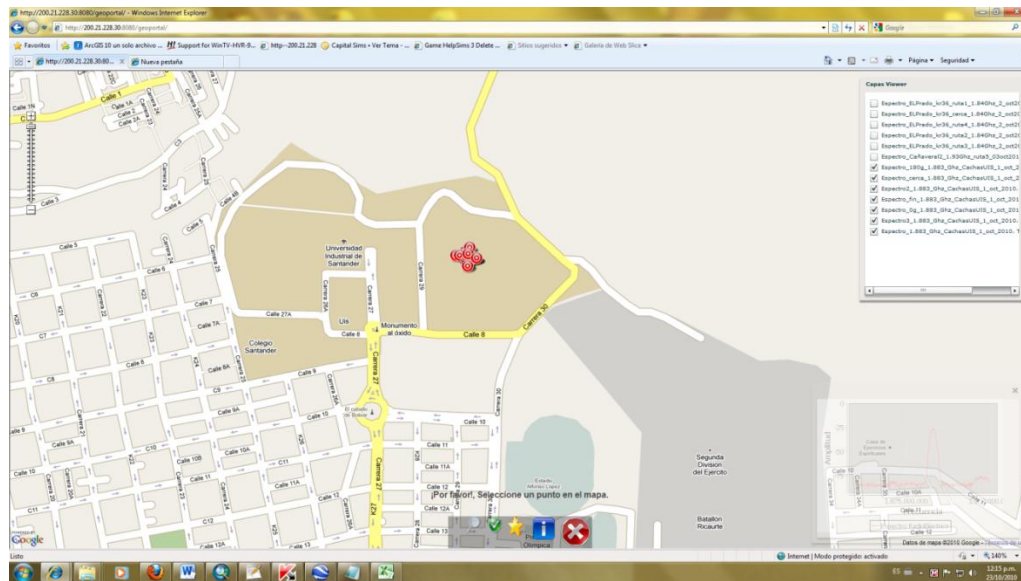


Figura D1. Campaña de medidas en el estadio *primero de mayo* de la Universidad Industrial de Santander (todas las rutas)

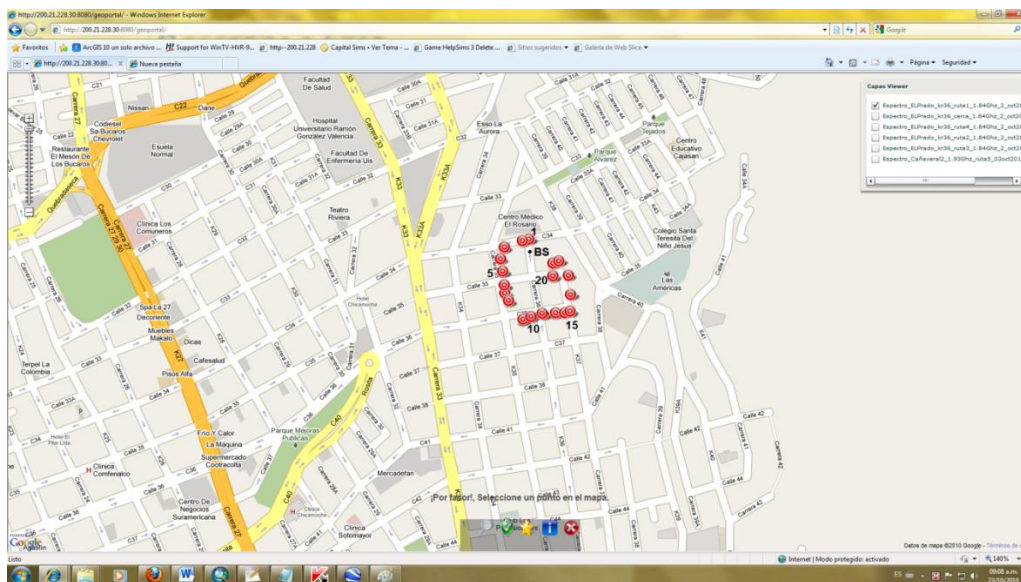


Figura D2. Campaña de medidas en El Prado, Bucaramanga (ruta 1)

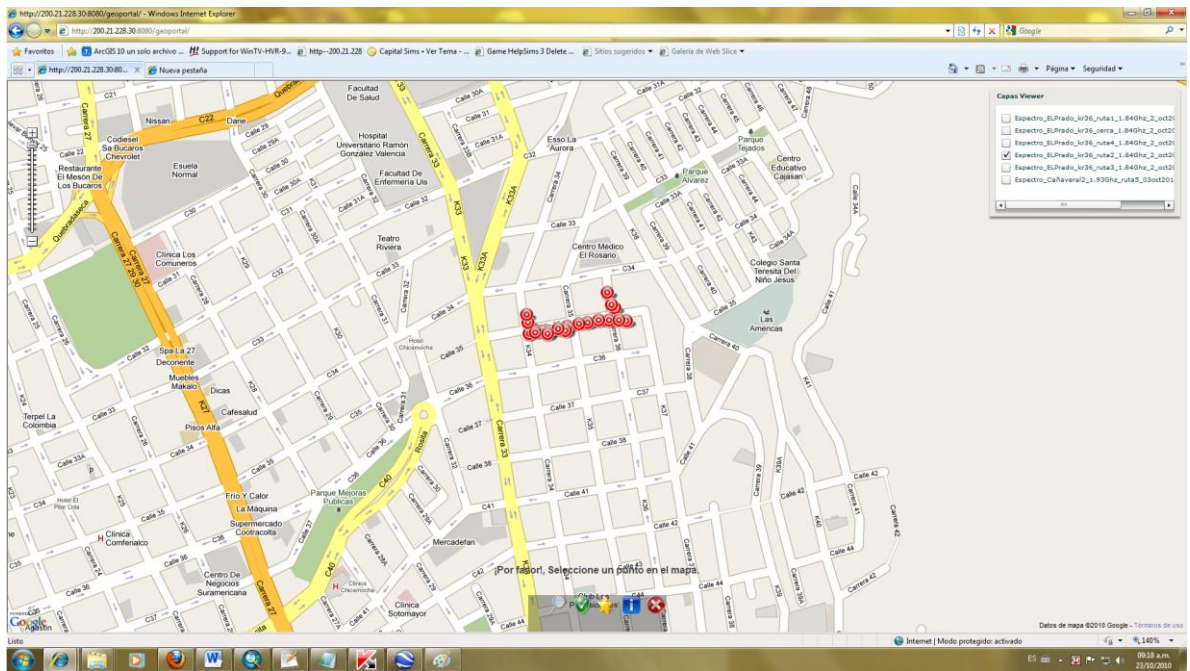


Figura D3. Campaña de medidas en El Prado, Bucaramanga (ruta 2)

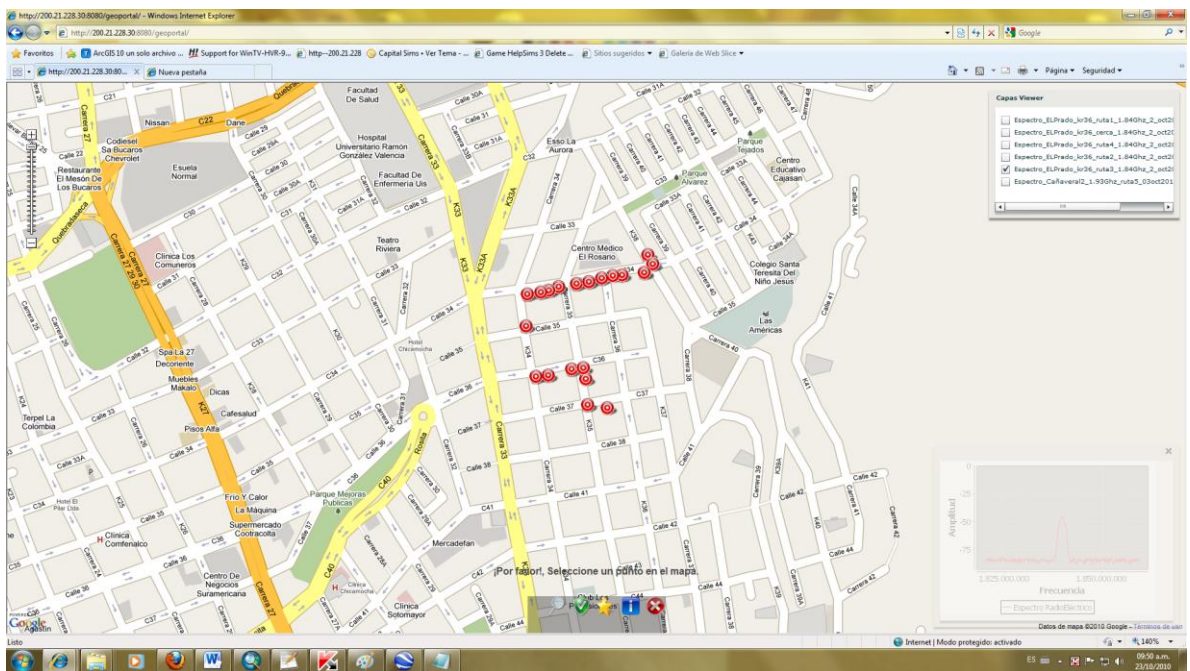


Figura D4. Campaña de medidas en El Prado, Bucaramanga (ruta 3)

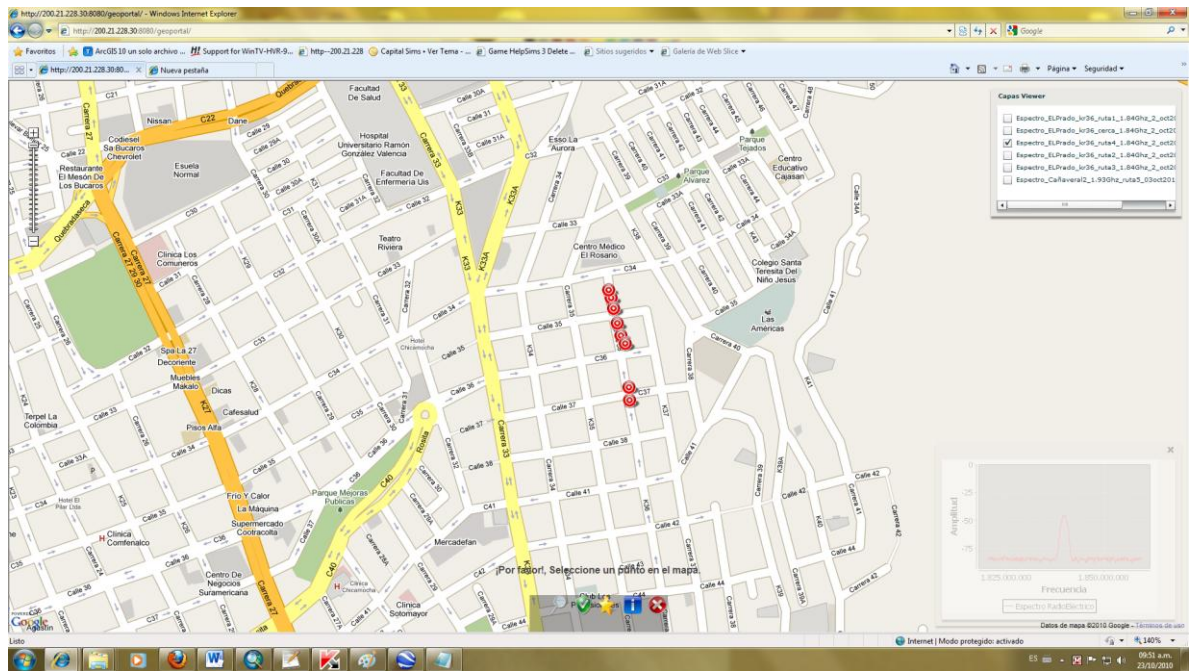


Figura D5. Campaña de medidas en El Prado, Bucaramanga (ruta 4)

ArcGIS



Figura D6. Campaña de medidas en El Prado, Bucaramanga

Implementación Java del algoritmo DeJong RadioGIS

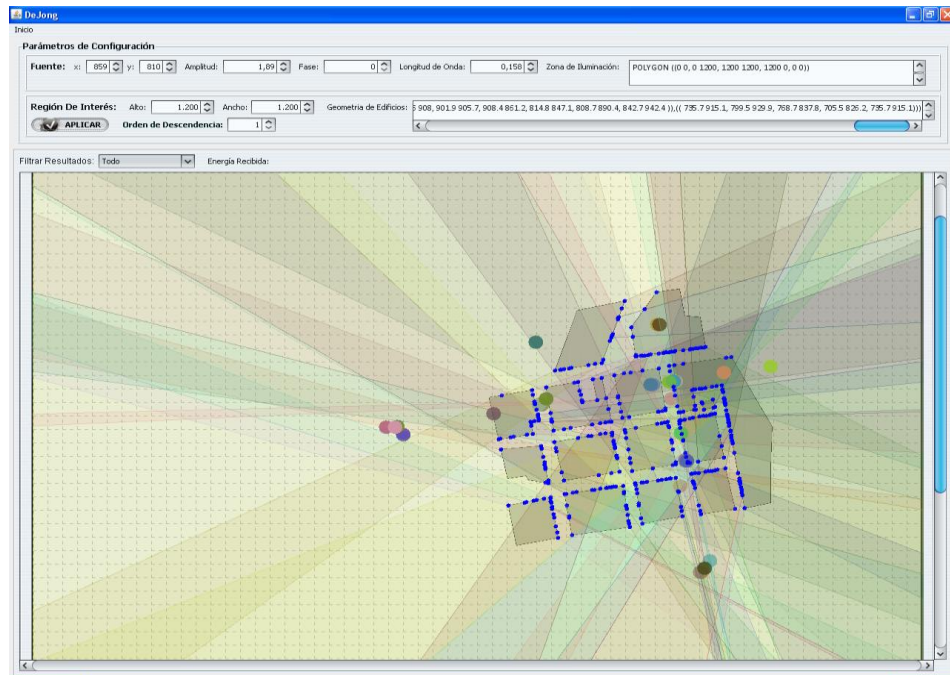


Figura D7. Interfaz gráfica del algoritmo DeJong-RadioGIS, El Prado

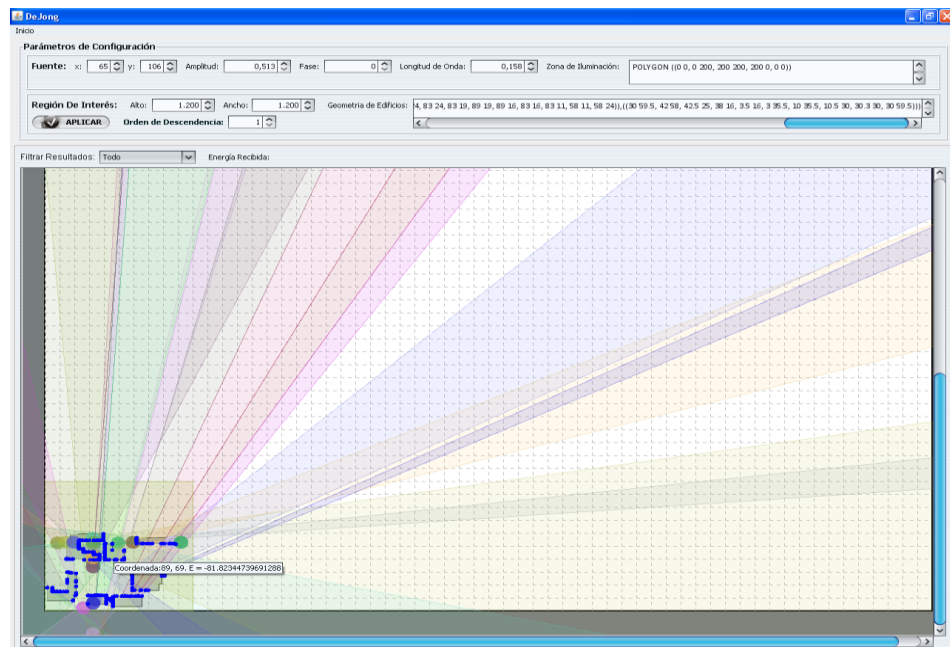


Figura D8. Interfaz gráfica del algoritmo DeJong-RadioGIS, LAT