

**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**  
**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

“Desarrollo de un modelo de propagación de señal de una antena  
GSM ubicada en la ESPOL, para que sea utilizado como  
herramienta didáctica en actividades académicas”

**INFORME DE GRADUACIÓN**

Previo la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

Presentado por:

David Simón Espinoza Campodónico

Alfredo José Núñez Unda

Angelo Iván Vera Rivera

GUAYAQUIL – ECUADOR

2010

## AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios por brindarnos la vida, a nuestros padres por su dedicación y cuidado durante todos estos años, al Dr. Boris Ramos por su sabia orientación y a nuestros amigos del Grupo IRNI por su incondicional apoyo.

## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

---

Ing. Jorge Aragundi R.  
SUB-DECANO DE LA FIEC  
PRESIDENTE

---

Dr. Boris Ramos S.  
DIRECTOR DE PROYECTO  
DE GRADUACIÓN

---

Ing. Juan Carlos Avilés C.  
VOCAL

---

Ing. Pedro Vargas G.  
VOCAL

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Trabajo de Grado, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

---

Alfredo Núñez U.

---

Angelo Vera R.

---

David Espinoza C.

## RESUMEN

La propagación de potencia de una señal inalámbrica está determinada por numerosos factores, tales como: distancia, línea de vista, obstrucción debida a edificios, vegetación y diferencia de altura en el área de propagación, etc. Estos factores interfieren y limitan la transmisión de señales en sistemas de comunicación inalámbricos, pero pueden ser cuantificados usando modelos de propagación.

El presente trabajo describe el desarrollo del modelo de propagación de señal de una antena GSM, basado en los principios de modelamiento de propagación de Lee y mediciones de pérdida de potencia. Se analiza además el efecto de desvanecimiento de potencia provocado por obstáculos en ambientes exteriores como edificios y vegetación. Finalmente usando el modelo obtenido se desarrolla una herramienta didáctica para actividades académicas de la carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones de la ESPOL.

## INDICE GENERAL

|  |          |
|--|----------|
| RESUMEN .....  | V        |
| INDICE GENERAL.....  | VI       |
| INDICE DE FIGURAS.....   | XI       |
| INDICE DE TABLAS .....   | XIV      |
| ABREVIATURAS .....   | XVI      |
| INTRODUCCION.....  | XVII     |
| <b>1. GENERALIDADES DEL MODELAMIENTO DE PROPAGACIÓN DE SEÑALES .....</b>       | <b>1</b> |
| 1.1 El concepto de ondas electromagnéticas .....                               | 2        |
| 1.1.1 Campo Eléctrico.....   | 2        |
| 1.1.2 Campo Magnético .....  | 3        |
| 1.1.3 Ondas Electromagnéticas .....  | 3        |
| 1.2 El espectro electromagnético .....   | 4        |
| 1.3 Propagación de ondas electromagnéticas.....                                | 5        |
| 1.3.1 Propagación de ondas electromagnéticas en condiciones de línea de vista  | 6        |
| 1.3.2 Propagación de ondas electromagnéticas sin condiciones de línea de vista | 8        |
| 1.3.3 El concepto de pérdida de camino (path loss) .....                       | 9        |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 1.4       | Esquemas de modelamiento de propagación a ras de tierra.....     | 10        |
| 1.4.1     | Esquemas de modelamiento de vegetación .....                     | 11        |
| 1.4.1.1   | Modelo Weissberger .....   | 11        |
| 1.4.1.2   | Modelo Early ITU .....   | 12        |
| 1.4.2     | Esquemas de modelamiento de terreno .....                        | 12        |
| 1.4.2.1   | Modelo Egli .....  | 13        |
| 1.4.2.2   | Modelo Longley-Rice .....  | 14        |
| 1.4.3     | Esquemas de modelamiento de áreas con edificios .....            | 15        |
| 1.4.3.1   | Modelo Young.....  | 15        |
| 1.4.3.2   | Modelo Okumura.....  | 15        |
| 1.4.3.3   | Modelo Hata.....   | 17        |
| <b>2.</b> | <b>PRINCIPIOS DE MODELAMIENTO DE PROPAGACIÓN DE SEÑALES</b>      |           |
|           | <b>DE LEE.....</b>   | <b>19</b> |
| 2.1       | El Concepto de sistema celular .....                             | 20        |
| 2.1.1     | El concepto de re-uso de frecuencias .....                       | 22        |
| 2.1.2     | Las celdas celulares: micro y macro celdas .....                 | 23        |
| 2.1.3     | Descripción del funcionamiento de la tecnología GSM .....        | 24        |
| 2.2       | Modelo microcelular de Lee.....                                  | 26        |
| 2.2.1     | Antecedentes históricos .....                                    | 27        |
| 2.2.2     | Generalidades y parámetros del modelo microcelular .....         | 27        |
| 2.2.3     | Ecuación de Lee para microceldas .....                           | 28        |
| 2.3       | Procedimiento de evaluación del modelo microcelular de Lee ..... | 31        |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 2.3.1     | Generalidades del procedimiento .....  | 32        |
| 2.3.2     | Identificación de una ruta de estudio.....   | 33        |
| 2.3.3     | Mapeo y digitalización del área de incidencia .....  | 34        |
| 2.3.4     | Cuantificación de obstrucciones y su incidencia en la pérdida de camino                        | 34        |
| 2.4       | Muestra de la aplicación del procedimiento de evaluación, predicción y ajuste del modelo ..... | 37        |
| <b>3.</b> | <b>DESARROLLO Y PRUEBAS DEL MODELO DE PROPAGACIÓN .....</b>                                    | <b>40</b> |
| 3.1       | Aplicación de los principios de Lee para el caso ESPOL .....                                   | 41        |
| 3.2       | Análisis Preliminar .....  | 42        |
| 3.2.1     | Descripción de la antena GSM ubicada en el ciclo básico ESPOL                                  | 43        |
| 3.2.2     | Identificación de las zonas de cobertura de la antena .....                                    | 45        |
| 3.2.3     | Determinación de la ruta y puntos de estudio .....   | 49        |
| 3.2.4     | Mapeo y digitalización del área de incidencia .....  | 50        |
| 3.2.5     | Cuantificación de parámetros de ocupación y obstrucción .....                                  | 51        |
| 3.2.6     | Configuración del equipo usado para el trabajo de campo .....                                  | 56        |
| 3.3       | Trabajo de campo: resultados de las mediciones de potencia en el área de incidencia .....      | 57        |
| 3.4       | Construcción y ajuste de los parámetros del modelo .....                                       | 58        |
| 3.4.1     | Aplicación de la ecuación de Lee en los puntos de la ruta de estudio                           | 59        |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 3.4.2     | Análisis de la potencia recibida (PR).....   | 69        |
| 3.4.3     | Puntos singulares: efectos de difracción y multipaso.....                                      | 70        |
| 3.4.4     | Análisis de la potencia efectiva radiada (ERP) .....   | 71        |
| 3.4.5     | Análisis de la pérdida de línea de vista ( $L_{los}$ ).....                                    | 72        |
| 3.4.6     | Análisis de la pérdida debida a edificios ( $L_b$ ) .....                                      | 74        |
| 3.5       | Validación del modelo.....   | 75        |
| 3.5.1     | Comparación de predicciones versus mediciones de campo .....                                   | 77        |
| 3.5.2     | Comparación del modelo obtenido con otros existentes.....                                      | 78        |
| <b>4.</b> | <b>DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA DIDÁCTICA.....</b>   | <b>81</b> |
| 4.1       | Antecedentes: estado actual de la enseñanza de Propagación y Comunicaciones Inalámbricas.....  | 82        |
| 4.2       | La aprehensión de conocimientos .....  | 83        |
| 4.2.1     | El aprendizaje basado en la experimentación.....   | 83        |
| 4.2.2     | La importancia de la experimentación.....  | 85        |
| 4.3       | Motivaciones para el desarrollo de una herramienta didáctica basada en la experimentación..... | 85        |
| 4.4       | Descripción de la herramienta.....   | 87        |
| 4.5       | Recursos usados para la construcción de la herramienta .....                                   | 92        |
| 4.5.1     | Procedimiento de predicción de Lee para microceldas.....                                       | 92        |
| 4.5.2     | Analizador espectral NARDA SRM 3000 .....  | 93        |
| 4.5.3     | MATLAB.....  | 94        |
| 4.5.4     | Otros recursos .....   | 94        |

|  |          |
|--|----------|
| <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b> | <b>1</b> |
| <b>APÉNDICES.....</b>                      | <b>2</b> |
| <b>APÉNDICE A.....</b>                     | <b>2</b> |
| <b>APÉNDICE B.....</b>                     | <b>2</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>                   | <b>2</b> |

## INDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1: Propagación con línea de vista.....  | 7  |
| Figura 2.1: Sistema no celular .....   | 20 |
| Figura 2.2: Sistema celular .....  | 21 |
| Figura 2.3: Modelamiento de celdas en un sistema celular .....   | 22 |
| Figura 2.4: Clasificación de las celdas celulares (macrocelas, microcelas y picoceladas).....              | 24 |
| Figura 2.5: Obstrucción de los edificios .....   | 28 |
| Figura 2.6: Ilustración del cálculo de la longitud total de obstrucción de manzanas con edificios (B)..... | 30 |
| Figura 2.7: Ejemplo de trazado de edificios y combinaciones de rutas.....                                  | 33 |
| Figura 2.8: Ejemplo de mapeo y digitalización de calles y cuadras .....                                    | 34 |
| Figura 2.9: Ilustración del concepto de longitud equivalente de obstrucción $B_{eq}$ .....                 | 35 |
| Figura 2.10: Mapa del área y las rutas de estudio en la ciudad de San Francisco, Ca, USA .....             | 38 |
| Figura 2.11: Curva empírica de pérdida debida a edificios ( $L_b$ vs B).....                               | 38 |
| Figura 2.12: Comparación del modelo de predicción con mediciones reales                                    | 39 |
| Figura 3.1: Área de Ingenierías del Campus Gustavo Galindo.....  | 42 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.2: Polarización Cruzada y Vertical de la antena .....                                  | 43 |
| Figura 3.3: Vista de los conectores de la antena .....  | 44 |
| Figura 3.4: Puntos escogidos para identificación de zonas de cobertura. ....                    | 46 |
| Figura 3.5: Medición espectral tomada en el sector X de cobertura. ....                         | 47 |
| Figura 3.6: Medición espectral tomada en el sector Y de cobertura. ....                         | 47 |
| Figura 3.7: Medición espectral tomada en el sector Z de cobertura. ....                         | 48 |
| Figura 3.8: Zonas de cobertura de la antena GSM en el ciclo básico.....                         | 48 |
| Figura 3.9: Área de estudio y puntos de medición. ....  | 51 |
| Figura 3.10: Bloque 1 FEPOL.....  | 52 |
| Figura 3.11: Bloque 2 FICT.....   | 53 |
| Figura 3.12: Bloque 3 FIEC .....  | 54 |
| Figura 3.13: Bloque M4 FIMCP y M5 ASOCIACIONES.....   | 55 |
| Figura 3.14: Potencia recibida promedio versus distancia.....                                   | 62 |
| Figura 3.15: Curva de evaluación de potencia efectiva radiada ERP .....                         | 63 |
| Figura 3.16: Curva empírica de pérdida de edificios del área de estudio $L_b$ vs $B_{eq}$ ..... | 68 |
| Figura 3.17: Curva de Potencia Recibida $P_r(A)$ versus distancia $d_A$ .....                   | 69 |
| Figura 3.18: Puntos singulares en la ruta de estudio .....                                      | 70 |
| Figura 3.19: $L_{los}$ versus distancia .....   | 73 |
| Figura 3.20: $L_b$ versus $B_{eq}$ .....  | 74 |
| Figura 3.21: Ubicación de los puntos de prueba del modelo .....                                 | 76 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.22: Comparación entre el modelo de Lee construido (curva de color rojo) y las mediciones de campo (curva de color azul) .....   | 78 |
| Figura 3.23: Comparación entre el modelo de Lee construido (curva de color rojo), el modelo Longley Rice (curva de color negro) y las mediciones de campo (curva de color azul)..... | 80 |
| Figura 4.1: Introducción de la práctica desarrollada .....   | 88 |
| Figura 4.2: Objetivos de la práctica.....  | 88 |
| Figura 4.3: Equipos y materiales usados .....  | 89 |
| Figura 4.4: Desarrollo de la práctica .....  | 89 |
| Figura 4.7: Plantilla de los valores de potencia medidos .....   | 92 |
| Figura 4.8: Analizador espectral NARDA SRM 3000 y su antena correspondiente .....  | 93 |
| Figura 4.9: Script programado en MATLAB para el procesamiento de datos de la práctica.....   | 94 |

## INDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla I: División del espectro electromagnético en bandas.....                                       | 5  |
| Tabla II: Datos de la antena GSM ubicada en la ESPOL.....  | 43 |
| Tabla III: Especificaciones mecánicas de la antena.....  | 44 |
| Tabla IV: Canales por sector y su frecuencia central.....  | 45 |
| Tabla V: Datos de M1 FEPOL.....  | 52 |
| Tabla VI: Datos de M2 FICT .....   | 53 |
| Tabla VII: Datos de M3 FIEC.....   | 54 |
| Tabla VIII: Datos de M4 FIMCP .....  | 56 |
| Tabla IX: Datos de M5 ASOCIACIONES .....   | 56 |
| Tabla X: Conversión de unidades.....   | 58 |
| Tabla XI: Mediciones de potencia recibida en dBm tomadas en la ruta de estudio.....                  | 61 |
| Tabla XII: Distancia y pérdida de línea de vista ( $L_{los}$ ).....                                  | 64 |
| Tabla XIII: Resumen de la aplicación de la ecuación del modelo de Lee en cada punto de estudio ..... | 65 |
| Tabla XIV: Puntos, distancias y sus correspondientes valores de $B_{eq}$ .....                       | 66 |
| Tabla XV: Valores relacionados de $B_{eq}$ y $L_b$ .....   | 67 |
| Tabla XVI: Predicción del modelo construido versus Medición.....                                     | 77 |

|  |    |
|--|----|
| Tabla XVII: Comparación entre el modelo de Lee construido, el modelo Longley Rice de prueba y las mediciones reales..... | 79 |
|--|----|

## ABREVIATURAS

|       |   |
|-------|---|
| WIMAX | Worldwide Interoperability for Microwave Access                               |
| GPS   | Global Positioning System   |
| ITU   | International Telecommunication Union   |
| GSM   | Global System Mobile  |
| CEPT  | Conférence Européenne des administrations des Postes et<br>Télécommunications |
| ISDN  | Integrated Services Digital Network   |
| FDD   | Frequency Division Duplex   |
| TDMA  | Time Division Multiple Access   |
| GMSK  | Gaussian Minimun-Shift Keying   |
| CDMA  | Code Division Multiple Access   |
| SIM   | Suscriber Identlfication Module   |
| PCS   | Personal Communications Services  |
| ACE   | Area Coverage Estimation  |
| ADMS  | Area Deployment of Mobile Systems   |
| ERP   | Effective Radiated Power  |
| BCCH  | Broadcast Control Channel   |
| CEM   | Campo Electromagnético  |

## INTRODUCCION

El presente trabajo consiste en el desarrollo de un modelo de propagación de potencia de una antena GSM ubicada en el campus de estudio de la ESPOL. El modelo está basado en la metodología de Lee para el desarrollo de modelos de desvanecimiento de potencia en ambientes exteriores. Aplicando esta metodología se obtiene como resultado una ecuación de predicción de potencia para cualquier punto en un área de estudio en particular y una curva característica del terreno, todo a partir de mediciones de potencia en dicha área.

El trabajo tiene exclusivamente aplicaciones didácticas, y el objetivo es que este sea usado en forma de práctica de laboratorio por los estudiantes de la materia Propagación que pertenece a la malla curricular de la carrera de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la ESPOL. Al momento esta materia se dicta en modalidad teórica y no existen actividades de experimentación que permitan a los estudiantes madurar y aprehender los conocimientos vistos en clase.

Este trabajo pretende aportar con una herramienta didáctica basada en el modelo construido que pueda ser usada por estudiantes y profesores para complementar los conocimientos de propagación y desvanecimiento de potencia dictados en clase.

# **CAPÍTULO 1**

## **1. GENERALIDADES DEL MODELAMIENTO DE PROPAGACIÓN DE SEÑALES**

La teoría electromagnética es la base fundamental de los principios que explican la propagación de las ondas electromagnéticas, las propiedades de las componentes ortogonales variantes en el tiempo, el campo eléctrico y magnético, dan forma a los modelos matemáticos que muestran el comportamiento de una señal. Este capítulo presenta los fundamentos básicos para comprender las componentes de las ondas electromagnéticas, su comportamiento al aire libre y los efectos que causan diversos tipos de obstáculos, así como modelos básicos que explican matemáticamente el fenómeno de propagación.

## 1.1 El concepto de ondas electromagnéticas

A finales del siglo XIX, Heinrich Rudolf Hertz descubrió que ondas invisibles originadas por chispas eléctricas eran capaces de transportar “influencia” o, lo que llamamos hoy día, información a través del aire. Este fue el descubrimiento de las ondas electromagnéticas, cuyo estudio se ha extendido a lo largo de los años y que hoy son la base de todos los sistemas de comunicación inalámbricos.

### 1.1.1 Campo Eléctrico

El campo eléctrico es generado por una carga eléctrica y se define como el vector de fuerza ejercido sobre una unidad de carga, se representa con el símbolo E. El campo eléctrico depende de la densidad de flujo eléctrico y la permitividad del medio ( $\epsilon$ ). Su unidad es V/m (voltios/metros) o su equivalente N/C (Newtons/Coulombs) (1).

$$\bar{D} = \epsilon \cdot \bar{E} \quad (1.1)$$

La permitividad es una propiedad asignada a los elementos dieléctricos, y es la habilidad de un material de polarizarse en respuesta a un campo eléctrico aplicado. Es expresada como un múltiplo de la permitividad en el espacio libre. Este múltiplo se llama permitividad relativa o constante dieléctrica del material.

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_o \quad (1.2)$$

### 1.1.2 Campo Magnético

El campo magnético es generado por flujos de corriente eléctrica o por materiales magnéticos, tiene fuerza y dirección, por lo que se denota con un vector,  $B$ . La fuerza del campo magnético es denotada por la densidad de flujo magnético ( $H$ ) y por la permeabilidad del medio ( $\mu$ ). La unidad para la fuerza del campo magnético es A/m (Amperes/metros) y la unidad de la densidad de flujo magnético es Wb/m<sup>2</sup> o Teslas.

El campo magnético y el flujo magnético están relacionados linealmente por la permeabilidad del material (2).

$$\bar{B} = \mu \cdot \bar{H} \quad (1.3)$$

La permeabilidad es la capacidad de un material para atraer y hacer pasar a través suyo los campos magnéticos. La unidad de la permeabilidad son los H/m (Henrios/metros). La permeabilidad de un medio es resultado de la relación entre la permeabilidad del espacio libre y la permeabilidad relativa característica de cada material.

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_o \quad (1.4)$$

### 1.1.3 Ondas Electromagnéticas

La teoría de propagación de ondas electromagnéticas se fundamenta en las ecuaciones de Maxwell, las cuales demuestran que campo eléctrico que varía en el tiempo produce un campo magnético y viceversa. Una onda electromagnética tiene forma esférica, pero a una

distancia suficiente de la fuente, dicha onda se pueden tratar como plana y uniforme. La relación entre campo eléctrico y campo magnético variantes en el tiempo para ondas planas uniformes se expresa por:

$$\nabla \bar{E} = -\mu \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} \quad (1.5)$$

$$\nabla \bar{H} = -\varepsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \quad (1.6)$$

La velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas es determinada por las ecuaciones de Maxwell y es función de la permitividad y la permeabilidad del medio.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \quad (1.7)$$

Si el medio por el cual la onda viaja es el espacio libre, la velocidad de propagación es equivalente a la velocidad de la luz  $c$ .

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = c \quad (1.8)$$

## 1.2 El espectro electromagnético

Se denomina espectro electromagnético al arreglo ordenado de todo el rango de energía electromagnética que puede ser emitida. El espectro electromagnético está definido por la frecuencia y en términos de esta, el espectro comienza en casi cero y se extiende hasta el infinito. En la tabla 1 se muestra diferentes porciones del espectro denominadas

bandas con sus respectivas frecuencias nominales y sus aplicaciones en el campo de las telecomunicaciones (3).

| ESPECTRO DE FRECUENCIA           |                   |  |
|----------------------------------|-------------------|--|
| Banda                            | Frecuencia        | Aplicaciones   |
| Audible                          | 20 - 20 KHz       | Acústica   |
| Frecuencias Extremadamente Bajas | 30 - 300 Hz       | Comunicaciones submarinas  |
| Frecuencias Ultra Bajas          | 300 Hz - 3KHz     | No se aplica   |
| Frecuencias Muy Bajas            | 3 K - 30 KHz      | Navegación, clima  |
| Frecuencias Bajas                | 30 K - 300 KHz    | Navegación, comunicaciones marítimas, sistemas de tiempo y sistemas de información del clima |
| Frecuencias Medias               | 300 K - 3 MHz     | Radio AM, radio móvil  |
| Frecuencias Altas                | 3 M - 30 MHz      | Banda ciudadana, radio de onda corta, radio móvil  |
| Frecuencias Muy Altas            | 30 MHz - 300 MHz  | Radio amateur, TV VHF, radio FM, satélite móvil  |
| Frecuencias Ultra Altas          | 300 MHz - 3 GHz   | Microondas, satélite, TV UHF, telefonía celular y PCS, redes de área local inalámbricas      |
| Frecuencias Super Altas          | 3 GHz - 30 GHz    | Microondas, satélite, redes de área local inalámbricas                                       |
| Frecuencias Extremadamente Altas | 30 GHz - 300 GHz  | Microondas, satélite, radiolocalización  |
| Luz Infrarroja                   | 300 GHz - 400 THz | Redes de área local inalámbricas, fibra óptica   |
| Luz Visible                      | 400 THz - 1 PHz   | No se aplica   |
| Luz Ultravioleta                 | 1 PHz - 30 PHz    | No se aplica   |
| Rayos X                          | 30 PHz - 30 EHz   | No se aplica   |
| Rayos gamma y cósmicos           | > 30 EHz          | No se aplica   |

**Tabla I:** División del espectro electromagnético en bandas.

### 1.3 Propagación de ondas electromagnéticas

En los inicios de las comunicaciones inalámbricas, los procesos de modelamiento de propagación se basaban en conceptos y condiciones básicas como la distancia entre los puntos de comunicación y la influencia de la curvatura de la tierra. Era importante que entre los puntos comunicados exista línea de vista. A medida que se

incrementan las necesidades de comunicación, se presentan nuevos retos como obstrucciones en el camino y comunicaciones a mayor distancia, que imposibilitan la línea de vista.

### **1.3.1 Propagación de ondas electromagnéticas en condiciones de línea de vista**

En espacio libre, las ondas electromagnéticas son modeladas como si se propagaran en todas direcciones desde la fuente, formando una esfera. A medida que se aleja de la fuente, la onda esférica puede tomarse como una onda plana, lo cual facilita su estudio. La dirección de propagación de la onda plana en cualquier punto es dado por el producto cruz entre el campo eléctrico  $E$  y el campo magnético  $H$  en ese punto.

$$\bar{P} = \bar{E} \times \bar{H} \quad (1.9)$$

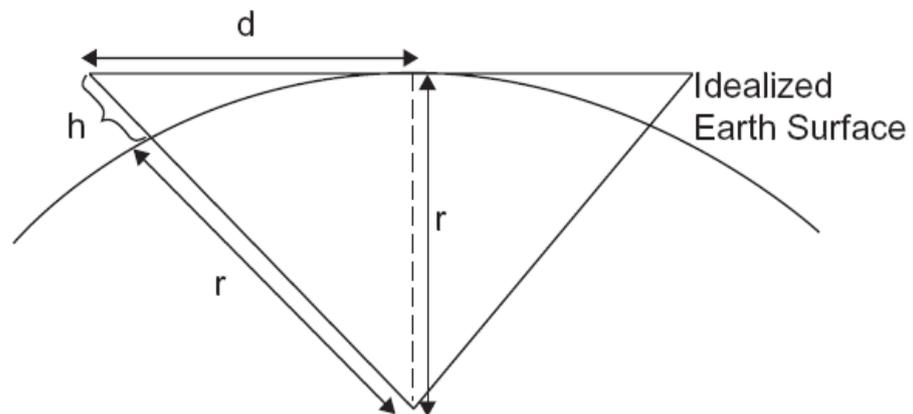
Este producto cruz es llamado vector Poynting. La densidad de potencia en una esfera imaginaria alrededor de la fuente de emisión puede ser expresada como:

$$S = \frac{P}{4\pi d^2} \quad (1.10)$$

Donde  $d$  es el diámetro de la esfera imaginaria,  $P$  es la potencia de la onda electromagnética a la salida del emisor, y  $S$  es la densidad de potencia de la esfera en Watts/m<sup>2</sup>. Se puede observar que la densidad

de potencia es inversamente proporcional al diámetro al cuadrado, así también la potencia de recepción en ese punto.

Cuando se produce la propagación en condiciones de línea de vista, es necesario considerar la curvatura de la tierra (figura 1.1), la cual es una limitación fundamental en este análisis. La forma más simple es aproximar la tierra a una esfera con radio equivalente al radio ecuatorial del planeta.



**Figura 1.1:** Propagación con línea de vista.

$$d \cong \sqrt{2rh} \quad (1.11)$$

Donde  $d$  es la distancia hacia el "horizonte" (en millas) y  $h$  es la altura de la antena (en pies). Este es un método rápido para determinar la distancia máxima para cada antena, y la suma de éstas es la distancia máxima entre las dos (4).

### **1.3.2 Propagación de ondas electromagnéticas sin condiciones de línea de vista**

Hay muchas otras formas de propagación de ondas electromagnéticas además de estrictamente en condiciones de línea de vista. Los mecanismos de propagación sin condiciones de línea de vista varían en torno a la frecuencia de operación. Ejemplos de propagación indirecta son servicios de telefonía celular, servicios de Internet y transmisión de datos de cobertura amplia (WIMAX), y comunicaciones militares. Puede o no haber línea de vista para estos sistemas, pero propiedades como la difracción, refracción y reflejos multicamino son los modos de propagación predominantes. Difracción es el fenómeno de las ondas electromagnéticas de “doblar” al filo de un obstáculo, dando como resultado que la sombra del obstáculo tenga cobertura parcial. Refracción es el efecto de desfase debido a que la onda electromagnética pasa por medios de distintas propiedades. El efecto de multicamino es cuando la onda se refleja en diferentes objetos y se produce que en el punto de recepción se obtenga la señal transmitida con varias copias con diferente fase y amplitud. La eficacia de la propagación indirecta depende del límite del nivel mínimo de comunicación y la fuerza de las señales difractadas o reflejadas.

Los efectos de propagación “sobre el horizonte” son brevemente clasificados como ondas al cielo, ondas troposfericas y ondas terrestres.

Las ondas al cielo se basan en la refracción/reflejo ionosférica. Las ondas troposféricas son aquellas que se propagan y permanecen en la atmósfera baja. Las ondas terrestres incluyen las ondas superficiales que siguen el contorno de la tierra, y las ondas espaciales, que abarca a la propagación con línea de vista, y la propagación de rebote (5).

### 1.3.3 El concepto de pérdida de camino (path loss)

El concepto de pérdida de camino o pérdida de paso es de principal interés en torno al estudio de propagación de radiofrecuencia (RF). Se refiere al efecto de pérdida de potencia producido por el espacio libre, pérdidas atmosféricas producidas por gases como la absorción del vapor, por precipitaciones, pérdidas producidas por señales multicamino, y otros efectos producto de la frecuencia y del entorno de transmisión.

El medio de la propagación RF es el espacio libre, cuya pérdida de paso puede ser calculada a través de la ecuación de pérdida de paso del espacio libre  $L_o$ , la cual es expresada en dB:

$$L_o(db) = -20 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right) \quad (1.12)$$

El concepto de pérdida de camino es de suma importancia en el planeamiento de transmisiones RF, su análisis da como resultado el área de cobertura de una antena omnidireccional o de una antena

sectorial, y la distancia máxima en un enlace punto a punto. Su comportamiento varía dependiendo de la frecuencia de trabajo, y del entorno en el cual se realiza la transmisión. A pesar de que existen estudios generales que modelan su comportamiento en función de la frecuencia y del entorno, para mayor precisión y resultados más cercanos al real comportamiento, se debe hacer un análisis puntual de las fuentes de pérdida de potencia para cada sector de incidencia.

#### **1.4 Esquemas de modelamiento de propagación a ras de tierra**

Un gran número de aplicaciones de telecomunicaciones requieren esquemas de transmisión-recepción de ondas electromagnéticas que se propagan muy cerca de la superficie de la tierra, por ejemplo: sistemas celulares, estaciones de radio, televisión abierta, sistemas de posicionamiento global (GPS), etc. La propagación de ondas electromagnéticas a ras de tierra se ve afectada por diversos factores que provocan pérdidas de camino que pueden ser atribuidas a distintos fenómenos como la difracción, reflexión, absorción o scattering provocados por obstáculos de la superficie terrestre como vegetación, edificios e irregularidad del terreno.

A continuación se muestran algunos de los más famosos esquemas de modelamiento de propagación a ras de tierra, que predicen la pérdida

que sufre una onda transmitida cuando esta debe atravesar obstáculos que se encuentran en su camino de propagación (6).

### 1.4.1 Esquemas de modelamiento de vegetación

Muchas de las comunicaciones a nivel terrestre requieren señales que atraviesen vegetación en ciertos puntos. En esta sección se presenta una variedad de esquemas de modelamiento de predicción de pérdida de camino adicional debido a la vegetación.

#### 1.4.1.1 Modelo Weissberger

El modelo de decaimiento exponencial de Weissberger está dado por:

$$L(db) = \begin{cases} 1.33F^{0.284}d_f^{0.588}, & 14 < d_f \leq 400m \\ 0.45F^{0.284}d_f, & 0 < d_f \leq 14m \end{cases} \quad (1.13)$$

Donde  $d_f$  es la profundidad de la vegetación en el camino de línea de vista en metros y  $F$  es la frecuencia en GHz.

La atenuación predicha por el modelo de Weissberger debe ser sumada a la atenuación del espacio libre y cualquier otra atenuación debida a otros obstáculos diferentes a la vegetación. Este modelo aplica para árboles densos y secos. Blaunstein (1) indica que el modelo es válido en el rango de 250 MHz a 95 GHz.

### 1.4.1.2 Modelo Early ITU

El modelo de vegetación Early ITU fue aceptado por el Comité consultivo Internacional de Radio (CCIR), la entidad predecesora de la ITU, el ente rector de las telecomunicaciones en la actualidad. A pesar que el modelo ha sido modificado por una nueva recomendación expedida por la ITU, el original Early ITU aún sigue siendo un esquema fácil de aplicar que provee resultados muy convincentes.

El modelo está dado por:

$$L(db) = 0.2F^{0.3}d_f^{0.6} \quad (1.14)$$

Donde  $d_f$  es la profundidad de la vegetación en el camino de línea de vista en metros y  $F$  es la frecuencia en MHz.

### 1.4.2 Esquemas de modelamiento de terreno

Para la propagación a ras de tierra, las características particulares del terreno afectan significativamente a las ondas electromagnéticas. El terreno se define como la geografía natural de la tierra en la cual la propagación se está llevando a cabo (2). Cabe recalcar que esta definición de terreno, no incluye la vegetación ni las construcciones hechas por el hombre. Cuando el terreno es muy plano solo los efectos provocados por la difracción y las reflexiones de multipaso deben ser analizados, siempre y cuando se esté cerca de la distancia de

horizonte. Por otro lado, si el terreno es variable, se deben considerar los efectos provocados por la difracción, bloqueo, sombra, y multipaso difuso, aún a distancias moderadas. El propósito del modelamiento de terreno es encontrar una tendencia de la pérdida de paso como función de la distancia y de la variedad del terreno.

#### 1.4.2.1 Modelo Egli

El modelo Egli está basado en datos empíricos y es muy popular, particularmente para un análisis preliminar. El modelo Egli para la media de pérdida de camino sobre terrenos irregulares es el siguiente:

$$L_{50} = G_b G_m \left[ \frac{h_b h_m}{d^2} \right]^2 \beta \quad (1.15)$$

Donde  $G_b$  es la ganancia de la antena base,  $G_m$  es la ganancia de la antena móvil,  $h_b$  es la altura de la antena base,  $h_m$  es la altura de la antena móvil,  $d$  es la distancia de propagación y  $\beta = (40/f)^2$ ,  $f$  es la frecuencia en MHz.

Es de notar que el modelo Egli provee el valor total de pérdida de camino, es decir, la pérdida de espacio libre sumada a la pérdida debida al terreno, mientras que los esquemas de modelamiento de vegetación proveen solo la pérdida debida al efecto de los árboles.

Aplicar la ecuación de Egli (1.15) constituye una buena alternativa para el modelamiento de terrenos, al menos en un análisis preliminar,

aunque dada su generalidad, no se debería esperar resultados muy precisos en todas las situaciones.

#### **1.4.2.2 Modelo Longley-Rice**

Longley-Rice es un modelo muy detallado que fue desarrollado en los años 60's y ha sido actualizado a través de los años. El modelo se basa en mediciones tomadas entre 40 MHz y 100 GHz, en rangos de 1 a 2000 km considerando altura de las antenas entre 0.5 y 300 m. El modelo toma en cuenta el terreno, el clima, las condiciones del subsuelo, y la curvatura de la tierra para realizar una predicción. Una descripción detallada del modelo y su funcionamiento se encuentran en el libro de Blaunstein (3). Debido al nivel de detalle del modelo, se aplica generalmente en programas computacionales, en donde se ingresan los parámetros requeridos y computa la predicción de pérdida de paso. El modelo Longley-Rice tiene dos modos: modo punto a punto y modo área. El modo punto a punto hace uso de datos detallados y características del terreno para predecir la pérdida de camino, mientras que el modo área usa información general acerca del terreno para hacer la predicción.

### 1.4.3 Esquemas de modelamiento de áreas con edificios

La propagación de ondas electromagnéticas en áreas con edificios es de particular interés, especialmente para la telefonía móvil. En este tipo de ambientes la propagación depende de la frecuencia de operación de la antena, geometría, materiales, altura y densidad de los edificios. Los esquemas de modelamiento que se discutirán a continuación son: Young, Okumura, Hata y Lee.

#### 1.4.3.1 Modelo Young

El modelo de Young fue creado en la ciudad de New York en 1952 y cubre el rango de frecuencias de 150 a 3700 MHz. La ecuación del modelo de Young es la siguiente:

$$L_{50} = G_b G_m \left[ \frac{h_b h_m}{d^2} \right]^2 \beta \quad (1.16)$$

Donde  $\beta$  es llamado factor de ruido y no es el mismo  $\beta$  usado en el modelo Egli. Este  $\beta$  es también distinto al  $\beta$  algunas veces usado para el volumen de ocupación de edificios sobre una determinada área.

#### 1.4.3.2 Modelo Okumura

El modelo de Okumura está basado en mediciones tomadas en la ciudad de Tokyo en 1960 entre 200 y 1920 MHz. Este modelo no es

representativo para las modernas ciudades de la actualidad, pero aún así es muy usado para realizar estudios preliminares. El modelo es empírico pues se basa estrictamente en mediciones, a partir de las cuáles se construyeron curvas que se denominan curvas de Okumura. A partir de las curvas de Okumura y aplicando varios factores de corrección, se realiza la predicción de la pérdida de camino para el área estudiada.

El modelo de Okumura, clasifica el área de estudio en tres categorías: área abierta, área suburbana y área urbana. El modelo de área abierta representa locaciones con espacio abierto, sin árboles o edificaciones en el camino y claros de tierra de 300 o 400 metros como en las zonas rurales. El modelo de área suburbana representa áreas con casas y árboles, pero no muy congestionadas. El modelo de área urbana representa una ciudad construida o grandes centros con edificios altos o casas de dos o más pisos.

El modelo de Okumura usa el área urbana como base, se aplican varios factores de corrección para la conversión a las restantes clasificaciones de área. La ecuación de Okumura para la media de pérdida de camino es la siguiente:

$$L_{50}(db) = L_{FSL} + A_{mu} - H_{tu} - H_{ru} \quad (1.17)$$

Donde  $L_{FSL}$  es la pérdida de espacio libre para la distancia y frecuencia dadas,  $A_{mu}$  es la atenuación media relativa al espacio libre,  $H_{tu}$  es el

factor de ganancia de altura de la estación base y  $H_{ru}$  es el factor de ganancia de altura del móvil. Las curvas de Okumura se muestran como anexos.

### 1.4.3.3 Modelo Hata

El modelo Hata, también llamado Okumura-Hata, es una formulación empírica que incorpora en ecuaciones la información gráfica del modelo de Okumura. Hay tres diferentes fórmulas para el modelo de Hata, para áreas urbanas, áreas suburbanas y áreas abiertas. Para áreas urbanas la fórmula es la siguiente:

$$L_{50}(db) = 69.55 + 26.16\log(f_c) - 13.82\log(h_t) - a(h_r) + [44.9 - 6.55\log(h_t)]\log(d) \quad (1.18)$$

Donde:

$$150 < f_c < 1500, f_c \text{ en MHz}$$

$$30 < h_1 < 200, h_1 \text{ en m}$$

$$1 < d < 20, d \text{ en km}$$

y  $a(h_r)$  es el factor de corrección de la altura del móvil. Para pequeñas y medianas ciudades:

$$a(h_r) = (1.1\log(f_c) - 0.7)h_r - (1.56\log(f_c) - 0.8), 1 \leq h_r \leq 10m \quad (1.19)$$

y para ciudades grandes:

$$a(h_r) = \begin{cases} 8.29(\log(1.54h_r))^2 - 1.1, f_c \leq 200MHz \\ 3.2(\log(11.57h_r))^2 - 4.97, f_c \leq 400MHz \end{cases} \quad (1.20)$$

Para áreas suburbanas la fórmula es la siguiente:

$$L_{50}(db) = L_{50}(urbana) - 4.78(\log(f_c))^2 + 18.33\log(f_c) - 40.94 \quad (1.21)$$

Para áreas abiertas la fórmula es la siguiente:

$$L_{50}(db) = L_{50}(urbana) - 2\left(\log\left(\frac{f_c}{28}\right)\right)^2 - 5.4 \quad (1.22)$$

La formulación de Hata hace el modelo de Okumura más fácil de usar, y es usualmente la única forma como este último se aplica.

# CAPÍTULO 2

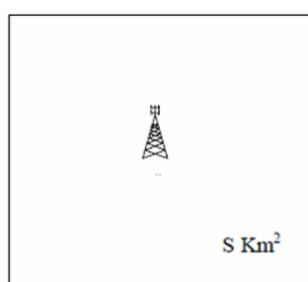
## 2. PRINCIPIOS DE MODELAMIENTO DE PROPAGACIÓN DE SEÑALES DE LEE

En este capítulo se introducen conceptos básicos de los sistemas celulares como las celdas y el reuso de frecuencias. Más adelante se presenta toda la teoría referente al modelamiento microcelular de Lee que es la herramienta principal para el desarrollo de este trabajo. Finalmente se muestra un ejemplo de la aplicación de la metodología de Lee para el desarrollo de modelos de propagación, los resultados corresponden a una microcelda urbana ubicada en la ciudad de San Francisco, California, Estados Unidos y nos da una idea de cómo debería lucir nuestro modelo al final del proceso de construcción del mismo.

## 2.1 El Concepto de sistema celular

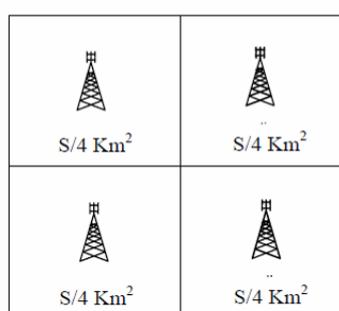
El concepto de sistemas celulares surge en los laboratorios de Bell Telephone Engineers de AT&T en 1947, donde se plantea romper las grandes áreas de cobertura de transmisiones radio móviles, en áreas más pequeñas que permitieran la reutilización de recursos (principalmente el espectro electromagnético). A partir de esta idea AT&T empezó a desarrollar el sistema y fue en 1977 cuando estuvo construido el primer prototipo que se puso a prueba en Chicago en 1978. Sin embargo fue Japón quién implementó el primer sistema celular comercial en Tokio en 1978 seguido por los países escandinavos en 1981. Finalmente en 1984 Estados Unidos vio nacer comercialmente los sistemas celulares, 37 años después de haber propuesto su concepto y estructura.

Para comprender el concepto de un sistema celular revisemos a continuación el concepto de un sistema de transmisión tradicional no celular. Un sistema de transmisión no celular posee un transmisor de gran potencia que abraza una gran área de cobertura.



**Figura 2.1:** Sistema no celular

Un sistema celular es un sistema de radio que posee un gran número de transmisores de baja potencia a lo largo y ancho de una gran área de cobertura dividiéndola en pequeñas áreas de cobertura llamadas celdas. Aproximadamente en el centro de cada celda se encuentra el transmisor de baja potencia conocido como estación base (BS por sus siglas en inglés).

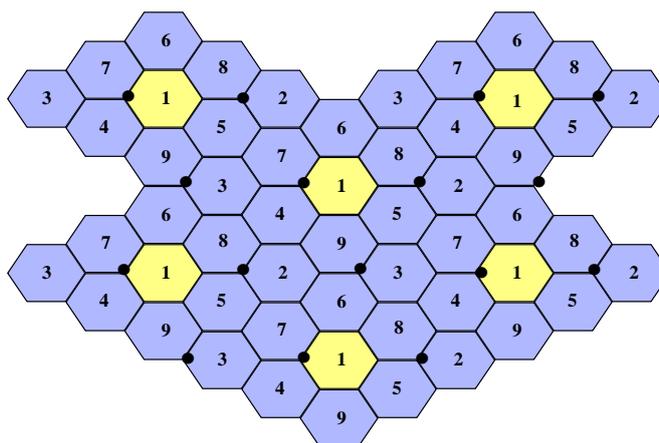


**Figura 2.2:** Sistema celular

De igual forma el total del espectro electromagnético a utilizar se divide en pequeñas porciones o bandas de frecuencia y a cada celda se le asigna una banda para su operación. Al dividir el área de cobertura en celdas, o mini áreas de cobertura, cada banda de frecuencia puede ser reutilizada en celdas no adyacentes. El área de cobertura de cada celda (también llamado radio de cobertura de celda) está determinada por varios factores como la potencia de salida del transmisor, la banda de frecuencia usada, la topografía de los alrededores y el tráfico de usuarios en la celda.

### 2.1.1 El concepto de re-uso de frecuencias

El mayor problema de cualquier sistema de comunicaciones inalámbricas es la utilización del espectro electromagnético, este nunca es suficiente. El objetivo principal de dividir el área de cobertura de un sistema de comunicaciones en celdas es tener la posibilidad de reusar las frecuencias, o lo que es lo mismo, reusar el ancho de banda de operación del sistema. El reuso de frecuencias permite a un mismo canal de comunicación (habitualmente caracterizado por una frecuencia central y un ancho de banda) ser usado simultáneamente en múltiples transmisores del un sistema, siempre y cuando, los transmisores estén lo suficientemente separados para evitar interferencia. Mientras más grande sea la distancia de reuso, y mientras más bajo sea el nivel de potencia usada en células compartiendo un canal común, menor será la probabilidad de que exista interferencia en la comunicación.



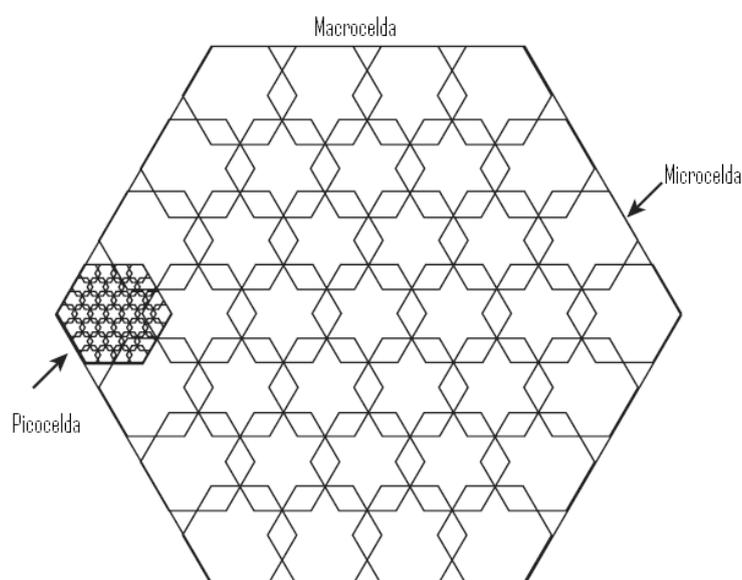
**Figura 2.3:** Modelamiento de celdas en un sistema celular

En la figura 2.1, se ilustra el concepto de reuso de frecuencias, donde las celdas con el mismo número utilizan el mismo grupo de canales y en consecuencia frecuencias. Estos canales no pueden ser utilizados en ninguna otra celda que no esté asignada con el mismo número para evitar interferencia. La forma hexagonal de cada celda es conceptual y se basa en una abstracción simple de la cobertura, pero ha sido adoptado para el análisis, debido a que el hexágono permite un estudio fácil de los sistemas celulares. La cobertura real de una celda se conoce como huella (footprint) y se determina tomando como base mediciones de campo o modelos de predicción de propagación.

### **2.1.2 Las celdas celulares: micro y macro celdas**

Aplicando el concepto de celda referido en la sección 2.1, las celdas celulares son un área geográfica, relativamente pequeña, de cobertura de servicio de telefonía celular determinada por factores como la banda de frecuencia, el nivel de potencia, la topografía de los alrededores, etc. El tamaño de una celda está definido por su radio de cobertura, y de acuerdo a este parámetro, las celdas pueden dividirse en macroceldas y microceldas. Algunos autores hacen una división más grande y añaden las picoceldas y las femtoceldas, ambas refiriéndose a áreas de cobertura extremadamente pequeñas como un piso de garaje en el caso de las picoceldas, o casas y oficinas para el caso de las

femtoceldas. De forma general, la caracterización de las celdas comúnmente usada es la primera. Las macroceldas celulares cubren áreas relativamente grandes y pueden cubrir áreas metropolitanas enteras. Su radio de cobertura es siempre mayor a 1 km y puede llegar hasta 6 km. Las microceldas cubren áreas más pequeñas y generalmente su radio de cobertura es siempre menor a 1 km.



**Figura 2.4:** Clasificación de las celdas celulares (macroceldas, microceldas y picoceldas)

### 2.1.3 Descripción del funcionamiento de la tecnología GSM

El Sistema Global de Comunicaciones Móviles (GSM), es un estándar europeo para comunicaciones radio celulares desarrollado por una comisión especializada de la Confederación Europea de

Telecomunicaciones (CEPT). El estándar GSM fue adoptado por la CEPT en 1987 y fue usado comercialmente en 1991. Esta tecnología opera en las bandas de frecuencia de 800 y 900 MHz, es compatible con ISDN y utiliza 124 portadoras o canales de 200 KHz cada uno. Para implementar la comunicación bidireccional (transmisor – receptor móvil) usa FDD o canales separados en frecuencia, usando la banda de 935 a 960 MHz para transmisiones de bajada (downlink) y la banda de 890 a 915 MHz para transmisiones de subida (uplink). Se usa TDMA para implementar 8 time slots para cada portadora. Utiliza modulación GMSK que provee una tasa de muestreo de señales de 270.833 Kbps por portadora y una tasa máxima de transmisión de 33.8 Kbps por canal. GSM emplea comúnmente un plan de reuso de cuatro celdas, y divide cada celda en 12 sectores. Usa además saltos de frecuencia (frequency hopping) y “time spots hopping”, usado también en sistemas CDMA. GSM ofrece seguridad adicional empleando un modulo de identificación de cliente (SIM). El SIM se inserta en una ranura del receptor móvil del cliente y contiene datos del usuario y una descripción de la portadora celular que provee el servicio GSM. El SIM GSM puede ser usado en cualquier equipo receptor, por lo que se garantiza una completa movilidad entre los países y empresas carriers que soportan esta tecnología. Actualmente GSM opera en una gran cantidad de países a nivel mundial y es predominante en Europa, África y gran parte de Asia.

En Estados Unidos se usa una tecnología llamada PCS que está basada en GSM pero que opera en banda de 1900 MHz.

## **2.2 Modelo microcelular de Lee**

El modelo microcelular de Lee es un modelo de predicción de propagación de potencia muy usado en ambientes urbanos donde existen celdas celulares con un radio de cobertura menor a 1 kilómetro (microceldas).

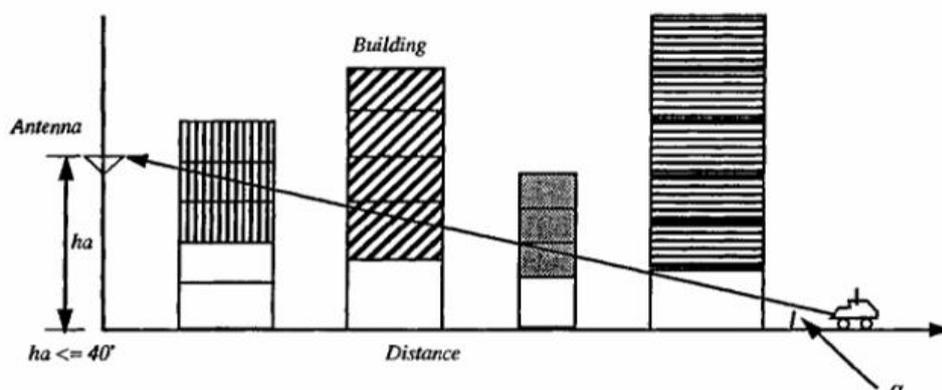
Los edificios que se encuentran en un ambiente urbano afectan directamente a la potencia de la señal recibida medida en un receptor móvil dentro de una microcelda celular. El factor de pérdida debida a los edificios debe ser considerado como parte de la pérdida de camino. Si bien la potencia de la señal recibida en un receptor móvil proviene de las ondas producto de la reflexión de multipaso y no de las ondas que atraviesan dichos edificios, existe una correlación entre el número de bloques o manzanas con edificios y la atenuación de la señal a lo largo del camino de propagación. Entre más grande sea el número de edificios o el tamaño de ellos en un área de propagación, mayor será la atenuación que sufrirá la potencia de una señal al pasar por esta área. Es necesario aclarar que el modelo es una metodología, no una fórmula. Este modelo provee resultados rápidos y bastante precisos con respecto a mediciones reales.

### **2.2.1 Antecedentes históricos**

El modelo de Lee fue desarrollado en 1977 y fue implementado a nivel de software por Bell Lab. de AT&T. El software fue llamado ACE, luego fue lanzada una versión posterior llamada ADMS, que fue usada por Bell Lab. para la implementación de la primera generación de sistemas celulares en Estados Unidos a principios de los años 80. Este modelo fue también implementado a nivel de software por PacTel y AirTouch en los años 80 y fue llamado Pheonex. Phoenex fue lanzado en Estados Unidos, Europa, Korea y Japón con gran éxito entre las compañías que estaban implementando sistemas celulares en estos países. Este modelo fue enseñado como un pequeño curso en la universidad Goerge Washington en Estados Unidos entre 1982 y 1998.

### **2.2.2 Generalidades y parámetros del modelo microcelular**

El modelo microcelular de Lee fue desarrollado para microceldas en ambientes urbanos, en donde los edificios de los alrededores tienen una directa relación con la atenuación de potencia de una señal inalámbrica. La figura 2.5 ilustra este concepto.



**Figura 2.5:** Obstrucción de los edificios

El modelo propone una fórmula de predicción de potencia e incluye una metodología para analizar detalladamente la obstrucción debida a edificios con la ayuda de curvas empíricas basadas en mediciones e incorporando conceptos como la ocupación de manzanas, densidad de edificios en las manzanas, distancia de ocupación y distancia de ocupación equivalente. Todos estos conceptos serán explicados más adelante en este capítulo.

Además de la obstrucción de los edificios, el modelo incorpora al análisis parámetros como la potencia de salida de la antena y cuantifica las pérdidas debidas al alejamiento de línea de vista.

### 2.2.3 Ecuación de Lee para microceldas

La fórmula general de predicción del modelo microcelular de Lee es la siguiente (todas las potencias se expresan en unidades de dBm):

$$P_r(A) = P_t - L_{los}(d_A, h_1) - L_b(B) \quad (2.1)$$

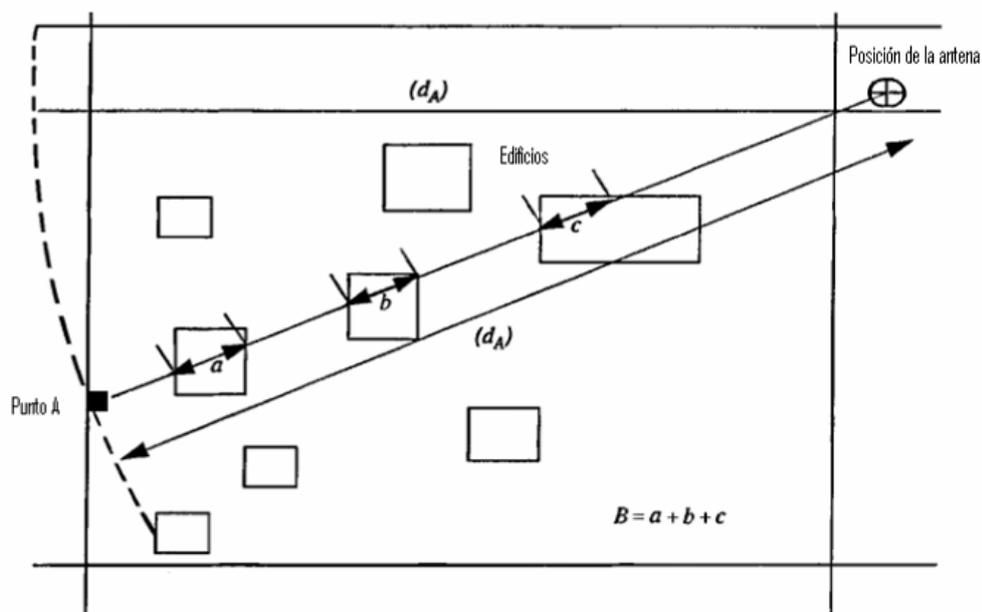
En donde  $P(A)$  es la potencia recibida en un punto "A" cualquiera de estudio,  $P_t$  es la potencia transmitida por la antena o también llamada ERP.  $L_{los}(d_A, h_1)$  es la pérdida de línea de vista a una distancia  $d_A$  con una altura de la antena de  $h_1$ . El valor de  $L_{los}(d_A, h_1)$  puede ser encontrado usando la siguiente ecuación:

$$L_{los} = \begin{cases} 20 \log \frac{4\pi d_A}{\lambda}, & d_A \leq D_f \\ 20 \log \frac{4\pi D_f}{\lambda} + \gamma \log \frac{d_A}{D_f}, & d_A \geq D_f \end{cases} \quad (2.2)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la señal base analizada y  $D_f$  es la distancia de la primera zonal de Fresnel y es equivalente a:

$$D_f = \frac{4h_1 h_2}{\lambda} \quad (2.3)$$

El último parámetro de la ecuación es  $L_b$  que representa la pérdida debida a las manzanas de edificios. El valor de  $L_b$  se obtiene calculando primero la suma de las longitudes de los edificios entre la posición de la antena y un punto A cualquiera de estudio, tal como se muestra en la figura 2.6.



**Figura 2.6:** Ilustración del cálculo de la longitud total de obstrucción de manzanas con edificios ( $B$ )

El total de la longitud de obstrucción de las manzanas con edificios es  $B = a + b + c$ . Luego se obtiene  $L_b$  evaluando el valor  $B$  en la curva empírica de pérdida de edificios del modelo ( $L_b$  vs.  $B$ ). Cabe aclarar que la curva empírica  $L_b$  vs.  $B$  es una curva particular para cada zona de estudio y debe ser determinada previo a la aplicación de la ecuación de predicción. La aplicación del modelo incluye una metodología para la obtención de curvas empíricas a base de mediciones y análisis de la configuración de manzanas y edificios de la zona de estudio. En muchas ocasiones una zona de estudio puede tener una topología similar a otra que haya sido modelada previamente, en estos casos es posible tomar como referencia la curva empírica de la zona estudiada y

aplicarla a la zona similar. Esto significa un gran ahorro de tiempo (no habría necesidad de obtener la curva empírica), pero condiciona la exactitud de los resultados. El objetivo de esta tesis es construir el modelo de propagación en su totalidad, es por esto que, en el capítulo 3 se presenta el análisis y la metodología utilizada para la obtención de la curva empírica de la zona de estudio escogida.

### **2.3 Procedimiento de evaluación del modelo microcelular de Lee**

Debido a la complejidad de los modelos microcelulares para ambientes urbanos, el modelo de Lee propone un procedimiento simple de predicción y evaluación de potencia en los puntos de dicho ambiente, el cual tiene como base la digitalización de las calles y la especificación de los bloques o cuadras de edificios y sus respectivas áreas de incidencia. Este procedimiento es herramienta fundamental para la utilización del modelo de Lee, facilitando el estudio de propagación. Además es base principal para la elaboración y desarrollo de las curvas de pérdida de paso en diferentes tipos de ambientes.

### 2.3.1 Generalidades del procedimiento

El procedimiento de predicción y evaluación del modelo de Lee es el siguiente:

1. Digitalizar las calles.
2. Identificar los bloques o cuadras.
3. Calcular el porcentaje de ocupación para cada bloque o cuadra.
4. Para cada punto de estudio obtener la pérdida de paso en espacio libre  $L_{los}$  (ecuación 2.2).
5. Identificar los bloques o cuadras incidentes entre el punto donde está ubicada la antena y los diferentes puntos de estudio.
6. Para cada punto de estudio obtener la longitud total de obstrucción de los edificios incidentes en el camino de propagación.
7. Para cada punto de estudio, obtener la pérdida de paso causado por la obstrucción de los edificios ( $L_b$ ) evaluando la curva empírica ( $L_b$  vs B) en el valor de la longitud total de obstrucción B obtenido.
8. Se obtiene la potencia recibida predicha por el modelo en cada punto de estudio, utilizando la ecuación general 2.1.

$$P_r(A) = P_t - L_{los}(d_A, h_1) - L_b(B) \quad (2.1)$$

### 2.3.2 Identificación de una ruta de estudio

Para poder realizar el análisis de predicción de la propagación de una señal GSM, es necesario identificar el entorno en el cual la señal ejerce influencia. Para poder aplicar el modelamiento de Lee, es necesario un ambiente urbano, o semi-urbano, el cual esté formado por bloques o cuadras con edificios y estructuras de mediana a gran altura.

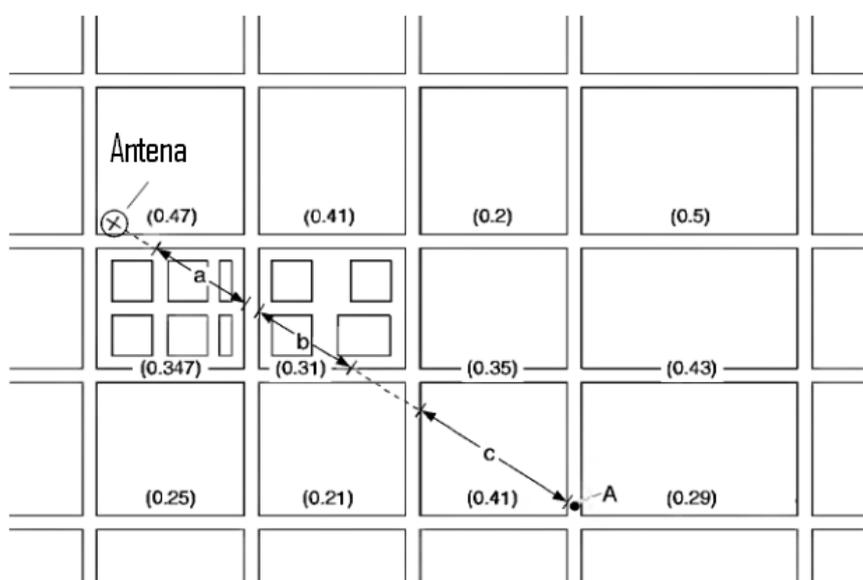
Una vez identificado el tipo de terreno y la aplicabilidad del modelo de Lee, se debe escoger una o varias rutas de estudio y análisis de predicción de propagación, las cuales preferentemente deben cubrir los sectores de mayor importancia de cobertura. Como se puede ver en la figura 2.7, hay diferentes formas de ruta, de gran importancia es una ruta con línea de vista.



**Figura 2.7:** Ejemplo de trazado de edificios y combinaciones de rutas

### 2.3.3 Mapeo y digitalización del área de incidencia

Una vez detectada el área que incidirá en la propagación de las señales inalámbricas, se debe proceder a mapear las calles que pertenecen a esta área, y además digitalizar los bloques o cuadras con las áreas que los edificios ocupan. La figura 2.8 muestra un ejemplo de este proceso.

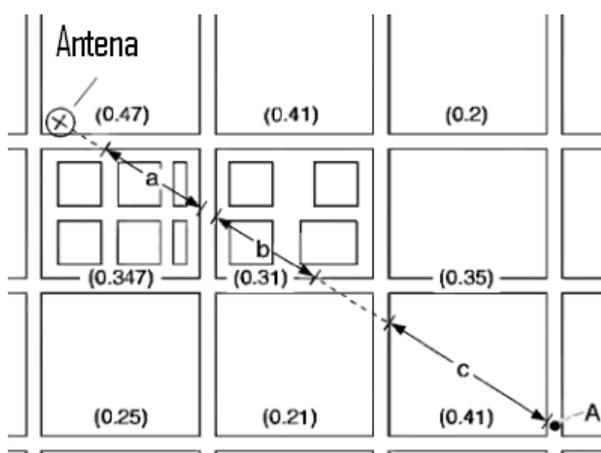


**Figura 2.8:** Ejemplo de mapeo y digitalización de calles y cuadras

### 2.3.4 Cuantificación de obstrucciones y su incidencia en la pérdida de camino

Calcular la longitud de obstrucción de los edificios (B) no es una tarea sencilla, puesto que en la mayoría de los casos es complicado y poco preciso determinar con exactitud las longitudes individuales de

obstrucción de los edificios incidentes en la propagación de una señal (figura 2.6), es por esto que se introduce el concepto de longitud equivalente de obstrucción ( $B_{eq}$ ). Este valor permite obtener un estimado de la obstrucción  $B$  ponderando la longitud total de una cuadra con la densidad de ocupación de la misma. La figura 2.7 muestra un caso donde las cuadras que obstruyen la propagación poseen muchos edificios. En esta situación resultaría una pérdida de tiempo determinar las distancias individuales de obstrucción de cada edificio.



**Figura 2.9:** Ilustración del concepto de longitud equivalente de obstrucción

$$B_{eq}$$

En la figura se observa que entre la antena y el punto A de estudio inciden tres cuadras con edificios: manzana  $M_a$ , manzana  $M_b$  y manzana  $M_c$ . El valor de  $B$  resultaría de sumar la longitud de obstrucción de cada edificio de las diferentes cuadras que inciden en el

camino de propagación. Para simplificar el análisis y los cálculos que conllevarían la obtención del valor de B, el modelo de Lee propone los siguientes pasos:

En primer lugar se procede a cuantificar la densidad de ocupación de los edificios en cada cuadra o manzana. Para cada cuadra aplica la siguiente fórmula:

$$P_i = \frac{A_e}{A_t} \quad (2.4)$$

Donde  $P_i$  representa la densidad de ocupación de la  $i$ -ésima cuadra,  $A_e$  representa el área de ocupación de los edificios en la  $i$ -ésima cuadra y  $A_t$  representa el área total de la  $i$ -ésima cuadra. Para el ejemplo de la figura 2.9, luego de aplicar la fórmula 2.4, las densidades de ocupación de las manzanas incidentes a, b y c serían respectivamente  $P_a$ ,  $P_b$  y  $P_c$  (los valores reales de las densidades se muestran en la parte inferior de cada manzana en la figura 2.9). En segundo lugar se obtiene el valor de la longitud de obstrucción total de cada cuadra, cabe resaltar que las longitudes individuales de los edificios son transparentes para este análisis. Tal como se observa en la figura 2.9, la manzana  $M_a$  obstruye la propagación entre la antena y el punto A, la manzana  $M_b$  obstruye una distancia b y la manzana  $M_c$  obstruye una distancia c. Luego, el valor de  $B_{eq}$  en el punto A se calcula de la siguiente forma:

$$B_{eq}(A) = a.P_a + b.P_b + c.P_c \quad (2.5)$$

Tal como se observa en la ecuación 2.5, el valor de  $B_{eq}$  pondera la longitud de obstrucción de una cuadra con el valor de densidad de ocupación de la misma, cabe resaltar que la obtención de  $B_{eq}$  es mucho más sencilla que la obtención de  $B$ . Es necesario aclarar que el valor de  $B_{eq}$  depende exclusivamente de la posición del punto de estudio  $A$ , debido a que la longitud de las obstrucciones y las manzanas incidentes en la propagación variará y dependerá del punto escogido para el análisis.

Finalmente se determina la pérdida de potencia debida a la obstrucción de edificios evaluando la curva empírica en el valor de  $B_{eq}$ , además, la ecuación general del modelo luciría de la siguiente manera:

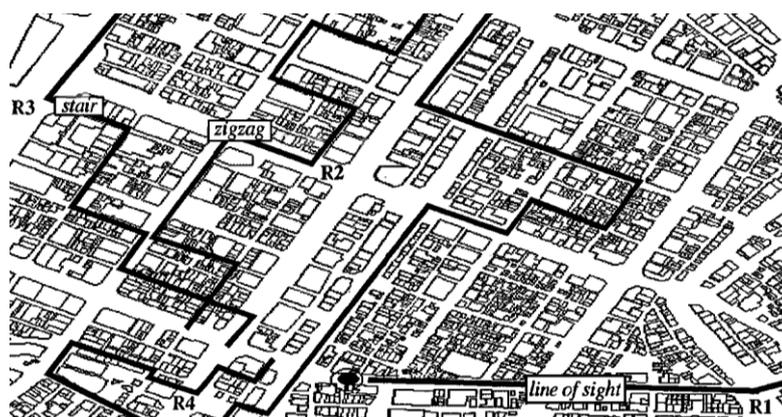
$$P_r(A) = P_t - L_{los}(d_A, h_1) - L_b(B_{eq}(A)) \quad (2.6)$$

#### **2.4 Muestra de la aplicación del procedimiento de evaluación, predicción y ajuste del modelo**

A continuación se muestra los resultados de la aplicación de la metodología de Lee para construir un modelo de propagación de potencia en una microcelda celular en la ciudad de San Francisco, Estados Unidos en los años 80.

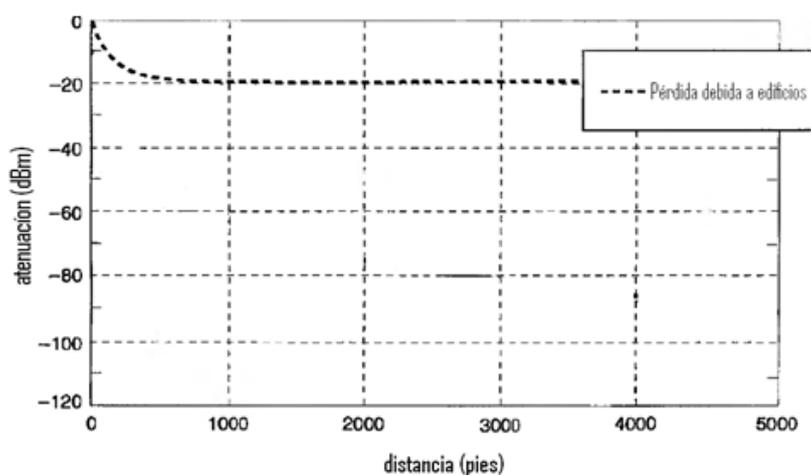
El modelo fue construido a partir de mediciones de potencia en un área urbana de la ciudad de San Francisco, considerando una microcelda

celular cuya estación base tenía una antena de ERP = 1W de potencia de salida y estaba elevada a una altura de 20 pies aproximadamente. En la figura 2.10 se muestra un mapa digitalizado del área de estudio y de las rutas de estudio escogidas.



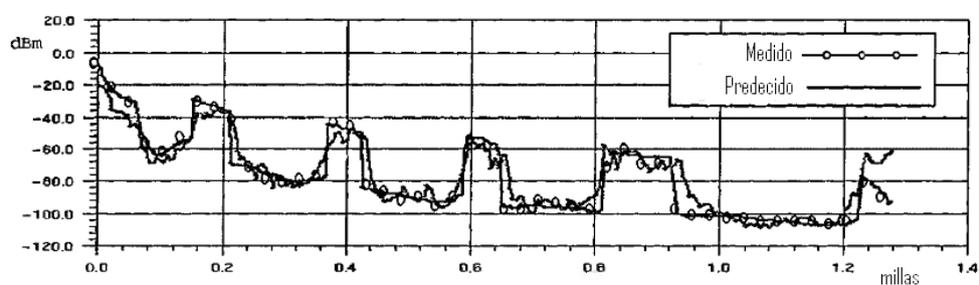
**Figura 2.10:** Mapa del área y las rutas de estudio en la ciudad de San Francisco, Ca, USA

En la figura 2.11 se muestra la curva empírica obtenida a base mediciones de potencia para este modelo.



**Figura 2.11:** Curva empírica de pérdida debida a edificios (Lb vs B)

Por último en la figura 2.12 se muestra un gráfico donde se dibujan dos curvas, la curva dibujada con línea continua representa la potencia recibida predecida por el modelo a lo largo de una ruta de estudio. La segunda curva dibujada con línea y círculos representa la potencia recibida medida a lo largo de la misma ruta de estudio. La diferencia entre ambas curvas representa el error del modelo.



**Figura 2.12:** Comparación del modelo de predicción con mediciones reales

# CAPÍTULO 3

## 3. DESARROLLO Y PRUEBAS DEL MODELO DE PROPAGACIÓN

Para aplicar los principios de modelamiento de propagación de Lee, se debe averiguar ciertas características del entorno en el cual la señal GSM ejerce influencia. En este capítulo se explica el proceso de análisis para la aplicación de los principios de Lee en la construcción del modelo de propagación y predicción de potencia de la antena GSM ubicada en el ciclo básico del campus Gustavo Galindo de la ESPOL. Además se explica el proceso de ajuste del modelo al entorno y características del terreno de cobertura estudiado. Finalmente se realiza una comparación del modelo obtenido con un modelo de propagación estándar para microceldas con el objetivo de validar los resultados obtenidos.

### **3.1 Aplicación de los principios de Lee para el caso ESPOL**

La aplicación de los principios de modelamiento de señal de Lee demanda conocer ciertas características básicas del entorno de cobertura. Este análisis fue diseñado para coberturas microcelulares, ya que el efecto de pérdida de paso causado por los edificios es variable dentro de los primeros 300 metros aproximadamente. El entorno de propagación debe estar conformado por bloques o cuadras uniformes con edificios de altitud considerable.

El área de ingenierías del Campus Gustavo Galindo de la Escuela Superior Politécnica del Litoral está dentro de la zona de incidencia de una antena GSM de cobertura microcelular. La disposición de los edificios de aulas y laboratorios en el terreno se puede describir como bloques y cuadras, sin embargo, la altitud de estas estructuras no es mayor a la altura a la cual la antena GSM está ubicada, lo cual hace que el efecto resultante de los edificios en el entorno difiera de los resultados expuestos por el análisis de Lee. Sin embargo, debido a la similitud de características entre el entorno de cobertura en el campus y el analizado por Lee, la aplicación del procedimiento es válida, como se comprobará más adelante. La figura 3.1 muestra el área de Ingeniería del campus.



**Figura 3.1:** Área de Ingenierías del Campus Gustavo Galindo.

### **3.2 Análisis Preliminar**

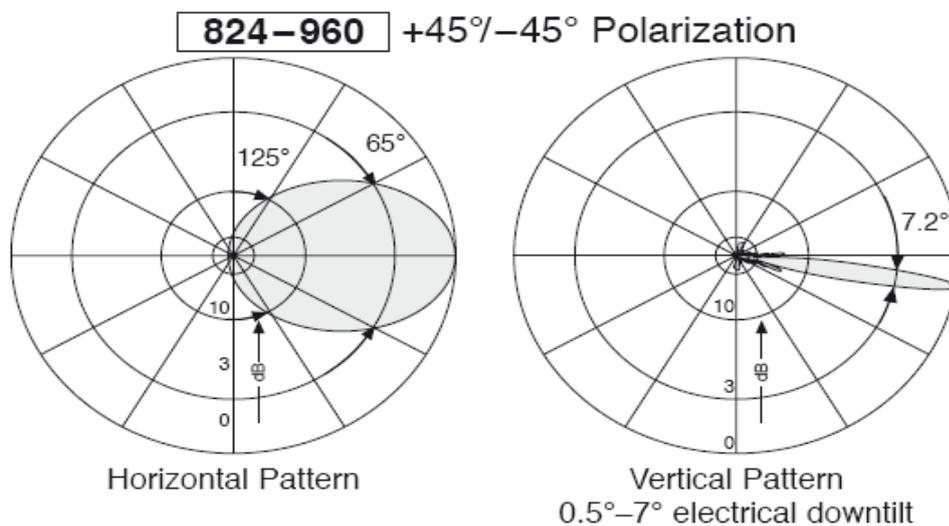
El procedimiento para la construcción del modelo de propagación de Lee para el entorno específico del área de Ingenierías de la ESPOL, requiere un análisis previo que consiste en identificar los diferentes sectores de cobertura, escoger el área de estudio y realizar el procedimiento de digitalización y cuantificación de los bloques incidentes.

### 3.2.1 Descripción de la antena GSM ubicada en el ciclo básico ESPOL

En la tabla 2 y 3 se muestran los datos de la Antena ubicada en el área de ciclo básico del campus Gustavo Galindo de la ESPOL.

|                                 |                                   |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| Rango de Frecuencia             | 824 – 894 MHz                     |
| Polarización                    | +45°, -45°                        |
| Ganancia                        | 2 X 16.5 dBi                      |
| Impedancia                      | 50 ?                              |
| VSWR                            | < 1.5                             |
| Aislamiento: Dentro del sistema | > 30 dB                           |
| Aislamiento: Entre sistema      | Típica: > 50 dB                   |
| Intermodulación IM3             | < -150 dBc (2 x 43 dBm portadora) |
| Max. Potencia por entrada       | 500 W                             |
| Potencia total                  | 1000 W                            |

**Tabla II:** Datos de la antena GSM ubicada en la ESPOL.



**Figura 3.2:** Polarización Cruzada y Vertical de la antena

|                                   |                                  |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| <b>Entrada</b>                    | 4 x 7-16 Hembra (cuello largo)   |
| <b>Posición conector</b>          | Final                            |
| <b>Mecanismo de ajuste</b>        | 2x, Posición final ajustable     |
| <b>Peso</b>                       | 27 Kg.                           |
| <b>Carga de Viento</b>            | Frontal: 460 N (a 150 Km/h)      |
|                                   | Lateral: 380 N (a 150 Km/h)      |
|                                   | Lado Opuesto: 860 N (a 150 Km/h) |
| <b>Máxima Velocidad de Viento</b> | 200 km/h                         |

**Tabla III:** Especificaciones mecánicas de la antena.



**Figura 3.3:** Vista de los conectores de la antena

Una antena GSM está formada por N canales: N-1 canales de tráfico (voz, datos, etc.) y un canal de control conocido como BCCH. Todos los canales tienen asignado un ancho de banda de 200 KHz. y están separados entre sí para evitar la interferencia de canal adyacente. El análisis de la potencia asociada a cada canal depende de la naturaleza de estos. Para canales de tráfico, la potencia es de naturaleza aleatoria

porque depende del tráfico que soportan en un determinado instante de tiempo. En este caso, la potencia aparecerá solamente cuando exista voz o datos que transmitir hacia algún usuario. Por otro lado el canal de control siempre se encuentra activo y radiando continuamente una potencia constante.

### 3.2.2 Identificación de las zonas de cobertura de la antena

La antena ubicada en el ciclo básico de ingenierías del campus Gustavo Galindo de la ESPOL, es de tipo sectorial, es decir, está conformada por tres transceptores que dividen el área de cobertura en tres sectores: sector X, sector Y, y sector Z.

En la tabla 4 se muestran los grupos de canales por sector, con sus respectivas frecuencias centrales.

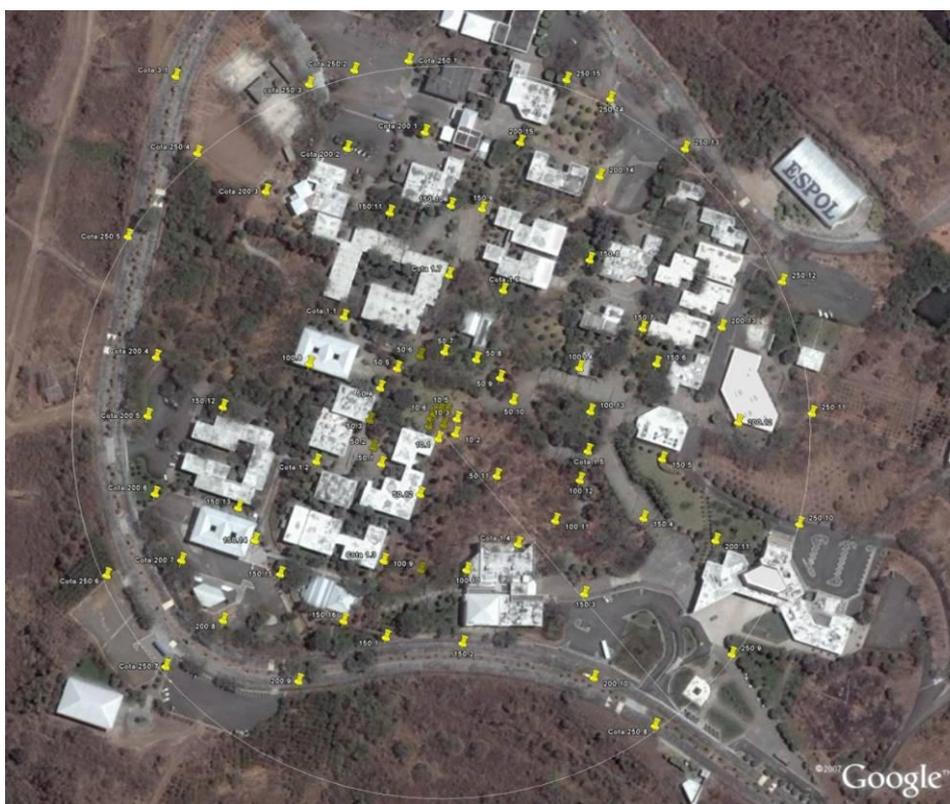
| SECTOR X   | FRECUENCIA CENTRAL |
|------------|--------------------|
| <b>142</b> | <b>872</b>         |
| 129        | 869,4              |
| 132        | 870                |
| 152        | 874                |
| SECTOR Y   | FRECUENCIA CENTRAL |
| <b>146</b> | <b>872,8</b>       |
| 128        | 869,2              |
| 131        | 869,8              |
| SECTOR Z   | FRECUENCIA CENTRAL |
| <b>134</b> | <b>870,4</b>       |
| 130        | 869,6              |

**Tabla IV:** Canales por sector y su frecuencia central.

Para obtener la frecuencia central de cada canal, sea de voz o control, se debe utilizar la ecuación 3.1, que se aplica para canales downlink GSM de la banda de 850 MHz.

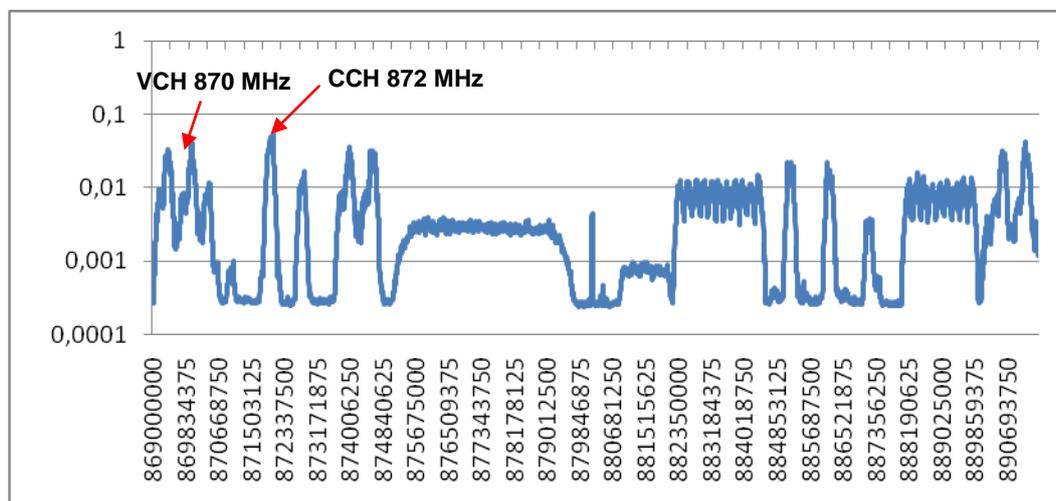
$$F_{cdl} = 892.2 + 0.2(ARFCN - 128) \quad (3.1)$$

Es importante conocer la frecuencia central de cada canal, ya que en base a las portadoras, se identifica las diferentes zonas de cobertura para cada antena sectorial. Usando el equipo NARDA SRM3000, se toman muestras en puntos escogidos radialmente teniendo como centro a los transceptores. En la figura 3.4 se observan los puntos escogidos para el proceso de identificación de las zonas de cobertura.

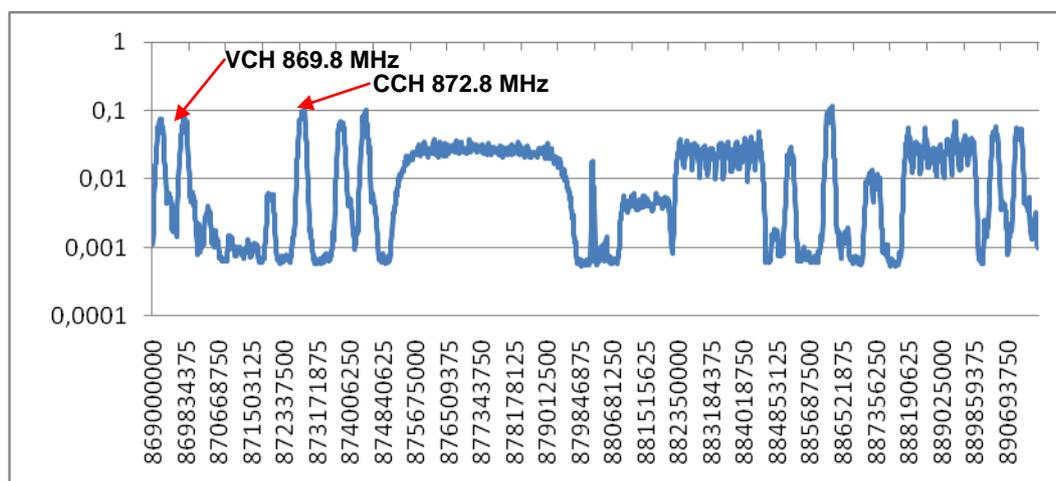


**Figura 3.4:** Puntos escogidos para identificación de zonas de cobertura.

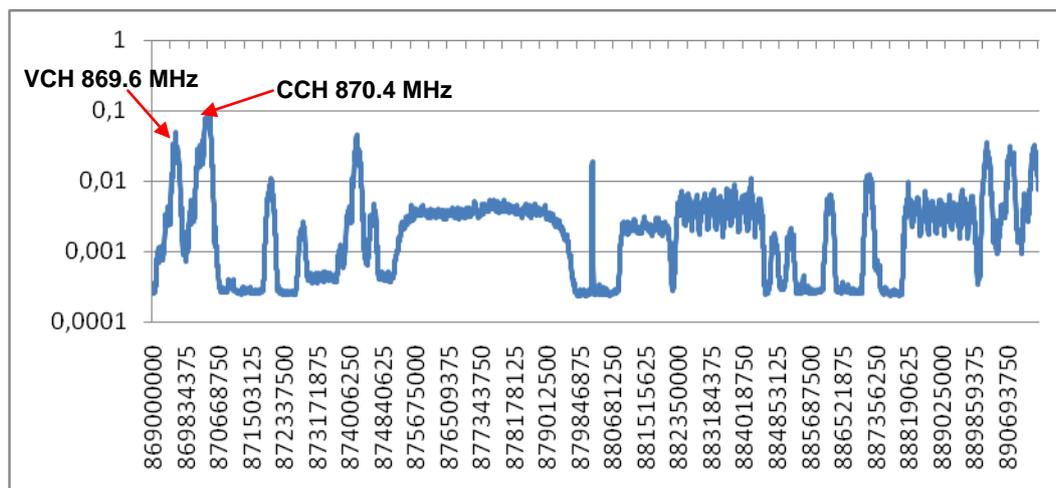
En las figuras 3.5, 3.6 y 3.7 se observa el patrón de la medición realizado con el analizador espectral para cada sector.



**Figura 3.5:** Medición espectral tomada en el sector X de cobertura.

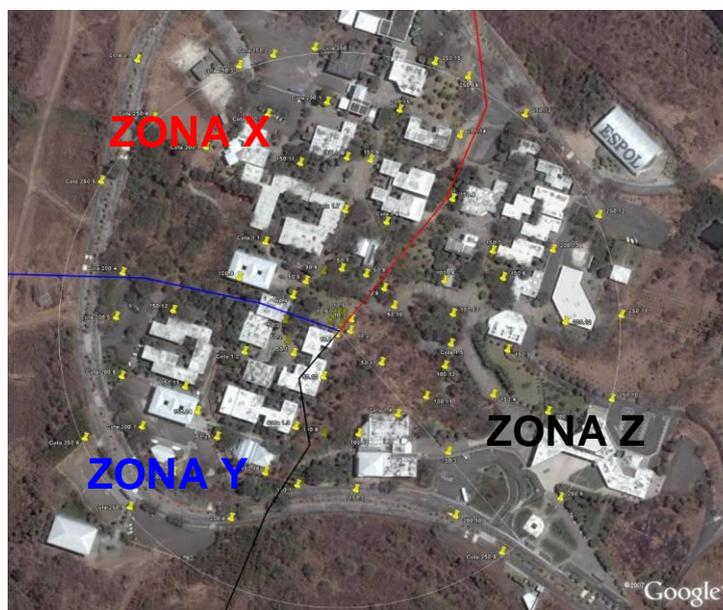


**Figura 3.6:** Medición espectral tomada en el sector Y de cobertura.



**Figura 3.7:** Medición espectral tomada en el sector Z de cobertura.

Una vez identificadas las zonas de cobertura, se puede separar las mismas para realizar un estudio focalizado en un área determinada. En la figura 3.8 se puede observar las tres zonas de cobertura.



**Figura 3.8:** Zonas de cobertura de la antena GSM en el ciclo básico.

El modelo de propagación desarrollado en este trabajo, toma como referencia la potencia emitida por el canal de control (BCCH) del sector X, aprovechando la facilidad del análisis de desvanecimiento de potencia de una fuente de emisión constante

### **3.2.3 Determinación de la ruta y puntos de estudio**

Luego del proceso de identificación de las zonas de cobertura y sus límites, se selecciona una de las tres zonas para ser objeto de estudio. Para el desarrollo del modelo se escoge la zona X debido a su topografía uniforme y a su alta densidad de edificios. Luego de haber escogido la zona de estudio, se traza una ruta para elegir los puntos donde se realizan las mediciones. Esta ruta debe necesariamente atravesar varios obstáculos (edificios, estructuras, vegetación, y todo agente externo que pueda producir atenuación en la señal), la obstrucción de estos agentes producirá una pérdida que deberá ser cuantificada e incluida en el estudio de propagación.

Los puntos escogidos, deben estar aproximadamente a un mismo nivel de altura, ya que esta no se incluye como variable de estudio dentro del análisis de cobertura microcelular.

#### **3.2.4 Mapeo y digitalización del área de incidencia**

Una vez identificado el área de incidencia que comprende la ruta de estudio y sus alrededores, se debe iniciar el proceso de digitalización del mismo para ser utilizado en el análisis de la propagación de la señal. El mapa provee una fuente precisa de información acerca de la configuración de manzanas y edificios que provocan atenuación en la zona de estudio y ayuda además al cálculo de distancias de los puntos de medición con respecto a la antena fuente. Con la ayuda de un mapa digital a escala del campus se soluciona el problema del mapeo y digitalización. En la figura 3.9 se muestra un mapa a escala del área de ingenierías del Campus Gustavo Galindo de la ESPOL donde se aprecia el área de estudio y los puntos de medición escogidos.



implantación de las estructuras posee un área de 1.136 m<sup>2</sup>. La densidad de ocupación de la manzana es de 38.8%.



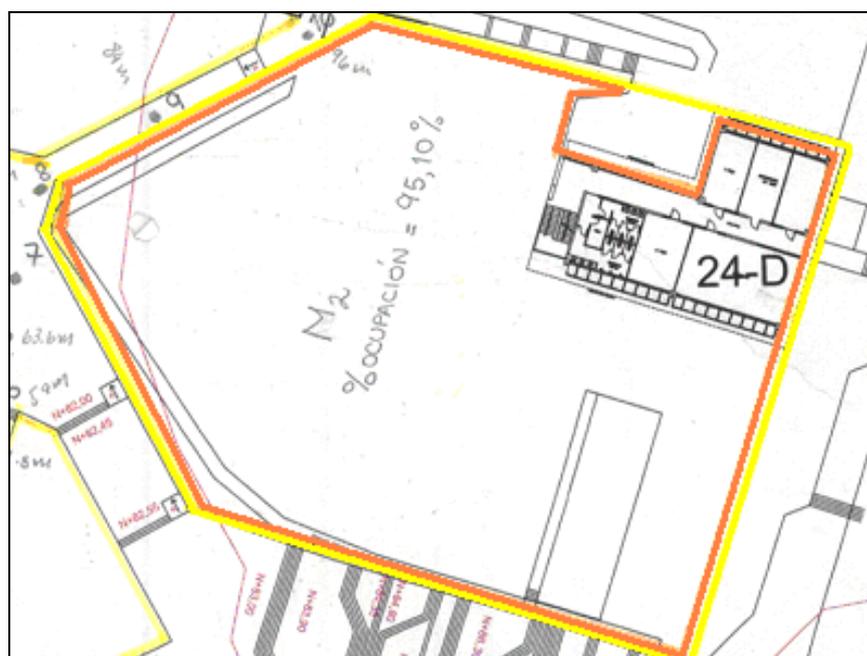
**Figura 3.10:** Bloque 1 FEPOL

En la tabla 5 se presenta un resumen de los datos.

|                                |                      |
|--------------------------------|----------------------|
| <b>Area del terreno</b>        | 3.421 m <sup>2</sup> |
| <b>Area de la implantación</b> | 1.136 m <sup>2</sup> |
| <b>Densidad de ocupación</b>   | 38.8%                |

**Tabla V:** Datos de M1 FEPOL

En la figura 3.11 se muestra el plano de M2 FICT. Este bloque es de forma irregular y consiste de un gran edificio de concreto que ocupa casi toda el área del terreno de la manzana. El terreno posee un área de 1.960 m<sup>2</sup>, la implantación de la estructura posee un área de 1.864 m<sup>2</sup>. La densidad de ocupación de la manzana es de 95.10%.



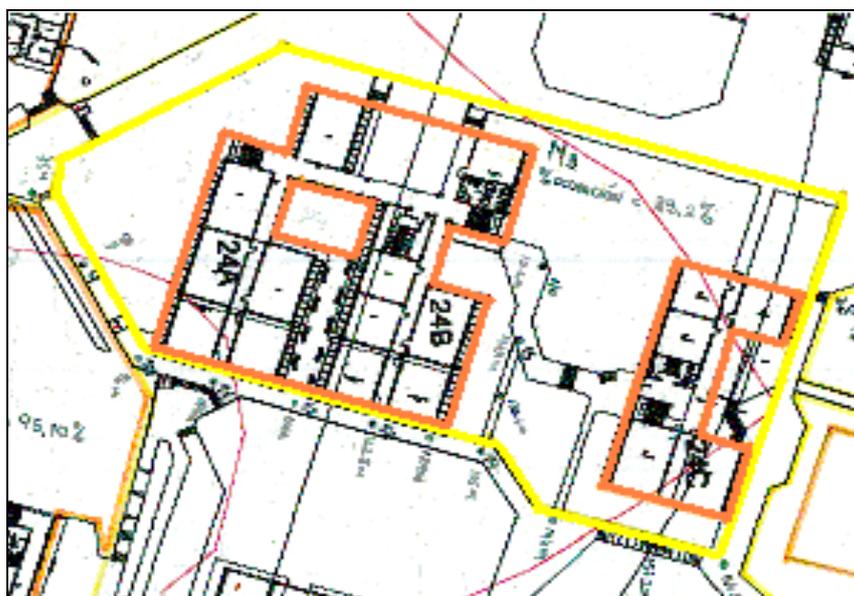
**Figura 3.11:** Bloque 2 FICT

En la tabla 6 se presenta un resumen de los datos.

|                                |                      |
|--------------------------------|----------------------|
| <b>Area del terreno</b>        | 1.960 m <sup>2</sup> |
| <b>Area de la implantación</b> | 1.864 m <sup>2</sup> |
| <b>Densidad de ocupación</b>   | 95.10%               |

**Tabla VI:** Datos de M2 FICT

En la figura 3.12 se muestra el plano de M3 FIEC. Este bloque es de forma irregular y consiste de dos edificios de concreto, uno de aulas perteneciente a la FIEC y el otro de aulas perteneciente a FIMCP. El terreno posee un área de 4.639 m<sup>2</sup>, El área de implantación de las estructuras posee un área de 1.540 m<sup>2</sup>. La densidad de ocupación de la manzana es de 33.2%.



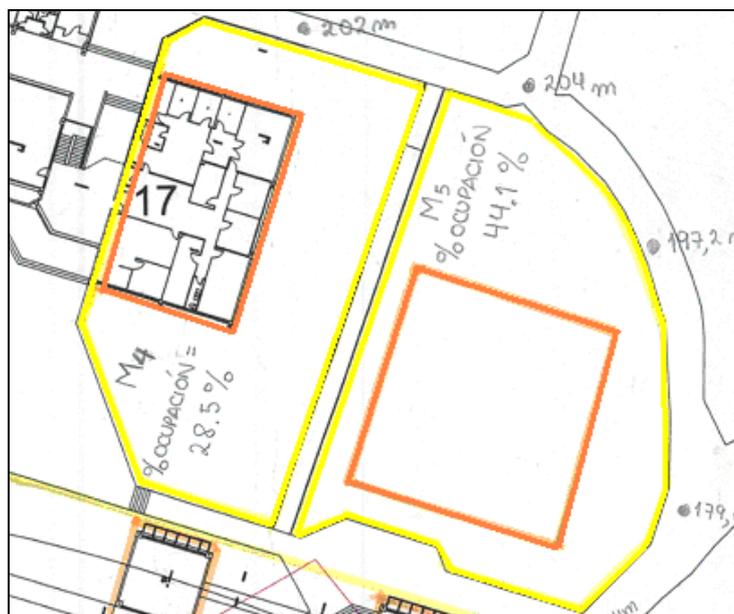
**Figura 3.12:** Bloque 3 FIEC

En la tabla 7 se presenta un resumen de los datos.

|                         |                      |
|-------------------------|----------------------|
| Area del terreno        | 4.639 m <sup>2</sup> |
| Area de la implantación | 1.540 m <sup>2</sup> |
| Densidad de ocupación   | 33.2%                |

**Tabla VII:** Datos de M3 FIEC

En la figura 3.13 se muestra el plano de M4 FIMCP y M5 ASOCIACIONES.



**Figura 3.13:** Bloque M4 FIMCP y M5 ASOCIACIONES

Estos bloques tienen forma irregular. M4 FIMCP posee un edificio de dos plantas donde funciona el área administrativa de la facultad. El terreno posee un área de  $676 \text{ m}^2$ , la implantación de la estructura posee un área de  $193 \text{ m}^2$ . La densidad de ocupación de la manzana es de 28.5%.

M5 ASOCIACIONES posee un edificio de una planta donde funciona la sede de las asociaciones de la ESPOL. El terreno posee un área de  $703 \text{ m}^2$ , la implantación de la estructura posee un área de  $310 \text{ m}^2$ . La densidad de ocupación de la manzana es 44.1%.

En las tablas 8y 9 se presentan los resúmenes de datos de M4 FIMCP y M5 ASOCIACIONES.

|                                |                    |
|--------------------------------|--------------------|
| <b>Area del terreno</b>        | 676 m <sup>2</sup> |
| <b>Area de la implantación</b> | 193 m <sup>2</sup> |
| <b>Densidad de ocupación</b>   | 28.5%              |

**Tabla VIII:** Datos de M4 FIMCP

|                                |                    |
|--------------------------------|--------------------|
| <b>Area del terreno</b>        | 703 m <sup>2</sup> |
| <b>Area de la implantación</b> | 310 m <sup>2</sup> |
| <b>Densidad de ocupación</b>   | 44.1%              |

**Tabla IX:** Datos de M5 ASOCIACIONES

### 3.2.6 Configuración del equipo usado para el trabajo de campo

La antena objeto de este estudio pertenece a la compañía CONECEL S.A. y opera en la banda celular GSM 850 MHz. Son de interés los canales de control que se encuentran en el ancho de banda comprendido entre 869 MHz y 880 MHz. Por lo que será necesario configurar el analizador espectral NARDA SRM 3000 para que detecte de manera óptima ese rango de frecuencias, de la siguiente manera:

Frecuencia mínima (F<sub>mín</sub>): 869 MHz, frecuencia máxima (F<sub>máx</sub>): 880 MHz, resolución de ancho de banda (RBW): 5 KHz, (se fija este valor para tomar el mayor número de muestras posibles y obtener una medición más precisa), rango de medición (Measure Range): 2.5 V/m, tipo de resultado (Result Type): promedio máximo.

### 3.3 Trabajo de campo: resultados de las mediciones de potencia en el área de incidencia

El trabajo de campo consiste en realizar las mediciones en los puntos asignados del camino de estudio. Se realizaron cinco series de mediciones, en consecuencia se tiene cinco muestras de campo electromagnético por cada punto estudiado. Por defecto, el equipo Narda SRM 3000 toma mediciones de campo electromagnético (CEM) en unidades Voltios/metros. Para efectos de análisis se debe convertir este valor de campo electromagnético a valores de potencia en dBm.

Para realizar esta conversión se utilizan las siguientes relaciones:

$$P_d = \frac{CEM^2}{\eta} \quad (3.2)$$

Donde  $P_d$  es la densidad de potencia medida en el punto de estudio y  $\eta$  es la impedancia del espacio libre:

$$\eta = 120\pi \quad (3.2)$$

Luego:

$$P = P_d \cdot A_e \quad (3.3)$$

Donde  $P$  es la potencia en watts en el punto de estudio y  $A_e$  es el área de apertura efectiva que por conveniencia se toma como  $1 \text{ m}^2$ .

Finalmente la conversión de potencia de watts a dBm:

$$P(\text{dBm}) = 10 \log_{10} \left( \frac{P}{1000} \right) \quad (3.4)$$

A continuación en la tabla 10 se presenta un ejemplo del proceso de conversión de unidades para una de las mediciones realizadas.

| CEM [V/m] | $P_d = CEM^2/n$ [W/m <sup>2</sup> ] | $P = P_d \cdot A_e$ [W] | P(dBm)  |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------|---------|
| 0.592     | 9.28E-04                            | 8.74E-12                | -140.59 |
| 0.982     | 2.56E-03                            | 2.41E-11                | -136.19 |
| 0.594     | 9.34E-04                            | 8.80E-12                | -140.56 |
| 0.259     | 1.77E-04                            | 1.67E-12                | -147.78 |
| 0.469     | 5.82E-04                            | 5.48E-12                | -142.61 |
| 0.474     | 5.95E-04                            | 5.60E-12                | -142.52 |
| 0.681     | 1.23E-03                            | 1.16E-11                | -139.36 |
| 0.435     | 5.00E-04                            | 4.71E-12                | -143.27 |
| 0.334     | 2.95E-04                            | 2.78E-12                | -145.57 |
| 0.256     | 1.74E-04                            | 1.64E-12                | -147.86 |
| 0.273     | 1.97E-04                            | 1.86E-12                | -147.31 |
| 0.338     | 3.03E-04                            | 2.86E-12                | -145.44 |
| 0.417     | 4.61E-04                            | 4.34E-12                | -143.62 |
| 0.316     | 2.64E-04                            | 2.49E-12                | -146.04 |
| 0.279     | 2.06E-04                            | 1.94E-12                | -147.13 |

**Tabla X:** Conversión de unidades

Hacia el lado derecho se observa el valor de campo electromagnético (CEM) medido por el equipo, a continuación se encuentra el valor de densidad de potencia calculado, luego el valor de potencia en vatios y finalmente se observa el valor de potencia en unidades de dBm. (En la sección de anexos se pueden encontrar las tablas completas de las mediciones realizadas)

### 3.4 Construcción y ajuste de los parámetros del modelo

En esta etapa de desarrollo del proyecto, se utiliza todo el análisis previo realizado en este capítulo y las mediciones de campo, para

finalmente construir el modelo de propagación basado en las condiciones del campus ESPOL. El objetivo es ajustar los parámetros de la ecuación general de Lee al ambiente específico y así determinar una ecuación particular que haga una predicción de la potencia recibida en cualquier punto del área de estudio. Para llegar a esta ecuación se debe realizar un análisis de los datos tomados en campo y se debe además construir ciertas curvas empíricas que caracterizan el entorno de propagación.

Luego de construido el modelo se hace un análisis de cada uno de sus parámetros tales como: potencia recibida, potencia efectiva radiada, pérdida de línea de vista, pérdida debida a edificios y adicionalmente se analizan ciertos puntos de la ruta de estudio que se comportan de manera especial y que merecen una interpretación separada.

#### **3.4.1 Aplicación de la ecuación de Lee en los puntos de la ruta de estudio**

Tal como se presentó previamente en el capítulo 2, la ecuación general del modelo de Lee (ecuación 2.1) posee cuatro términos que se muestran a continuación: potencia recibida, potencia efectiva radiada, pérdida de línea de vista y pérdida a causa de edificios. A continuación

en la ecuación 3.5 se muestra la evaluación de la ecuación general de Lee en cualquier punto A del área de estudio:

$$P_r(A) = ERP - L_{los}(d_A) - L_b(B_{eq}(A)) \quad (3.5)$$

Donde:

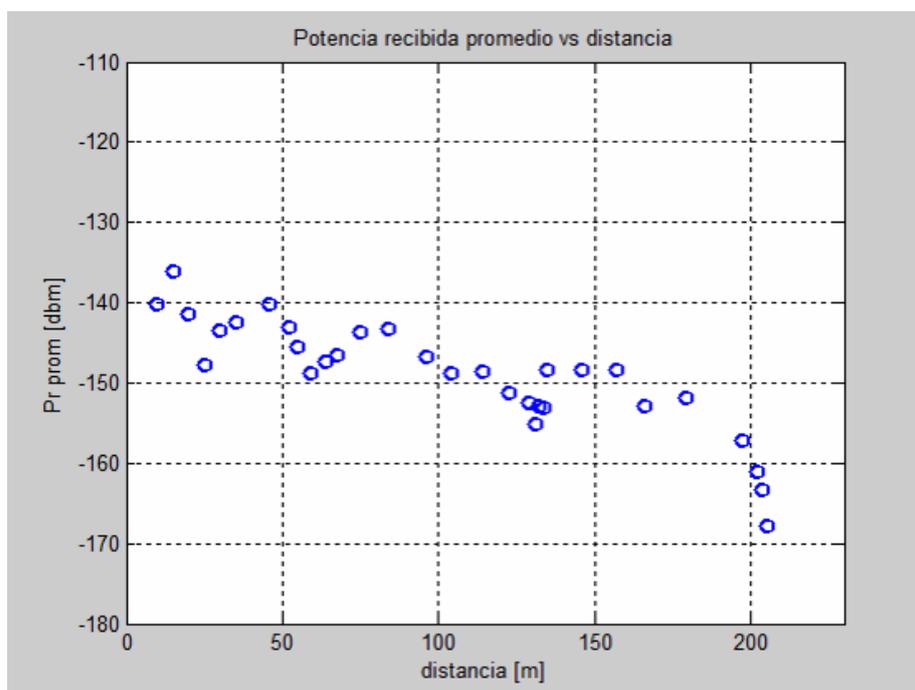
$P_r(A)$ : potencia predicha en el punto A; ERP: potencia efectiva radiada;  $L_{los}$ : pérdida por línea de vista en el punto A;  $d_A$ : distancia existente entre la antena fuente y el punto A y  $L_b$ : pérdida debida a edificios en el punto A.

En un principio tres de los cuatro términos de la ecuación son conocidos: la potencia recibida ( $P_r(A)$ ) se obtiene de las mediciones en cada punto, la potencia efectiva radiada (ERP) es una constante de la antena y la pérdida por línea de vista ( $L_{los}$ ) se determina mediante la ecuación 2.2. Tal como se explicó en la sección 3.3, se tomaron cinco muestras de potencia por cada punto de estudio, luego se procedió a determinar el promedio de los valores por punto. En la tabla 11 se muestra la compilación de las cinco mediciones de potencia recibida y su promedio en dBm.

| DISTANCIA | MEDICION 1 | MEDICION 2 | MEDICION 3 | MEDICION 4 | MEDICION 5 |
|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 10        | -140,59    | -140,59    | -139,04    | -140,59    | -140,04    |
| 15        | -136,19    | -136,19    | -136,19    | -136,19    | -136,19    |
| 20        | -140,56    | -140,56    | -143,83    | -140,56    | -141,52    |
| 25        | -147,78    | -147,78    | -147,78    | -147,78    | -147,78    |
| 30        | -142,61    | -142,61    | -146,13    | -142,61    | -143,63    |
| 35        | -142,52    | -142,52    | -142,52    | -142,52    | -142,52    |
| 46        | -139,36    | -140,90    | -140,30    | -140,10    | -140,16    |
| 52        | -143,27    | -143,27    | -142,32    | -143,27    | -142,94    |
| 55        | -145,57    | -145,57    | -145,57    | -145,57    | -145,57    |
| 59        | -147,86    | -149,29    | -149,14    | -148,54    | -148,74    |
| 63,6      | -147,31    | -147,31    | -147,31    | -147,31    | -147,31    |
| 67,6      | -145,44    | -145,44    | -149,59    | -145,44    | -146,62    |
| 75        | -143,62    | -143,57    | -143,59    | -143,60    | -143,59    |
| 84        | -146,04    | -141,28    | -142,65    | -143,34    | -143,10    |
| 96        | -147,13    | -147,29    | -145,84    | -147,21    | -146,73    |
| 104       | -151,36    | -148,54    | -145,87    | -149,84    | -148,31    |
| 114       | -149,51    | -147,65    | -148,97    | -148,53    | -148,68    |
| 122,8     | -150,69    | -151,45    | -152,11    | -151,06    | -151,40    |
| 129       | -152,54    | -152,54    | -152,54    | -152,54    | -152,54    |
| 131,2     | -155,11    | -155,47    | -154,47    | -155,29    | -155,01    |
| 132,4     | -149,32    | -154,60    | -155,77    | -151,57    | -152,76    |
| 133,6     | -153,09    | -153,09    | -153,09    | -153,09    | -153,09    |
| 135       | -147,15    | -147,70    | -151,07    | -147,42    | -148,48    |
| 146       | -146,80    | -147,88    | -151,31    | -147,33    | -148,46    |
| 157,2     | -149,81    | -146,74    | -148,55    | -148,14    | -148,27    |
| 166       | -153,37    | -151,39    | -153,97    | -152,33    | -152,84    |
| 179,6     | -152,81    | -151,13    | -151,66    | -151,93    | -151,84    |
| 197,2     | -158,29    | -155,69    | -157,98    | -156,89    | -157,24    |
| 204       | -161,84    | -163,26    | -165,50    | -162,52    | -163,41    |
| 202       | -161,58    | -157,94    | -164,86    | -159,57    | -161,00    |
| 205,2     | -170,05    | -164,31    | -170,22    | -166,71    | -167,73    |

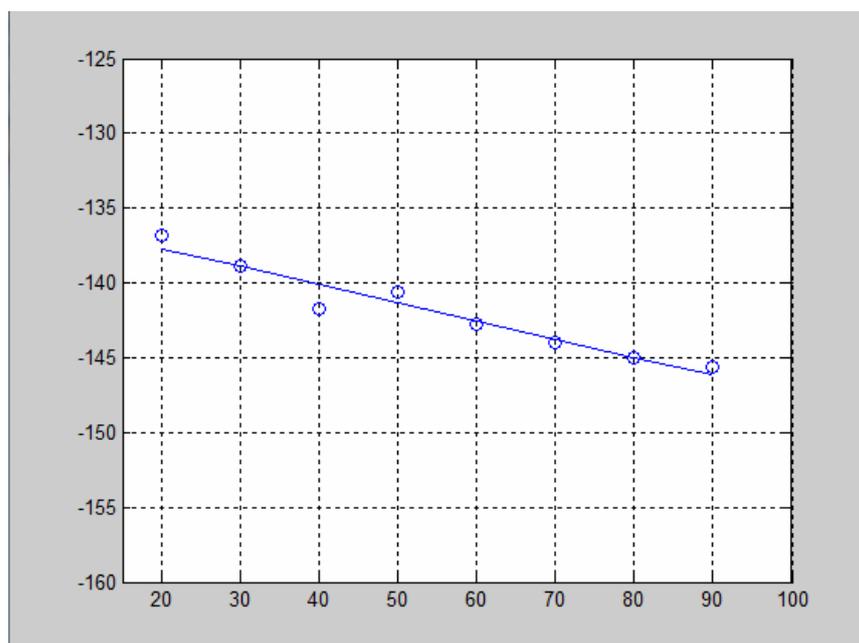
**Tabla XI:** Mediciones de potencia recibida en dBm tomadas en la ruta de estudio

En la figura 3.14 se muestra el gráfico de los valores de potencia recibida promedio versus distancia en la ruta de estudio.



**Figura 3.14:** Potencia recibida promedio versus distancia

El valor del término de potencia efectiva radiada (ERP) es una constante de la antena generalmente conocida. Si no lo es, puede ser determinada mediante la interpolación al eje de potencia del gráfico de potencia recibida versus distancia, evaluado en puntos cercanos a la antena, tal como se muestra a continuación. En la figura 3.15 se muestra el gráfico de la curva de potencia recibida versus distancia del cual se extrapola el valor de ERP evaluando la curva para una distancia de alejamiento igual a cero. Se interpreta el valor extrapolado como la potencia a cero metros de la antena, es decir la potencia efectiva de salida (ERP).



**Figura 3.15:** Curva de evaluación de potencia efectiva radiada ERP

El valor resultante de la extrapolación se muestra a continuación:

$$ERP = -135.2dB \quad (3.6)$$

El valor de pérdida de línea de vista ( $L_{los}$ ) se determina usando la ecuación 2.2. El valor de  $L_{los}$  depende únicamente de la distancia ( $d_A$ ) existente entre el punto de estudio y la antena fuente. En la tabla 12 se muestran las distancias de cada punto de estudio y su respectivo valor de pérdida de línea de vista.

| $d_A$ | $L_{los}(d_A)$ |
|-------|----------------|
| 10    | 111,25         |
| 15    | 114,77         |
| 20    | 117,27         |
| 25    | 119,21         |
| 30    | 120,79         |
| 35    | 122,13         |
| 46    | 124,51         |
| 52    | 125,57         |
| 55    | 126,06         |
| 59    | 126,67         |
| 63,6  | 127,32         |
| 67,6  | 127,85         |
| 75    | 128,75         |
| 84    | 129,74         |
| 96    | 130,90         |
| 104   | 131,59         |
| 114   | 132,39         |
| 122,8 | 133,04         |
| 129   | 133,46         |
| 131,2 | 133,61         |
| 132,4 | 133,69         |
| 133,6 | 133,77         |
| 135   | 133,86         |
| 146   | 134,54         |
| 157,2 | 135,18         |
| 166   | 135,65         |
| 179,6 | 136,34         |
| 197,2 | 137,15         |
| 204   | 137,44         |
| 202   | 137,36         |
| 205,2 | 137,50         |

**Tabla XII:** Distancia y pérdida de línea de vista ( $L_{los}$ )

En este punto de desarrollo, son conocidos tres de los cuatro términos de la ecuación general del modelo de Lee: potencia recibida (tabla 11), ERP (ecuación 3.6) y pérdida de línea de vista ( $L_{los}$ ) (tabla 12).

El término de  $L_b$ , tal como se mencionó previamente, se obtiene “despejando” esta variable en cada una de las ecuaciones que se obtienen por cada punto de estudio. En la tabla 13 se muestra un

resumen de la aplicación de la ecuación de Lee, incluyendo los valores de Lb obtenidos.

| $d_A$ | Pr (prom) | ERP    | $L_{\text{os}}(d_A)$ | Lb      |
|-------|-----------|--------|----------------------|---------|
| 10    | -140,17   | -135,2 | 111,25               | -106,28 |
| 15    | -136,19   | -135,2 | 114,77               | -113,79 |
| 20    | -141,40   | -135,2 | 117,27               | -111,07 |
| 25    | -147,78   | -135,2 | 119,21               | -106,63 |
| 30    | -143,52   | -135,2 | 120,79               | -112,48 |
| 35    | -142,52   | -135,2 | 122,13               | -114,82 |
| 46    | -140,16   | -135,2 | 124,51               | -119,54 |
| 52    | -143,01   | -135,2 | 125,57               | -117,76 |
| 55    | -145,57   | -135,2 | 126,06               | -115,69 |
| 59    | -148,71   | -135,2 | 126,67               | -113,16 |
| 63,6  | -147,31   | -135,2 | 127,32               | -115,21 |
| 67,6  | -146,51   | -135,2 | 127,85               | -116,54 |
| 75    | -143,59   | -135,2 | 128,75               | -120,36 |
| 84    | -143,28   | -135,2 | 129,74               | -121,65 |
| 96    | -146,84   | -135,2 | 130,90               | -119,26 |
| 104   | -148,78   | -135,2 | 131,59               | -118,01 |
| 114   | -148,67   | -135,2 | 132,39               | -118,92 |
| 122,8 | -151,34   | -135,2 | 133,04               | -116,90 |
| 129   | -152,54   | -135,2 | 133,46               | -116,12 |
| 131,2 | -155,07   | -135,2 | 133,61               | -113,74 |
| 132,4 | -152,81   | -135,2 | 133,69               | -116,08 |
| 133,6 | -153,09   | -135,2 | 133,77               | -115,88 |
| 135   | -148,36   | -135,2 | 133,86               | -120,70 |
| 146   | -148,36   | -135,2 | 134,54               | -121,38 |
| 157,2 | -148,30   | -135,2 | 135,18               | -122,08 |
| 166   | -152,78   | -135,2 | 135,65               | -118,07 |
| 179,6 | -151,88   | -135,2 | 136,34               | -119,66 |
| 197,2 | -157,22   | -135,2 | 137,15               | -115,13 |
| 204   | -163,31   | -135,2 | 137,44               | -109,34 |
| 202   | -160,99   | -135,2 | 137,36               | -111,57 |
| 205,2 | -167,81   | -135,2 | 137,50               | -104,89 |

**Tabla XIII:** Resumen de la aplicación de la ecuación del modelo de Lee en cada punto de estudio

Usando el procedimiento desarrollado previamente en la sección 2.4, se calcula para cada punto de la ruta de estudio el valor de distancia equivalente de obstrucción por edificios, cuya nomenclatura es  $B_{\text{eq}}$

(ecuación 2.5). En la tabla 14 se muestra los datos de  $B_{eq}$  calculados por cada punto.

| PUNTO A | $d_A$  | $B_{eq}(A)$ |
|---------|--------|-------------|
| 1       | 10,00  | 0,00        |
| 2       | 15,00  | 0,00        |
| 3       | 20,00  | 0,00        |
| 4       | 25,00  | 0,00        |
| 5       | 30,00  | 0,00        |
| 6       | 35,00  | 0,00        |
| 7       | 46,00  | 0,00        |
| 8       | 52,00  | 0,00        |
| 9       | 55,00  | 0,00        |
| 10      | 59,00  | 0,00        |
| 11      | 63,60  | 0,00        |
| 12      | 67,60  | 0,00        |
| 13      | 75,00  | 0,00        |
| 14      | 84,00  | 11,41       |
| 15      | 96,00  | 22,82       |
| 16      | 104,00 | 19,02       |
| 17      | 114,00 | 24,99       |
| 18      | 122,80 | 18,41       |
| 19      | 129,00 | 20,58       |
| 20      | 131,20 | 28,55       |
| 21      | 132,40 | 30,54       |
| 22      | 133,60 | 27,89       |
| 23      | 135,00 | 21,91       |
| 24      | 146,00 | 24,87       |
| 25      | 157,20 | 25,23       |
| 26      | 166,00 | 34,53       |
| 27      | 179,60 | 25,90       |
| 28      | 197,20 | 51,74       |
| 29      | 204,00 | 53,51       |
| 30      | 202,00 | 48,77       |
| 31      | 205,20 | 44,69       |

**Tabla XIV:** Puntos, distancias y sus correspondientes valores de  $B_{eq}$

En resumen, para cada punto de estudio se calcula el valor de pérdida debida a edificios ( $L_b$ ) y su correspondiente distancia equivalente de obstrucción de edificios ( $B_{eq}$ ), luego se relacionan estos valores de  $L_b$  y  $B_{eq}$ , y se determina la curva característica empírica del ambiente del

campus Prosperina ESPOL. En la tabla 15 se muestra los datos de  $L_b$  con su correspondiente valor de  $B_{eq}$ .

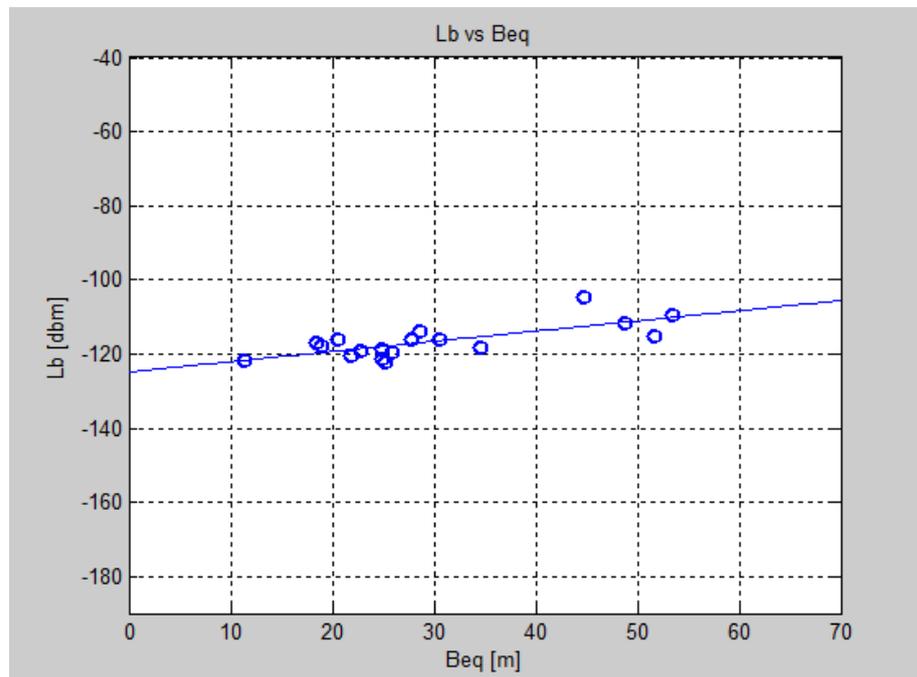
| $B_{eq}(A)$ | $L_b$   |
|-------------|---------|
| 11,41       | -121,65 |
| 18,41       | -116,90 |
| 19,02       | -118,01 |
| 20,58       | -116,12 |
| 21,91       | -120,70 |
| 22,82       | -119,26 |
| 24,87       | -121,38 |
| 24,99       | -118,92 |
| 25,23       | -122,08 |
| 25,90       | -119,66 |
| 27,89       | -115,88 |
| 28,55       | -113,74 |
| 30,54       | -116,08 |
| 34,53       | -118,07 |
| 44,69       | -104,89 |
| 48,77       | -111,57 |
| 51,74       | -115,13 |
| 53,51       | -109,34 |

**Tabla XV:** Valores relacionados de  $B_{eq}$  y  $L_b$

Luego del ajuste lineal de los datos se obtuvo la siguiente fórmula para  $L_b$  versus  $B_{eq}$ :

$$L_b = 0.2751B_{eq} - 124.81 \quad (3.7)$$

En la figura 3.16 se muestra un gráfico con la curva empírica de pérdida debida a los edificios. Se muestran los valores reales (tabla 15) y el ajuste lineal de los datos (ecuación 3.7).



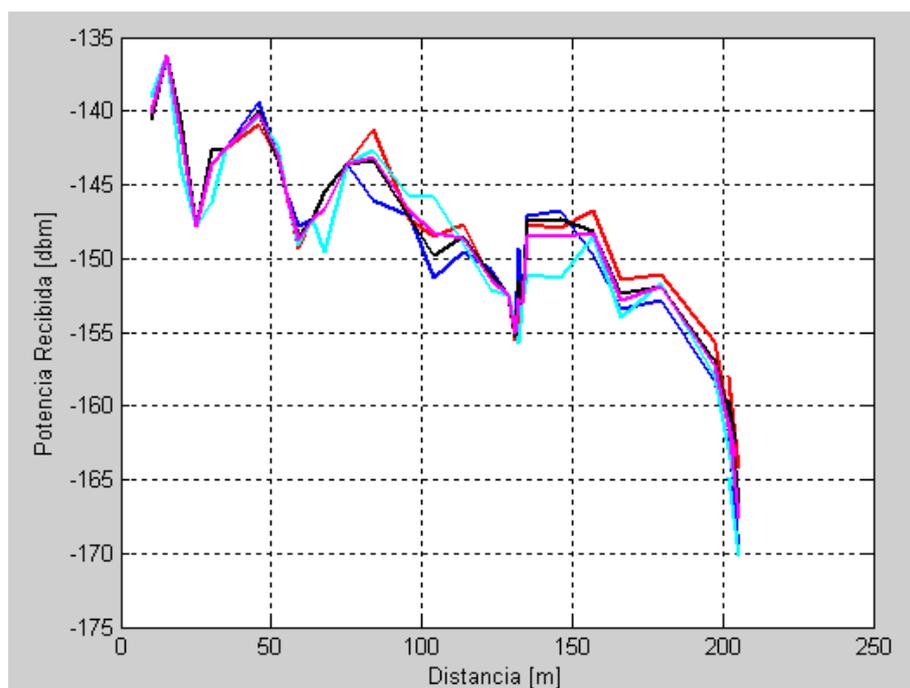
**Figura 3.16:** Curva empírica de pérdida de edificios del área de estudio  $L_b$  vs  $B_{eq}$

Con la obtención de la curva empírica se finaliza el proceso de construcción y ajuste del modelo. En este punto de desarrollo del proyecto el modelo queda totalmente descrito y finalmente reemplazando todos los parámetros ajustados en la ecuación 3.5 se obtiene la ecuación de predicción de potencia del modelo, expresada en dBm:

$$P_r(A) = -135.2 - \left( 20 \log \frac{4\pi d_A}{\lambda} \right) - (0.2751 B_{eq} - 124.81) \quad (3.8)$$

### 3.4.2 Análisis de la potencia recibida (PR)

En la figura 3.17 se muestran los resultados de las cinco series de las mediciones de potencia tomadas en la ruta de estudio.

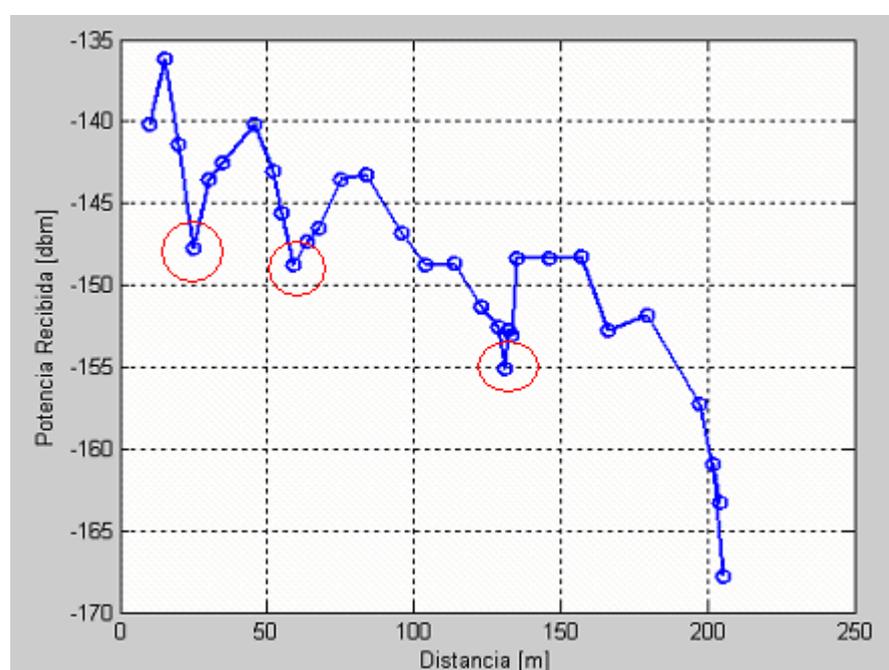


**Figura 3.17:** Curva de Potencia Recibida  $P_r(A)$  versus distancia  $d_A$

Se puede apreciar una tendencia lenta decreciente de la potencia recibida a medida que la distancia con respecto a la antena fuente se incrementa. Se observan también variaciones bruscas o rápidas de potencia en forma de picos y depresiones en algunos puntos de la curva. La pérdida de potencia promedio entre el punto inicial y el punto final de la ruta de estudio es aproximadamente -30 dBm.

### 3.4.3 Puntos singulares: efectos de difracción y multipaso

El análisis de la potencia recibida evidencia ciertos puntos especiales, en los cuales la potencia cae de manera abrupta formando picos en bajada que no siguen la tendencia de los demás puntos. En la figura 3.18 se muestra la curva de potencia recibida promedio versus distancia, en donde se puede apreciar los puntos referidos.



**Figura 3.18:** Puntos singulares en la ruta de estudio

El comportamiento de estos puntos se puede explicar gracias a dos conceptos importantes: difracción y multipaso.

El efecto de difracción aparece cuando una señal transmitida desvía su trayectoria de propagación debido al choque con algún obstáculo

encontrado en el camino de propagación. El efecto de desvanecimiento de multipaso provoca atenuación y distorsión de una señal debido a la propagación multicamino. Existen señales que se propagan a través de caminos directos y llegan al punto de recepción sin sufrir demasiada atenuación. En cambio existen señales que transitan caminos con obstáculos, la señal rebota en los obstáculos, se difracta y se atenúa o en el peor de los casos desaparece. De forma general estas señales llegan al punto de recepción, muy débiles. Casi cualquier señal transmitida es afectada por el desvanecimiento multipaso puesto que en la realidad no existen caminos de propagación libres de obstáculos. Los puntos singulares encontrados en la ruta de estudio, corresponden a sitios rodeados de edificios, en donde no existe un camino directo de propagación, la potencia recibida en aquellos puntos corresponde seguramente a la suma de potencia de señales multicamino, atenuadas por efecto de los rebotes con los edificios cercanos.

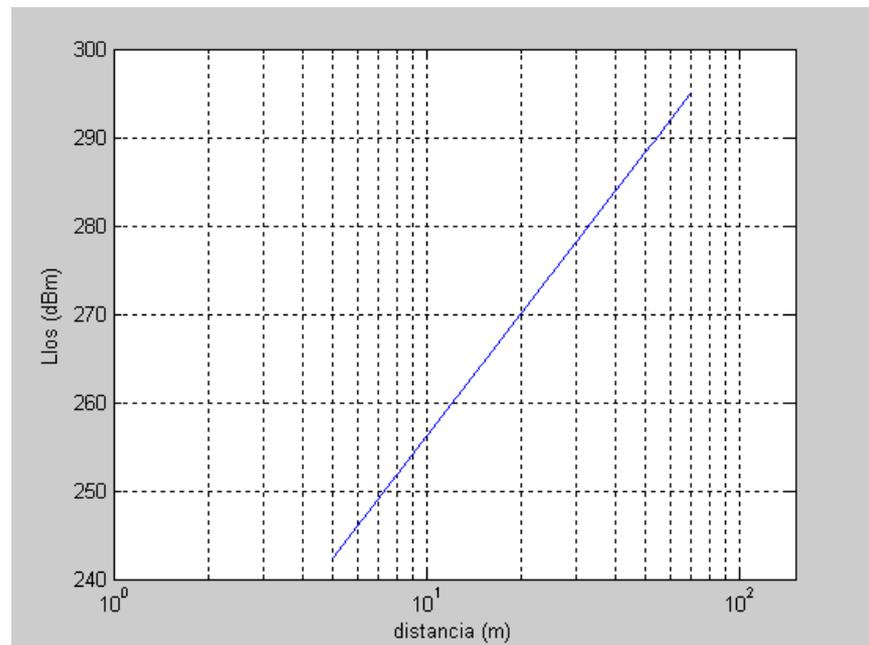
#### **3.4.4 Análisis de la potencia efectiva radiada (ERP)**

Tal como se vio en la sección 3.4.1 la potencia efectiva radiada (ERP) por una antena es un valor inherente a una fuente de radiación y es la diferencia entre la potencia transmitida de salida de una antena y las pérdidas atribuibles al sistema de transmisión tales como: pérdidas de

conectores y cables, directividad de la antena, etc. De forma general ERP es un valor conocido y que puede ser encontrado en la hoja de especificaciones de cualquier antena transmisora. En el caso de este trabajo, no fue posible disponer del valor ERP de la antena analizada, por este motivo fue necesario estimar dicho valor aplicando un procedimiento de extrapolación y cuyos resultados fueron mostrados en la sección 3.4.1. Como resultado se obtuvo un valor de ERP = -135,2 dBm.

#### **3.4.5 Análisis de la pérdida de línea de vista ( $L_{los}$ )**

A continuación en la figura 3.19 se presenta la curva de pérdida de línea de vista como resultado de la evaluación de la ecuación 2.2 usando las distancias entre la antena fuente y los puntos de estudio.

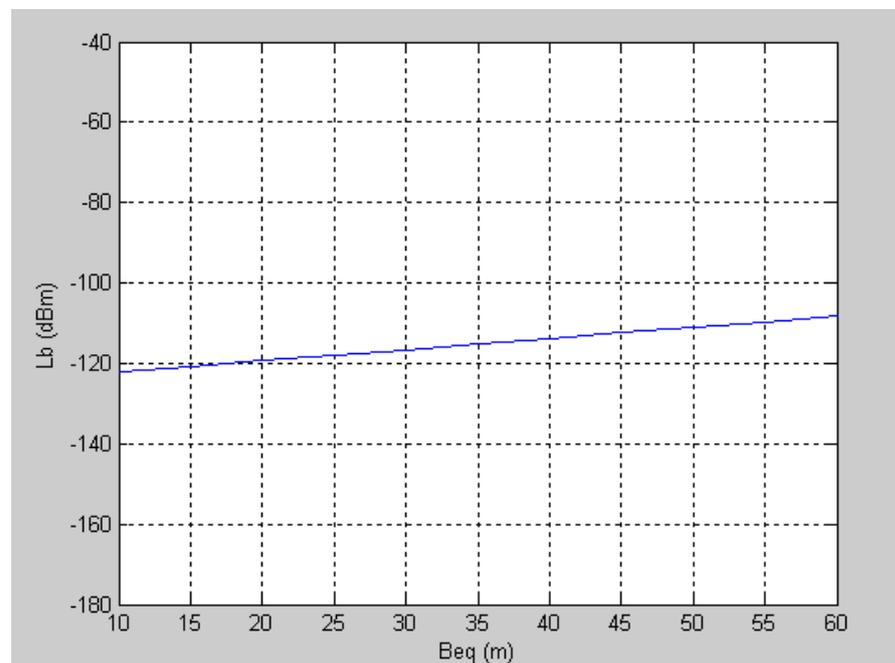


**Figura 3.19:** L<sub>los</sub> versus distancia

La curva es monótona creciente y como es evidente la pérdida aumenta a medida que la distancia de separación entre la fuente y el punto de estudio también aumenta.

### 3.4.6 Análisis de la pérdida debida a edificios ( $L_b$ )

A continuación en la figura 3.20 se muestra la curva resultante de la ecuación 3.7 de pérdida debida a edificios ( $L_b$ ) versus distancia efectiva de obstrucción ( $B_{eq}$ ) obtenida a partir del análisis de la topología semi-urbana del área de estudio.



**Figura 3.20:**  $L_b$  versus  $B_{eq}$

La curva es creciente y como es previsible la pérdida aumenta a medida que la obstrucción de los edificios aumenta. Cabe resaltar que la ecuación 3.2 hasta el valor de distancia máxima de obstrucción estudiado experimentalmente, esto es 60 metros aproximadamente. Basados en estudios similares es probable que a partir de ese valor la curva de obstrucción de edificios siga otra tendencia y eventualmente se vuelva constante.

### **3.5 Validación del modelo**

La validación consiste en comparar los resultados obtenidos con otros modelos existentes y con mediciones de campo con el objetivo de determinar el grado de precisión del modelo construido. Para este propósito se tomaron nueve puntos aleatorios en el área de estudio y a cada punto se lo sometió al siguiente análisis.

1. Aplicación del modelo de predicción de potencia de Lee obtenido.
2. Aplicación de un modelo genérico cualquiera de predicción de potencia.
3. Medición real de potencia.

Se obtiene por cada punto aleatorio tres valores de potencia: uno de la medición real, otro de la aplicación del modelo de Lee y el último de la

aplicación de un modelo genérico de predicción de potencia. Luego se comparan estos tres valores entre sí y se determina la precisión de las predicciones tomando como referencia el valor de la medición real de potencia. En la figura 3.21 se muestra un mapa con la ubicación de los puntos elegidos para probar el modelo.



**Figura 3.21:** Ubicación de los puntos de prueba del modelo

### 3.5.1 Comparación de predicciones versus mediciones de campo

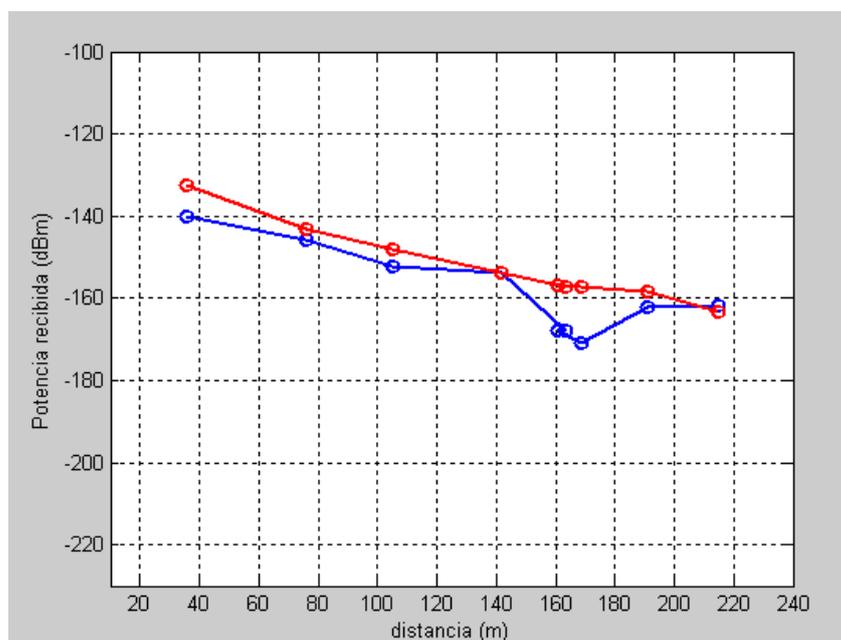
A continuación en la tabla 16 se presenta la comparación entre la predicción de potencia del modelo de Lee construido y las mediciones reales de potencia en los nueve puntos de prueba escogidos.



| PREDICCIÓN (dBm) | MEDICIÓN (dBm) |
|------------------|----------------|
| -132,67          | -140,07        |
| -143,06          | -145,62        |
| -148,00          | -152,08        |
| -153,85          | -153,76        |
| -157,07          | -168,00        |
| -156,84          | -167,88        |
| -157,27          | -170,78        |
| -158,34          | -161,97        |
| -163,26          | -161,88        |

**Tabla XVI:** Predicción del modelo construido versus Medición

En la figura 3.22 se muestra en un gráfico los valores de potencia de la tabla 16 versus distancia de los puntos de prueba con respecto a la antena.



**Figura 3.22:** Comparación entre el modelo de Lee construido (curva de color rojo) y las mediciones de campo (curva de color azul)

### 3.5.2 Comparación del modelo obtenido con otros existentes

Para realizar la comparación con otros modelos existentes se escogió el modelo Longley-Rice cuya fórmula de predicción de pérdida de paso es la siguiente:

$$L_p(A) = 81.14 + 39.40 \log(f_c) - 0.09 \log(h_a) + [15.80 - 5.73 \log(h_a)] \log(d_A)$$

(3.9)

Donde,

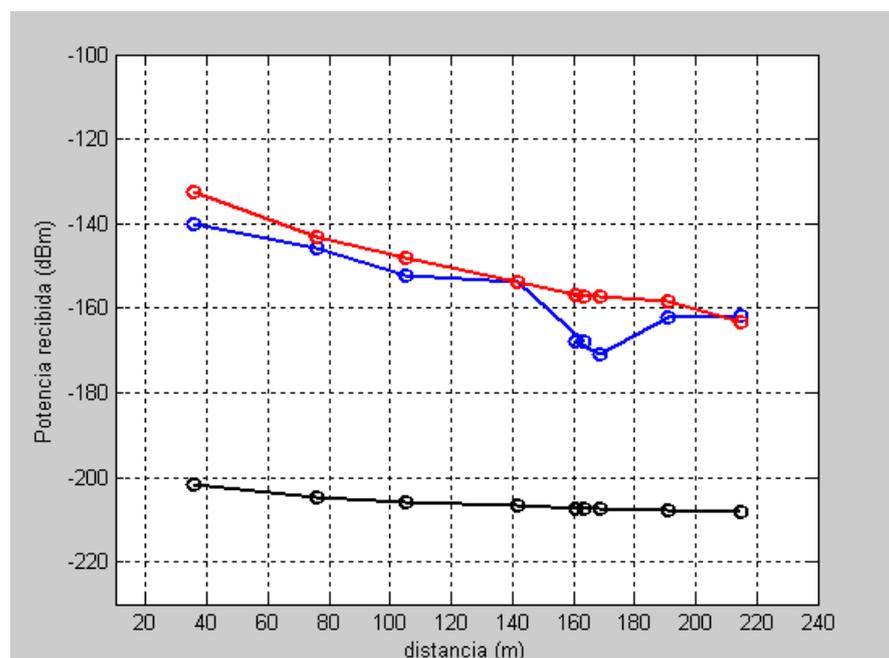
$L_p$  es la pérdida de paso en el punto A de estudio,  $f_c$  es la frecuencia central del canal analizado,  $h_a$  es la altura de la antena,  $d_A$  es la distancia entre el punto A de estudio y la antena.

A continuación en la tabla 17 se muestra la comparación entre el modelo de Lee construido, el modelo Longley-Rice y las mediciones reales de campo.

| MEDICION (dBm) | LONGLEY-RICE (dBm) | LEE (dBm) |
|----------------|--------------------|-----------|
| -140,07        | -201,79            | -132,67   |
| -145,62        | -204,54            | -143,06   |
| -152,08        | -205,71            | -148,00   |
| -153,76        | -206,79            | -153,85   |
| -168,00        | -207,31            | -157,07   |
| -167,88        | -207,25            | -156,84   |
| -170,78        | -207,43            | -157,27   |
| -161,97        | -207,88            | -158,34   |
| -161,88        | -208,31            | -163,26   |

**Tabla XVII:** Comparación entre el modelo de Lee construido, el modelo Longley Rice de prueba y las mediciones reales.

A continuación en la figura 3.23 se añade a las curvas mostradas en la figura 3.22, una curva (color negro) con los valores de predicción de potencia usando el modelo Longley Rice en los puntos de prueba, valores que fueron mostrados previamente en la tabla 17.



**Figura 3.23:** Comparación entre el modelo de Lee construido (curva de color rojo), el modelo Longley Rice (curva de color negro) y las mediciones de campo (curva de color azul).

# CAPÍTULO 4

## 4. DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA DIDÁCTICA

En este capítulo se presenta un breve análisis del estado actual de la enseñanza de las materias de Comunicaciones Inalámbricas y Propagación en la ESPOL y las motivaciones para el desarrollo de una herramienta didáctica que incorpore la experimentación a la enseñanza de los principales tópicos estudiados en estas materias. Se muestra además una descripción de la herramienta desarrollada en base al modelo de propagación construido y los recursos utilizados por la misma. Finalmente se muestra la forma como esta será usada por profesores y estudiantes como una práctica de laboratorio que permita reforzar los conocimientos sobre propagación aprendidos en clase.

#### **4.1 Antecedentes: estado actual de la enseñanza de Propagación y Comunicaciones Inalámbricas**

En los actuales momentos las asignaturas de Propagación y Comunicaciones Inalámbricas se encuentran dentro de la malla curricular de la carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones y ambas se dictan en la modalidad de materia teórica con una carga académica de cuatro horas a la semana.

Las materias cubren el tema de propagación de ondas electromagnéticas. En el caso de Propagación lo hace de manera general enfocándose en el estudio de los efectos de desvanecimiento de potencia en las ondas, provocados por obstáculos inherentes a ambientes exteriores, como, edificios, vegetación, diferencia de alturas, etc. En el caso de Comunicaciones Inalámbricas el tema de propagación se estudia con un enfoque a los sistemas celulares y se revisan los diferentes modelos de propagación desarrollados en el contexto de las microceldas y macroceldas celulares. Uno de los modelos estudiados en el programa de comunicaciones inalámbricas es justamente el modelo de Lee para microceldas, estudiado en este trabajo.

## **4.2 La aprehensión de conocimientos**

Aprehender, según el diccionario de la real academia de la lengua, significa adquirir conocimiento, asimilar o llegar a entender por medio del estudio o de la experiencia. En el ámbito científico, la forma de aprehender conocimientos está íntimamente relacionada con procesos de aprendizaje que incluyen actividades de experimentación. En este contexto: *“la educación vocacional siempre ha entendido que si se quiere enseñar a alguien cómo reparar un auto, se necesita un auto que reparar. ¿Quién ha escuchado alguna vez que se enseñe a nadar en un aula tradicional? De esta manera se está aprendiendo que: “Para enseñar realmente ciencia, se tiene que hacer ciencia”* “.

### **4.2.1 El aprendizaje basado en la experimentación**

Existen muchas actividades de carácter experimental que se realizan o pueden realizarse dentro del aula, como juegos y simulaciones. Los juegos son actividades generalmente cortas en el tiempo, en las que varios participantes compiten o colaboran, y que frecuentemente tienen la característica de ser divertidas. Por otro lado las simulaciones son experiencias de aprendizaje interactivas que tratan de ser espejo de una situación real, en donde, las decisiones que los participantes toman y las acciones que llevan a cabo, producen cambios y afectan la interacción de los elementos dentro del contexto de la simulación.

En cambio, la metodología de enseñanza práctica busca una formación de carácter experimental que se lleva a cabo fuera del aula. Se la conoce también como formación “outdoor” (ambiente exterior) o también enseñanza “hands-on” (mediante las manos), esta última comúnmente aplicada en el ámbito del aprendizaje de la ciencia.

El aprendizaje “hands-on” es ciertamente aprender haciendo. Aprendizaje “hands-on” mediante “doing-helping” (hacer y ayudar) significa que un estudiante adquiere conocimientos y habilidades fuera de los libros, a través de trabajos, juegos y otras experiencias. Los profesores, en conjunto con varias experiencias “hands-on”, principalmente en el área de las ciencias, se aseguran del entendimiento de los estudiantes de conceptos nuevos y familiares. El aprendizaje “hands-on” puede ser usado también para evaluar los conocimientos y la aprehensión de los mismos.

A medida que los estudiantes desarrollen técnicas para observar y evaluar todo lo que se encuentra alrededor de ellos, poco a poco aprenden el QUÉ, CÓMO, CUÁNDO y POR QUÉ de las cosas con las cuales interactúan. Estas experiencias son necesarias principalmente si se trata de potenciales jóvenes investigadores y científicos.

#### **4.2.2 La importancia de la experimentación**

Está ampliamente demostrado que es necesario un método de enseñanza-aprendizaje experimental que permita a los estudiantes entender de una mejor manera la parte teórica de un curso. Los procesos de aprendizaje experimentales aplicados a la enseñanza de las telecomunicaciones permiten que los conceptos estudiados sean asimilados, refinados y que finalmente se conviertan en conocimiento con bases fuertes.

#### **4.3 Motivaciones para el desarrollo de una herramienta didáctica basada en la experimentación**

Un ciclo de aprendizaje de las telecomunicaciones se inicia en las aulas de clases con la enseñanza de nuevos conceptos, teorías, leyes, etc. Se analizan los temas, se los estudia y luego se los evalúa teóricamente. Este método tradicional no permite culminar el ciclo de aprendizaje, a partir de esto, se requiere un último paso que consiste en la experimentación, para poder finalmente conceptualizar lo estudiado y lograr un ciclo completo de aprendizaje.

Para el caso de la enseñanza de Comunicaciones Inalámbricas y Propagación en la ESPOL, se sabe que los estudiantes reciben clases teóricas, donde se les alimenta con nuevos conocimientos, analizados y demostrados en el pasado y simplemente se los toma como válidos.

Esto desarrolla una actitud de observación y análisis, donde se trata de pensar en ciertos patrones, pero nada profundo, debido a que no se espera comprobar ningún resultado. Por otra parte, es verdad que los estudiantes se acercan a la etapa de experimentación aplicando sus conocimientos en deberes, tareas, proyectos, laboratorios de simulación, etc., pero aquello no permite concluir el ciclo de enseñanza completamente. Se requiere la fijación de una hipótesis, pensar en ciertos patrones en la vida real y finalmente buscar la forma de comprobar aquella hipótesis teniendo una experiencia práctica fuera del aula.

El desarrollo de una práctica de laboratorio como herramienta didáctica que incorpore la experimentación a la enseñanza de Comunicaciones Inalámbricas y Propagación permitirá a los estudiantes abstraer los conocimientos estudiados, y luego ser capaces de lograr tomar aquellos conocimientos como propios, después de haber observado, indagado, pensado y finalmente experimentado.

Terminado el ciclo, un punto muy importante para la verdadera ingeniería es dar inicio a un nuevo ciclo de aprendizaje mediante nuevas hipótesis basadas en lo aprendido.

#### **4.4 Descripción de la herramienta**

La herramienta desarrollada es una práctica de laboratorio que consiste en la validación del modelo de propagación de la antena GSM del ciclo básico de la ESPOL que fue obtenido utilizando la metodología de Lee. La herramienta tiene como objetivo complementar el material teórico sobre modelos de propagación dictado en las materias de Propagación y Comunicaciones Inalámbricas.

La práctica está basada en el análisis realizado en el área de ingenierías del campus Gustavo Galindo de la ESPOL y está compuesta por siete pasos diseñados para ilustrar la aplicación de los conceptos y metodología de Lee para obtener el modelo de propagación. A continuación se muestra una descripción general de la herramienta y se explica punto a punto los pasos a desarrollar. La práctica consta de siete partes:

- 1) Introducción
- 2) Objetivos
- 3) Fundamentos teóricos
- 4) Equipos y materiales
- 5) Desarrollo de la práctica
- 6) Cálculos y resultados
- 7) Conclusiones

La práctica será realizada por los estudiantes con la guía del profesor luego del estudio de los conceptos teóricos acerca de modelos de propagación. A continuación se presenta la introducción de la práctica.

**Práctica # 1**

**Modelos de propagación: Aplicación del principio de modelamiento de LEE para microceldas celulares.**

**1. Introducción**

Un importante tema de estudio dentro del área de las comunicaciones inalámbricas, consiste en el análisis de los esquemas de modelamiento de propagación de señal. A partir de estos modelos, se puede predecir el comportamiento de una señal inalámbrica y los efectos que los diferentes tipos de ambientes exteriores puedan tener sobre ella.

**Figura 4.1:** Introducción de la práctica desarrollada

El principal objetivo de la práctica consiste en comprobar la validez del modelo de propagación de Lee desarrollado en este trabajo, a través de mediciones de potencia. A continuación se presentan en detalle todos los objetivos.

**2. Objetivos**

- Corroborar la validez de un modelo de propagación de una antena celular GSM, realizando mediciones de potencia usando un analizador espectral.
- Identificar las diferentes causas de desvanecimiento de señal: espacio libre, edificios, vegetación, efecto de multipaso, efecto de difracción, etc.
- Poner en práctica los conocimientos de modelos de propagación aprendidos en el curso de comunicaciones inalámbricas.

**Figura 4.2:** Objetivos de la práctica

A continuación se presentan los equipos y materiales usados.

- 4. Equipos y materiales**
- Equipo necesario
    - Analizador espectral NARDA SRM 3000
  - Material de apoyo
    - Mobile Communications Engineering: Theory and Application, William C.Y. Lee.
    - Wireless Communication: Principles and Practice, T. Rappaport.
    - Introduction to RF Propagation, Jhon S. Seybold.

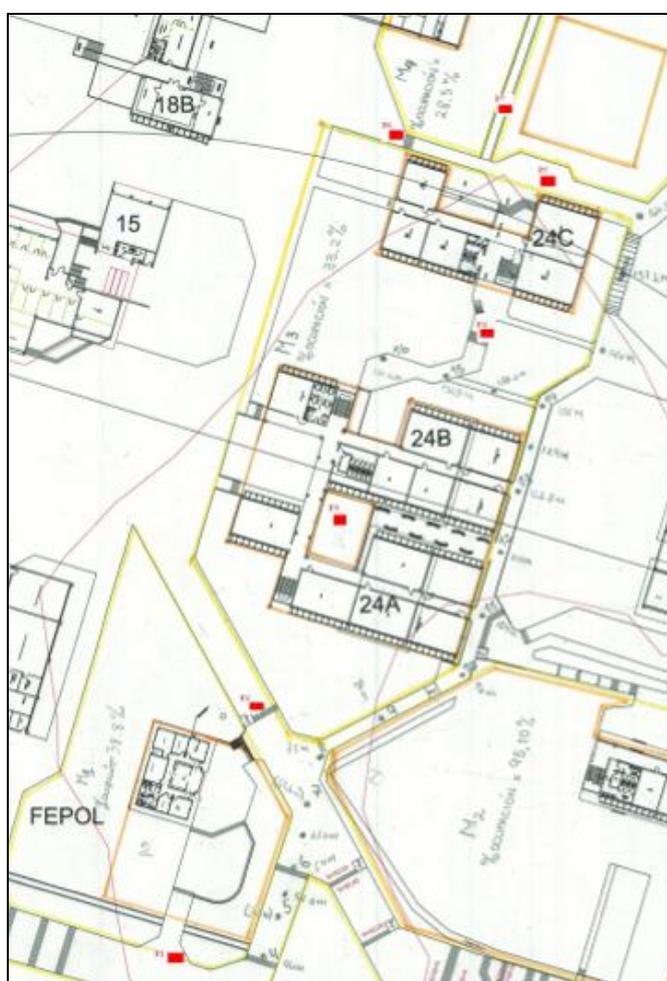
**Figura 4.3:** Equipos y materiales usados

A continuación se presenta el procedimiento que describe el desarrollo de la práctica.

- 5. Desarrollo de la práctica**
- Procedimiento:**
- 5.1. Establecer la ruta y los puntos donde se aplicará el modelo
  - 5.2. Digitalizar las manzanas alrededor de la ruta escogida.
  - 5.3. Calcular el porcentaje de ocupación de edificios de cada manzana.
  - 5.4. Calcular la pérdida de línea de vista en cada punto de la ruta usando la ecuación propuesta por el modelo
  - 5.5. Calcular la distancia efectiva ( $B_{eq}$ ) de obstrucción de edificios en cada punto de la ruta.
  - 5.6. Encontrar  $L_b$  para el valor  $B_{eq}$  usando la curva propuesta del modelo.
  - 5.7. Encontrar la potencia de la señal en cada punto de la ruta usando la ecuación del modelo.
  - 5.8. Medir con el analizador espectral NARDA SRM 3000 la potencia recibida de la señal en cada punto de la ruta.
  - 5.9. Comparar los resultados de la medición (punto 5.8) con los resultados de la predicción (punto 5.7). Realice un gráfico y determine el porcentaje de error en cada punto.

**Figura 4.4:** Desarrollo de la práctica

El primer paso para el desarrollo del procedimiento consiste en determinar los puntos de estudio en donde se realizarán las mediciones de potencia. Los puntos deberán ser estratégicos donde exista obstrucción de edificios, vegetación, etc., de manera que resulten interesantes de analizar, luego se los ubica en un plano digital. En la figura 4.5 se muestra un ejemplo de la ubicación de los puntos de estudio determinados para la práctica (marcas de color rojo).



**Figura 4.5:** Puntos de estudio de la práctica

El siguiente paso consiste en la cuantificación de los parámetros de ocupación y obstrucción de edificios. Luego de esto se aplicará la ecuación del modelo en cada punto de estudio y finalmente se obtiene el valor de potencia predicho por el modelo. A continuación en la figura 4.6 se muestra una plantilla de excel donde los estudiantes realizarán el procesamiento de los datos de la práctica.

| POTENCIA OBTENIDA BASADA EN EL MODELO DE LEE |           |    |    |    |    |    |     |        |        |         |                               |
|--|-----------|----|----|----|----|----|-----|--------|--------|---------|-------------------------------|
| Punto  | Distancia | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | Beq | ERP    | Llos   | Lb      | Potencia predecida del modelo |
| P1   | 76        | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0   | -135.2 | 128.87 | -124.81 | -139.26                       |
| P2   | 105       | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0   | -135.2 | 131.68 | -124.81 | -142.07                       |
| P3   | 141.6     | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0   | -135.2 | 134.27 | -124.81 | -144.66                       |
| P4   | 191       | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0   | -135.2 | 136.87 | -124.81 | -147.26                       |
| P5   | 214.8     | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0   | -135.2 | 137.89 | -124.81 | -148.28                       |

**Figura 4.6:** Plantilla de procesamiento de datos de la práctica

Usando la plantilla de excel, el estudiante solo tendrá que determinar las distancias de cada punto con respecto a la antena y las distancias de obstrucción de cada manzana (M1 a M5) trazando una línea recta desde la antena hacia cada punto de estudio. Automáticamente la plantilla generará el valor de la distancia de obstrucción equivalente ( $B_{eq}$ ), y evaluará los términos de la ecuación del modelo (ERP,  $L_{los}$ ,  $L_b$ ) determinando el valor de predicción de potencia.

Luego de completar los cálculos de predicción, se realizarán las mediciones de potencia los puntos de estudio usando el analizador

espectral NARDA SRM 3000. A continuación en la figura 4.7 se presenta una plantilla de excel donde se tabularán los valores de potencia medidos.

| POTENCIA MEDIDA POR NARDA |         |        |                                   |                   |        |
|---------------------------|---------|--------|-----------------------------------|-------------------|--------|
| Punto                     | E(mV/m) | E(V/m) | $P_d = E^2/n$ [W/m <sup>2</sup> ] | $P = P_d.A_e$ [W] | P(dBm) |
| P1                        |         | 0.000  | 0                                 | 0                 | #NUM!  |
| P2                        |         | 0.000  | 0                                 | 0                 | #NUM!  |
| P3                        |         | 0.000  | 0                                 | 0                 | #NUM!  |
| P4                        |         | 0.000  | 0                                 | 0                 | #NUM!  |
| P5                        |         | 0.000  | 0                                 | 0                 | #NUM!  |

**Figura 4.7:** Plantilla de los valores de potencia medidos

Los valores obtenidos en la medición, se compararán con los valores predichos por el modelo de propagación y se calculará el margen de error entre la medición real y la predicción. Finalmente el estudiante escribirá sus conclusiones y recomendaciones acerca de la experiencia.

#### 4.5 Recursos usados para la construcción de la herramienta

En esta sección se presentan brevemente los recursos utilizados para el desarrollo de la práctica de laboratorio.

##### 4.5.1 Procedimiento de predicción de Lee para microceldas

El procedimiento de Lee para microceldas fue la base para el desarrollo del modelo de propagación en el que está basado la práctica de

laboratorio. El procedimiento plasma los conceptos de Lee para el análisis del desvanecimiento de potencia causado por obstáculos pertenecientes a ambientes urbanos y semi urbanos

#### 4.5.2 Analizador espectral NARDA SRM 3000

El analizador espectral es usado para medir la potencia de la antena, recibida en cada punto de estudio. Los valores obtenidos se compararán con los predichos por el modelo de propagación.



**Figura 4.8:** Analizador espectral NARDA SRM 3000 y su antena correspondiente

### 4.5.3 MATLAB

El lenguaje de programación MATLAB fue usado para la organización, procesamiento y generación de curvas usando los datos recolectados en la práctica.

```

3 - close all;
4 - clear;
5 - clc;
6 - %Distancia
7 - distancia = xlsread('mediciones.xls','Hoja1','a3:a25');
8 - %Potencia recibida 1,2,3
9 - potenciaRx1 = xlsread('mediciones.xls','Hoja1','b3:b25');
10 - potenciaRx2 = xlsread('mediciones.xls','Hoja1','c3:c25');
11 - potenciaRx3 = xlsread('mediciones.xls','Hoja1','d3:d25');
12 - potenciaRxPromedio = xlsread('mediciones.xls','Hoja1','e3:e25');
13 - Lb = xlsread('mediciones.xls','Hoja1','b39:b44');
14 - Lb1 = xlsread('mediciones.xls','Hoja1','c39:c46');
15 - Lb2 = xlsread('mediciones.xls','Hoja1','d39:d46');
16 - Lb3 = xlsread('mediciones.xls','Hoja1','e39:e46');
17 - Lb4 = xlsread('mediciones.xls','Hoja1','f39:f46');
18 - Beq = xlsread('mediciones.xls','Hoja1','a39:a44');
19
20 - figure(1)
21 - plot(distancia,potenciaRx2,'-r','LineWidth',1.5)
22 - hold on
23 - plot(distancia,potenciaRx3,'-m','LineWidth',1.5)
24 - hold on
25 - plot(distancia,potenciaRx1,'-ob','LineWidth',3)
26 - grid on
27 - title('Medición 1');
28 - xlabel('Distancia [m]');
29 - ylabel('Potencia Recibida [dbm]');
30
31 - figure(2)
32 - plot(distancia,potenciaRx1,'-b','LineWidth',1.5)

```

**Figura 4.9:** Script programado en MATLAB para el procesamiento de datos de la práctica.

### 4.5.4 Otros recursos

El programa de hojas de cálculo “Excel” fue usado para crear plantillas de datos, que luego son procesadas por MATLAB. Por último, un mapa digital del área de estudio es usado para identificar los puntos en dónde se realizarán las pruebas de potencia para la práctica.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

- 1) Aunque las condiciones de entorno que caracterizan al área de cobertura no coincide completamente con las del modelo de Lee, como se explica en la sección 3.1, se pudo comprobar que ajustando el modelo basándose en valores reales obtenidos en muestreos aleatorios, éste da como resultado valores de predicción con un margen de error pequeño, con lo cual se concluye que el modelo de Lee se ajusta al entorno que caracteriza al Campus de la ESPOL.
  
- 2) El comportamiento de la señal celular que emite la antena ubicada en el ciclo básico del Campus Gustavo Galindo de la ESPOL, tiene puntos incongruentes con respecto al modelo matemático desarrollado, los cuales se explican como variaciones causadas por efectos de refracción y de superposición de señales difractadas, las cuales por tener diferentes fases y amplitudes, en ciertos espacios provoca que se cancelen componentes, causando bajos niveles de señal.
  
- 3) Comparando con un modelo teórico de propagación para el mismo tipo de ambientes, se comprueba que la expresión matemática obtenida con un procedimiento semi-empírico,

- 4) describe de manera más precisa el comportamiento real de la señal celular analizada. El análisis de datos reales, da al modelo matemático obtenido mayor precisión en la predicción del comportamiento de la señal estudiada.
  
- 5) El procedimiento llevado a cabo para desarrollar el modelo de propagación, así como el proceso de comprobación, se han modificado en el capítulo cuatro, para que sea utilizado en clases como herramienta de aprendizaje, para que el fenómeno de propagación de señales RF sea comprendido de manera práctica y directa.

## **APÉNDICES**

## **APÉNDICE A**

### **Modelos de propagación: Aplicación del principio de modelamiento de LEE para microceldas celulares.**

#### **1. Introducción**

Un importante tema de estudio dentro del área de las comunicaciones inalámbricas, consiste en el análisis de los esquemas de modelamiento de propagación de señal. A partir de estos modelos, se puede predecir el comportamiento de una señal inalámbrica y los efectos que los diferentes tipos de ambientes exteriores puedan tener sobre ella.

#### **2. Objetivos**

- Corroborar la validez de un modelo de propagación de una antena celular GSM, realizando mediciones de potencia usando un analizador espectral.
- Identificar las diferentes causas de desvanecimiento de señal: espacio libre, edificios, vegetación, efecto de multipaso, efecto de difracción, etc.
- Poner en práctica los conocimientos de modelos de propagación aprendidos en el curso de comunicaciones inalámbricas.

### **3. Equipos y materiales**

- Equipo necesario
  - Analizador espectral NARDA SRM 3000
  
- Material de apoyo
  - Mobile Communications Engineering: Theory and Application, William C.Y. Lee.
  - Wireless Communication: Principles and Practice, T. Rappaport.
  - Introduction to RF Propagation, Jhon S. Seybold.

### **4. Desarrollo de la práctica**

#### **Procedimiento:**

4.1. Establecer la ruta y los puntos donde se aplicará el modelo

Dichos puntos están escogidos en el mapa, y son los puntos que más se asemejan al modelo de propagación. (Ver Anexo 2)

4.2. Digitalizar las manzanas alrededor de la ruta escogida.

Las manzanas están ya digitalizadas y a escala en el plano que la ESPOL nos entregó.

4.3. Calcular el porcentaje de ocupación de edificios de cada manzana.

Este porcentaje de ocupación es debido al área que ocupa el edificio en la manzana. Este se calcula haciendo la división entre el área de los edificios en la manzana para el área total de la manzana.

$$P_i = \frac{A_e}{A_t},$$

Donde  $P_i$ , densidad de ocupación de la  $i$ -ésima cuadra,  $A_e$  área de ocupación de los edificios en la  $i$ -ésima cuadra y  $A_t$  área total de la  $i$ -ésima cuadra.

4.4. Calcular la pérdida de línea de vista en cada punto de la ruta usando la ecuación propuesta por el modelo.

$$L_{los} = -\left(20 \log \frac{4\pi d_A}{\lambda}\right)$$

4.5. Calcular la distancia efectiva ( $B_{eq}$ ) de obstrucción de edificios en cada punto de la ruta.

$$B_{eq}(A) = a.P_a + b.P_b + c.P_c$$

4.6. Encontrar  $L_b$  para el valor  $B_{eq}$  usando la curva propuesta del modelo.

4.7. Encontrar la potencia de la señal en cada punto de la ruta usando la ecuación del modelo.

$$P_r(A) = ERP - L_{los}(d_A) - L_b(B_{eq}(A))$$

4.8. Medir con el analizador espectral NARDA SRM 3000 la potencia recibida de la señal en cada punto de la ruta.

4.9. Comparar los resultados de la medición (punto 5.8) con los resultados de la predicción (punto 5.7). Realice un gráfico y determine el porcentaje de error en cada punto.

## 5. Cálculos y resultados

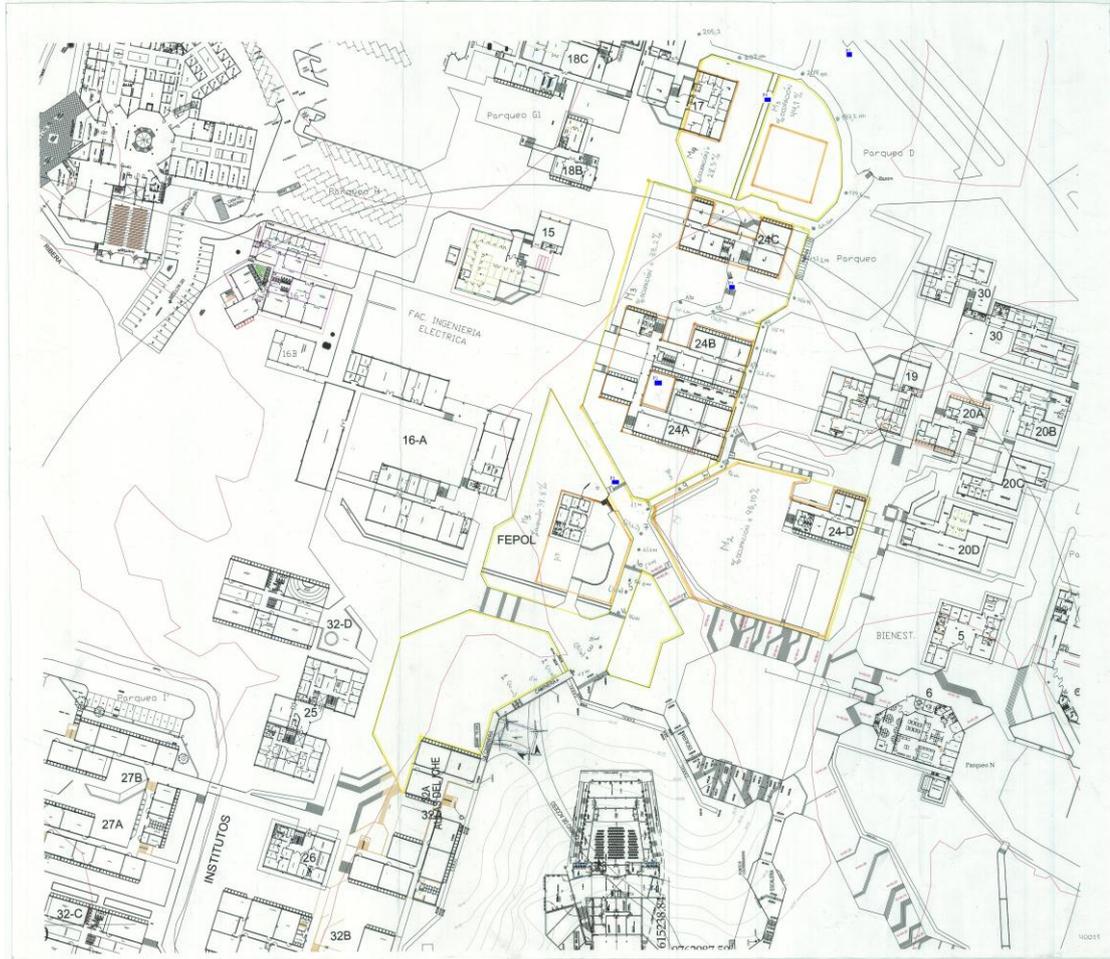
| TABLA DE POTENCIAS MEDIDAS CON EL INSTRUMENTO |         |        |                                   |                         |        |
|---|---------|--------|-----------------------------------|-------------------------|--------|
| Punto   | E(mV/m) | E(V/m) | $P_d = E^2/n$ [W/m <sup>2</sup> ] | $P = P_d \cdot A_e$ [W] | P(dBm) |
| P1  |         |        |                                   |                         |        |
| P2  |         |        |                                   |                         |        |
| P3  |         |        |                                   |                         |        |
| P4  |         |        |                                   |                         |        |
| P5  |         |        |                                   |                         |        |

| PREDICCIÓN DE POTENCIA BASADA EN EL MODELO DE LEE |           |    |    |    |    |    |
|---|-----------|----|----|----|----|----|
| Punto   | Distancia | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 |
| P1  | 76        |    |    |    |    |    |
| P2  | 105       |    |    |    |    |    |
| P3  | 141.6     |    |    |    |    |    |
| P4  | 191       |    |    |    |    |    |
| P5  | 214.8     |    |    |    |    |    |

| PREDICCIÓN DE POTENCIA BASADA EN EL MODELO DE LEE |           |     |     |      |    |                     |
|---|-----------|-----|-----|------|----|---------------------|
| Punto   | Distancia | Beq | ERP | Llos | Lb | P. predecida modelo |
| P1  | 76        |     |     |      |    |                     |
| P2  | 105       |     |     |      |    |                     |
| P3  | 141.6     |     |     |      |    |                     |
| P4  | 191       |     |     |      |    |                     |
| P5  | 214.8     |     |     |      |    |                     |

## 6. Conclusiones

# APÉNDICE B



## **BIBLIOGRAFÍA**

1. SEYBOLD JHON S., Introduction to RF Propagation, Jhon Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2005, páginas 3-6, 14, 18, 20-21, 67, 134-138, 141-144, 146-153.
2. HORAK RAY, New World Telecommunication Dictionary, Wiley Publishing, Indianápolis, 2008, páginas 90-92, 164-165, 213-214.
3. LEE C. WILLIAMS, Mobile Communication Engineering, McGraw-Hill, New York, 1998, páginas 153-159.
4. SUPERINTENDENCIA DE TELECOMUNICACIONES, Quito, Ecuador, 2008.

5. FRITSCHI P., EICHER B., LEHMANN H, Reproducibility of GSM and UMTS-EMF measurements, Swisscom, Berna, Suiza, páginas 1-4.
  
6. MANTILLA CONTRERAS ESTEFANIA E., Aplicación del modelo de Kolb en la enseñanza de las Telecomunicaciones basadas en mediciones de densidad de potencia utilizando el analizador espectral NARDA SRM-3000, ESPOL, Guayaquil, Ecuador, 2009, página 1.