

# **SIMULADOR BÁSICO A NIVEL DE SISTEMA PARA LTE**



**Claudia Shirley Paz Arteaga  
Eileen Johana Martínez Gómez**

*Universidad del Cauca*

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
Grupo de Radio e Inalámbricas - GRIAL  
Popayán, 2014**

# **SIMULADOR BÁSICO A NIVEL DE SISTEMA PARA LTE**



**Anexos y apéndices del trabajo de grado presentado como requisito para  
obtener el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

**Claudia Shirley Paz Arteaga  
Eileen Johana Martínez Gómez**

**Director  
Ing. Claudia Milena Hernández Bonilla**

*Universidad del Cauca*

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
Grupo de Radio e Inalámbricas - GRIAL  
Popayán, 2014**



# TABLA DE CONTENIDO APÉNDICES Y ANEXOS

APÉNDICE A: ACUERDO DE LICENCIA .....	1
A.1. INTRODUCCIÓN .....	1
A.2. CLAUSULAS.....	1
APÉNDICE B: VERIFICACIÓN DEL SIMULADOR .....	2
B.1. INTRODUCCIÓN .....	2
B.2. VERIFICACION DE REQUERIMIENTOS .....	2
APÉNDICE C: MANUAL DE USUARIO .....	30
C.1. INTRODUCCIÓN .....	30
C.2. ARCHIVOS DEL SIMULADOR.....	30
C.3. INTERFAZ DEL SIMULADOR .....	31
C.4. RESULTADOS .....	35
C.5. RECOMENDACIONES.....	45
ANEXO A: MODELOS DE PROPAGACIÓN .....	47
A.1. Espacio Libre .....	48
A.2. COST HATA .....	49
A.3. COST Walfish Ikegami.....	50
A.4. TR 36.942 .....	54
ANEXO B: CARACTERÍSTICAS DE ANTENA .....	56
B.1. Patrón de Radiación de Antena .....	56
B.2. Directivad .....	58
B.3. Ganancia.....	59



## APÉNDICE A: ACUERDO DE LICENCIA

---

B.4. Tipos de Antena Según la Directividad .....	59
B.5. Altura de la antena .....	60
B.6. Angulo de elevación de antena .....	60
B.7. Azimut de antena .....	61
ANEXO C: GEOMETRÍA DE CELDA.....	62
ANEXO D: BALANCE DEL ENLACE .....	64
ANEXO E: DESVANECIMIENTO .....	66
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS ANEXOS .....	68



## ÍNDICE DE FIGURAS APÉNDICES Y ANEXOS

Figura Ap.B1 Escenario con cuatro eNBs fijos y usuarios distribuidos aleatoriamente – Prueba 1 .....	4
Figura Ap.B2 Mapa de colores de las distancias entre eNB de cada celda y puntos de recepción en el escenario .....	7
Figura Ap.B3 Potencia de recepción percibida por los puntos del escenario .....	10
Figura Ap.B5 Potencia de recepción con efecto del desvanecimiento – Antena katherinein 742215 .....	15
Figura Ap.B6 Potencia de recepción para la celda 1 cuando el eNB radia con una antena Katherinein 742215.....	16
Figura Ap.B7 Potencia de recepción para todos los sectores de la celda 2 del sistema.....	17
Figura Ap.B8 Distribución aleatoria de usuarios en el escenario sectorizado .....	18
Figura Ap.B9 Distribución aleatoria de 10 usuarios en el escenario con 4 celdas hexagonales.....	20
Figura Ap.C1 Interfaz principal del simulador básico a nivel de sistema para LTE	32
Figura Ap.C2 Interfaz de cálculo de capacidad del simulador básico a nivel de sistema para LTE .....	33
Figura Ap.C3 Interfaz de cálculo de cobertura del simulador básico a nivel de sistema para LTE .....	34
Figura Ap.C4 Potencia de Recepción para el sector 1 de todas las celdas .....	37
Figura Ap.C5 Potencia de Recepción para el sector 1 de todas las celdas – Con desvanecimiento .....	38
Figura Ap.C6 Potencia de Recepción para el sector 2 de todas las celdas .....	39
Figura Ap.C7 Potencia de Recepción para el sector 2 de todas las celdas – Con desvanecimiento .....	39
Figura Ap.C8 Potencia de Recepción para el sector 3 de todas las celdas .....	40



## APÉNDICE A: ACUERDO DE LICENCIA

---

Figura Ap.C9 Potencia de Recepción para el sector 3 de todas las celdas – Con desvanecimiento .....	41
Figura Ap.C10 Escenario de simulación para cálculo de capacidad .....	41
Figura Ap.C11 Histograma de SINR para las todas las celdas del sistema .....	42
Figura Ap.C12 Histograma de <i>throughput</i> para todas las celdas del sistema .....	43
Figura Ap.C13 Histograma del <i>throughput</i> promedio de sistema .....	43
Figura Ap.C15 CDF del <i>throughput</i> para todas las celdas del sistema .....	44
Figura Ap.C16 CDF del <i>throughput</i> promedio del sistema .....	44
Figura Ap.C17 CDF de la SINR promedio del sistema .....	45
Figura Ap.C18 Mensaje de información. ....	46
Figura A.1 Descripción del ángulo $\varphi$ para el modelo Walfish Ikegami.....	51
Figura A.2 Escenario que considera el modelo de propagación Walfish Ikegami. 51	
Figura B.1 Patrón de radiación tridimensional de una antena .....	57
Figura B.2 Patrón de radiación tridimensional, horizontal y vertical para una antena dipolo .....	58
Figura B.3 Patrón de radiación de antena omnidireccional (derecha) y directiva (izquierda).....	59
Figura B.4 Tilt de antena .....	61
Figura B.5 Azimut de antena .....	61
Figura C.1 Geometría circular de celda.....	62
Figura C.2 Geometría hexagonal de celda.....	63
Figura E.1 Pérdidas de trayectoria, desvanecimiento por sombra, desvanecimiento por multitrayectoria versus la distancia .....	67



## ÍNDICE DE TABLAS APÉNDICES Y ANEXOS

Tabla Ap.B1 Tabla de chequeo de requerimientos para el simulador .....	3
Tabla Ap.B2 Descripción prueba 1 .....	4
Tabla Ap.B3 Descripción prueba 2 .....	5
Tabla Ap.B4 Posición de los puntos de recepción muestra y los eNB .....	6
Tabla Ap.B5 Distancia entre los puntos muestra del escenario y cada eNB .....	7
Tabla Ap.B6 Descripción prueba 3 .....	8
Tabla Ap.B7 Pérdidas de propagación calculadas por el simulador para los puntos de recepción.....	9
Tabla Ap.B8 Potencia de recepción calculada por el simulador para los puntos de recepción.....	10
Tabla Ap.B9 Descripción prueba 4 .....	11
Tabla Ap.B10 Posición de los puntos de recepción muestra y el eNB 4 .....	12
Tabla Ap.B11 Distancia Angular y ganancia para los puntos de recepción.....	13
Tabla Ap.B12 Descripción prueba 5 .....	14
Tabla Ap.B13 Descripción prueba 6 .....	16
Tabla Ap.B14 Descripción prueba 7 .....	17
Tabla Ap.B15 Descripción prueba 8 .....	18
Tabla Ap.B16 Descripción prueba 9 .....	19
Tabla Ap.B17 Descripción prueba 10 .....	21
Tabla Ap.B18 Descripción prueba 11 .....	22
Tabla Ap.B19 Coordenadas de ubicación de los equipos de usuario y los eNB ...	22
Tabla Ap.B20 Valores de distancia entre los equipos de usuario y los eNB del sistema.....	22



## APÉNDICE A: ACUERDO DE LICENCIA

---

Tabla Ap.B21 Potencia percibida por los usuarios desde cada eNB calculada por el simulador.....	23
Tabla Ap.B22 Potencias interferentes de los eNB vecinos a los equipos de usuario .....	24
Tabla Ap.B23 Descripción prueba 12 .....	24
Tabla Ap.B24 Valor de SINR para los 3 equipos de usuario de prueba .....	26
Tabla Ap.B25 Descripción prueba 13 .....	27
Tabla Ap.B26 Velocidades de transmisión de datos pico en el DL (Mbps) .....	27
Tabla Ap.B27 Valores de <i>throughput</i> alcanzados por el simulador .....	28
Tabla Ap.B28 Descripción prueba 14 .....	29
Tabla Ap.C1 Parámetros variables para el cálculo de capacidad en el simulador básico a nivel de sistema para LTE .....	34
Tabla Ap.C2 Parámetros variables para el cálculo de cobertura en el simulador básico a nivel de sistema para LTE .....	35
Tabla Ap.C3 Resultados para el bloque de cálculo de capacidad y el bloque de cálculo de cobertura .....	36
Tabla Ap.C4 Número máximo de equipos de usuario por sector según el ancho de banda .....	46
Tabla A.1 Radio típico para tipos de celda.....	49
Tabla A.2 Rango de valores permitidos en COST Hata.....	50
Tabla A.3 Parámetros considerador por el modelo de propagación Walfish Ikegami.....	51
Tabla A.4 Rango de valores para parámetros de COST-WI .....	54
Tabla B.1 Altura de antena y ganancia para macro celdas .....	60
Tabla D.1 Parametros del balance del enlace descendente.....	64





## LISTA DE ACRÓNIMOS APÉNDICES Y ANEXOS

<b>EURO-COST</b>	Cooperativa Europea para la Investigación Científica y Técnica, <i>European Co-operative for Scientific and Technical research</i>
<b>LOS</b>	Línea De Vista, <i>Line Of Sight</i>
<b>MSDL</b>	Pérdidas Múltiples por Difracción, <i>Multi Screen Diffraction Loss</i>
<b>NLOS</b>	Sin Línea De Vista, <i>Non Line Of Sight</i>
<b>PL</b>	Pérdida de Trayectoria, <i>Path Loss</i>
<b>RF</b>	Radio Frecuencia, <i>Radio Frequency</i>
<b>RTSL</b>	Pérdidas del Edificio a la Calle, <i>Roof to Street Loss</i>
<b>TR</b>	Recomendación técnica, <i>Technical Report</i>



# APÉNDICE A: ACUERDO DE LICENCIA

## A.1. INTRODUCCIÓN

A continuación se detallan los términos de uso para el simulador básico estático a nivel de sistema para LTE (trabajo original), desarrollado en la Facultad de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, en el Grupo de investigación de Radio e InALámbricas, GRIAL.

## A.2. CLAUSULAS

### - **Uso académico**

El uso del simulador básico estático a nivel de sistema para LTE (trabajo original) se limita al contexto académico en cualquier proyecto con fines científicos, sin el compromiso de reembolsos o reclamos financieros a causa de los resultados obtenidos, pero sujeto a las restricciones de las siguientes cláusulas.

### - **Reconocimiento de derechos de autor**

Cualquier uso del simulador básico a nivel de sistema para LTE debe ser referenciado.

### - **Modificación al trabajo original**

El trabajo original puede ser modificado, adaptado o alterado por miembros de instituciones educativas sin fines de lucro o comercialización y cuyo objetivo sea realizar investigaciones o aportes sobre la tecnología LTE.

### - **Publicación de resultados**

Los resultados obtenidos del simulador o de modificaciones realizadas al código podrán ser publicados.



## APÉNDICE B: VERIFICACIÓN DEL SIMULADOR

### B.1. INTRODUCCIÓN

El proceso de verificación determina si el software desarrollado cumple con los requerimientos especificados en la fase de análisis. Para este fin se realiza una revisión teórica de las entradas al simulador y se comparan con los resultados o salidas obtenidas a partir del mismo.

### B.2. VERIFICACION DE REQUERIMIENTOS

La tabla Ap.B1 presenta un resumen de la validación del simulador básico a nivel de sistema para LTE, en esta se relacionan los requerimientos con las pruebas y procedimientos de verificación realizado para corroborar la validez de los resultados obtenidos.

N°	Requerimiento	Prueba de Verificación	Cumple	
			SI	NO
1	Permitir la simulación de una red LTE estática	1 - 14	✓	
2	Realizar cálculos de cobertura y capacidad de una red LTE	1 - 14	✓	
3	Permitir la selección del modelo de propagación	4, 14	✓	
4	Permitir la selección del tipo de antena del eNB	4, 14	✓	
5	Permitir la selección del azimut y <i>tilt</i> de antena del eNB	6, 14	✓	
6	Realizar sectorización de las celdas de la red	7	✓	
7	Permitir la selección del número de usuarios de la red	8, 9	✓	
8	Implementación de una estrategia de planificación de recursos	10	✓	



## APÉNDICE B: VERIFICACIÓN DEL SIMULADOR

<b>9</b>	Implementación de reuso de frecuencia	10	✓	
<b>10</b>	Permitir la selección de la frecuencia en el enlace descendente para la red	14	✓	
<b>11</b>	Permitir la selección de la potencia de transmisión para los eNodeB	14	✓	
<b>12</b>	Considerar la presencia de edificaciones y multitrayectoria	5	✓	
<b>13</b>	Calcular la potencia recibida y el <i>throughput</i> percibido por cada usuario	2, 4, 13	✓	
<b>14</b>	Calcular las potencias interferentes de cada celda de la red	11, 14	✓	
<b>15</b>	Calcular la SINR para cada usuario de la red	12	✓	
<b>16</b>	Calcular el <i>throughput</i> por sector, celda y red	13	✓	
<b>17</b>	Desplegar resultados de cobertura de la red	1-14	✓	
<b>18</b>	Desplegar resultados del desempeño de la red en función de las características de capacidad	1-14	✓	

**Tabla Ap.B1** Tabla de chequeo de requerimientos para el simulador

A continuación se describen las pruebas más relevantes realizadas para verificar el funcionamiento del simulador básico a nivel de sistema para LTE, estas detallan los procedimientos seguidos para comprobar que el software cumpla con los requerimientos planteados.

- **Prueba 1**

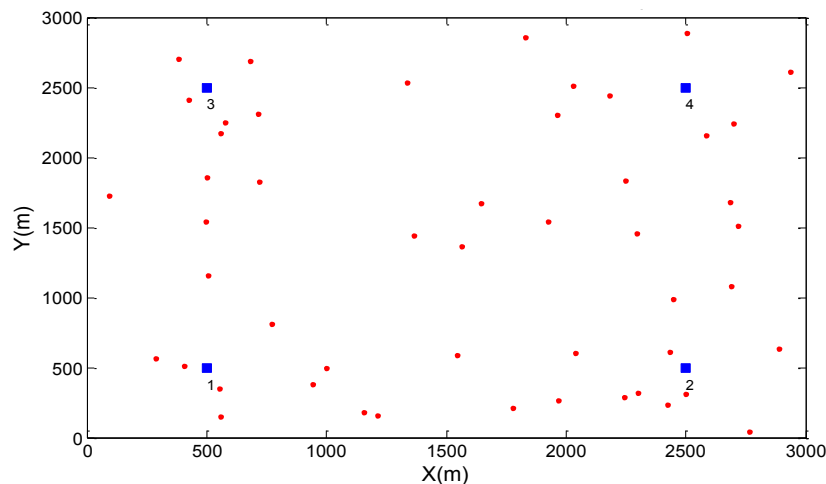
<b>Fecha :</b>	<b>04/11/2013 – 08/11/2013</b>	<b>Prueba No.</b>	<b>1</b>
<b>Descripción de prueba:</b>	Verifica el código de despliegue de escenario de simulación, donde se define el número de eNB, su ubicación en función del radio y la asignación aleatoria de usuarios en todo el escenario.		
<b>Elementos Requeridos</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Elemento</b>	
	1	Computador portátil	
	1	Software Matlab® versión 7.13	



## APÉNDICE B: VERIFICACIÓN DEL SIMULADOR

<b>Resultados Esperados</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ubicar los eNB de acuerdo al radio de la celda definido en código.</li> <li>• Visualizar la gráfica donde se muestre el escenario definido.</li> </ul>
<b>Resultados obtenidos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se ubicaron cuatro eNBs en función del radio de la celda.</li> <li>• Se desplegó una figura donde se veía el escenario con sus dimensiones y los eNB y usuarios ubicados aleatoriamente. La figura Ap.B1 muestra el resultado obtenido en esta prueba.</li> </ul>
<b>Observaciones</b>	Esta prueba aún no satisface algún requerimiento funcional, se continúa desarrollando el código para incluir más funcionalidades que lo permitan.

**Tabla Ap.B2** Descripción prueba 1



**Figura Ap.B1** Escenario con cuatro eNBs fijos y usuarios distribuidos aleatoriamente – Prueba 1

- **Prueba 2**

<b>Fecha :</b>	<b>10/11/2013 – 28/11/2013</b>	<b>Prueba No.</b>	<b>2</b>
<b>Descripción de prueba:</b>	Verifica el código de cálculo de distancia entre los cuatro eNB y todos los puntos del escenario que representan una grilla de receptores. Además despliega mediante mapas de colores esta información.		



## APÉNDICE B: VERIFICACIÓN DEL SIMULADOR

Elementos Requeridos	Cantidad	Elemento
	1	Computador portátil
	1	Software Matlab® versión 7.13
<b>Resultados Esperados</b>		<ul style="list-style-type: none"><li>• Obtener una matriz de datos con la distancia entre eNB y los puntos del escenario.</li><li>• Visualizar mediante mapas de colores la distancia entre eNB y puntos del escenario.</li></ul>
<b>Resultados obtenidos</b>		<ul style="list-style-type: none"><li>• Se obtuvo una matriz de datos con la distancia entre cada punto del escenario y cada eNB. Para verificar que los datos de la matriz fueran correctos, se tomaron 3 puntos del escenario al azar y se realizaron los cálculos teóricos correspondientes, como se muestra a continuación en el procedimiento 1.</li><li>• Se obtuvo una gráfica de mapa de colores que muestra la variación de la distancia entre los puntos del escenario y los eNB. La figura Ap.B2 muestra el resultado obtenido en esta prueba.</li></ul>
<b>Observaciones</b>		Esta prueba permite verificar parcialmente el requerimiento 13, se continúa desarrollando el código para incluir más funcionalidades.

**Tabla Ap.B3** Descripción prueba 2

### - Procedimiento 1

Procedimiento que se realizó para verificar el cálculo de los valores de distancia para cada una de las celdas, es decir, para todos los eNB y las muestras de los puntos de recepción del escenario. La tabla Ap.B4 describe la ubicación en coordenadas (x, y) de los eNB y tres puntos del escenario elegidos al azar que se toman como muestras para ejemplificar la prueba realizada.

Elemento	Ubicación (X,Y) [m]
Punto de recepción 1	(1549,1274)
Punto de recepción 2	(111, 817)
Punto de recepción 3	(1105, 254)
eNB 1	(500, 1500)



## APÉNDICE B: VERIFICACIÓN DEL SIMULADOR

eNB 2	(1500, 1500)
eNB 3	(500, 500)
eNB 4	(1500, 500)

**Tabla Ap.B4** Posición de los puntos de recepción muestra y los eNB

La fórmula del cálculo de la distancia euclidiana entre dos puntos que se muestra en la ecuación Ap.B1 se usa para determinar la distancia en metros entre los eNB y los puntos muestra.

$$d = \sqrt{(x_{eNB} - x_i)^2 + (y_{eNB} - y_i)^2} \quad (\text{Ap.B1})$$

Donde,

$x_{eNB}$  Posición en el eje X del eNB. Se mide en metros

$x_i$  Posición en el eje X de un punto del escenario. Se mide en metros

$y_{eNB}$  Posición en el eje Y del eNB. Se mide en metros

$y_i$  Posición en el eje Y de un punto del escenario. Se mide en metros

Los valores de  $x_{eNB}$  y  $y_{eNB}$  son reemplazados por las coordenadas de la posición del eNB y los valores de  $x_i$  y  $y_i$  por las coordenadas de cada uno de los puntos de recepción de la tabla Ap.B4

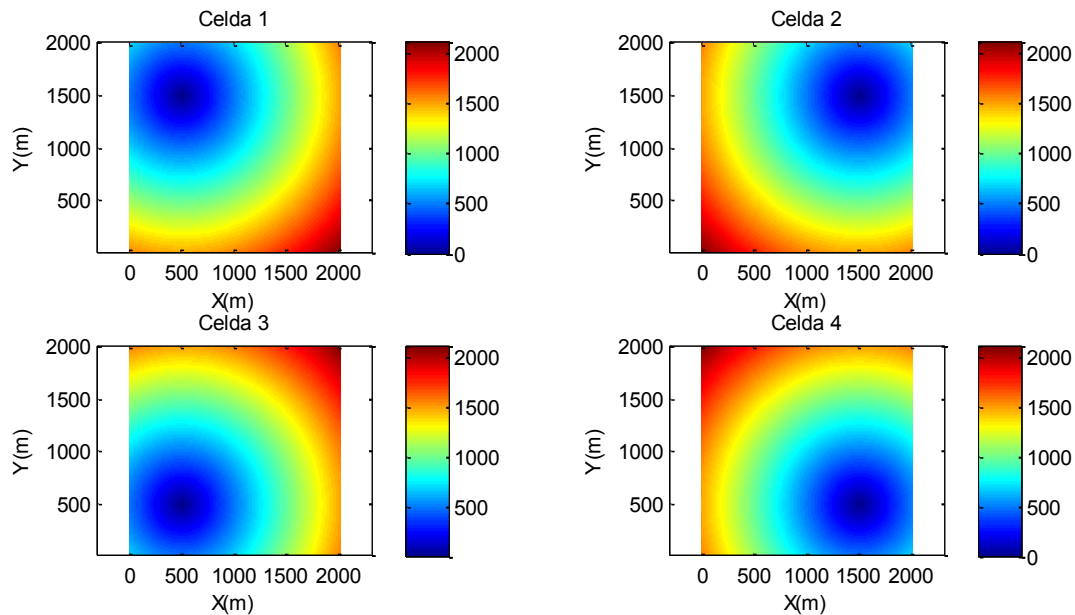
Los valores de distancia a partir del cálculo teórico fueron comparados con los ofrecidos por el simulador, se obtuvo que los resultados de distancia entre los eNB y los puntos de recepción en el escenario son correctos y corresponden con exactitud a los determinados teóricamente. La tabla Ap.B5 muestra los valores de distancia de cada uno de los puntos a los eNB.

Punto de recepción	eNB1	eNB2	eNB3	eNB4
1	1073.1	231.2509	1303.6	775.5495
2	786.0089	1547.8	501.8067	1424.7
3	465.3397	1307.1	653.1011	1385.1

**Tabla Ap.B5** Distancia entre los puntos muestra del escenario y cada eNB



## APÉNDICE B: VERIFICACIÓN DEL SIMULADOR



**Figura Ap.B2** Mapa de colores de las distancias entre eNB de cada celda y puntos de recepción en el escenario

### • Prueba 3

<b>Fecha :</b>	<b>29/11/2013 – 06/12/2013</b>	<b>Prueba No.</b>	<b>3</b>
<b>Descripción de prueba:</b>	Verifica el código de cálculo de potencia de recepción en la grilla de receptores usando una antena omnidireccional y espacio libre como modelo de pérdidas de trayectoria.		
<b>Elementos Requeridos</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Elemento</b>	
	1	Computador portátil	
	1	Software Matlab® versión 7.13	
<b>Resultados Esperados</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obtener una matriz de datos con la potencia recibida en la grilla de receptores (puntos del escenario).</li> <li>• Visualizar mediante mapas de colores la potencia de recepción en la grilla de receptores.</li> </ul>		
<b>Resultados obtenidos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se obtuvo una matriz de datos con información de la potencia de recepción para cada punto del escenario al usar una antena omnidireccional y modelo de pérdidas de espacio libre. Para verificar que los datos de la matriz fueran correctos, se tomaron muestras de puntos del escenario al azar y se realizaron los cálculos teóricos correspondientes, como muestra el procedimiento 2.</li> </ul>		





## APÉNDICE B: VERIFICACIÓN DEL SIMULADOR

	<ul style="list-style-type: none"><li>Se obtuvo una gráfica de mapa de colores que muestra la variación de la potencia de recepción para la grilla de receptores ubicada en todo el escenario, como se muestra en la figura Ap.B3</li></ul>
<b>Observaciones</b>	Esta prueba permite verificar parcialmente el requerimiento 13, se continúa desarrollando el código para incluir más funcionalidades.

**Tabla Ap.B6** Descripción prueba 3

### - Procedimiento 2

Procedimiento que se realizó para verificar los valores de potencia de recepción de los puntos del escenario en cada una de las celdas. Para abreviar la descripción del proceso en esta prueba los puntos de recepción seleccionados y la distancia entre estos y los eNB corresponden a los valores del proceso 1 de la tabla Ap.B4 y la tabla Ap.B5 respectivamente.

La potencia de recepción percibida en un punto del escenario se define mediante la ecuación Ap.B2

$$P_{rx} = P_{eNB} + G_{eNB} - L + G_{rx} + F \quad (\text{Ap.B2})$$

Donde,

- $P_{rx}$  Potencia de recepción en un punto específico del escenario. Se mide en dBm
- $P_{eNB}$  Potencia de transmisión del eNB. Se mide en dBm
- $G_{eNB}$  Ganancia de transmisión del eNB. Se mide en dBi
- $L$  Pérdidas de propagación. Se mide en dB
- $G_{rx}$  Ganancia de recepción. Se mide en dBi
- $F$  Variable aleatoria que permite representar el desvanecimiento lento o el desvanecimiento rápido. Se mide en dB

Para esta prueba, se asume que los eNB radian con una potencia de transmisión de 20 W y con una ganancia de antena de 15 dBi para todos los puntos del escenario, mientras que la ganancia de recepción se



## APÉNDICE B: VERIFICACIÓN DEL SIMULADOR

considera despreciable. La potencia de transmisión no se afecta por desvanecimiento y los valores de pérdidas de trayectoria se calculan mediante el modelo de espacio libre descrito en la ecuación Ap.B3 para una frecuencia de operación de 1710 MHz.

$$L = 32.4 + 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) \quad (\text{Ap.B3})$$

Donde,

$d$  Distancia entre el transmisor y el receptor. Se mide en kilómetros

$f$  Frecuencia de Transmisión. Se mide en MHz

Al reemplazar las consideraciones de la prueba 3 en las ecuaciones Ap.B3 y Ap.B2 se obtienen los resultados teóricos de las pérdidas de propagación y potencia de recepción respectivamente. Estos resultados son equiparables a los ofrecidos por el simulador. La tabla Ap.B7 y la tabla Ap.B8 describen los valores de pérdidas de propagación y de potencia de recepción calculados por el simulador.

Pérdidas de propagación (dB)				
Punto de recepción	eNB1	eNB2	eNB3	eNB4
1	97.7225	84.3916	99.4131	94.9021
2	95.0185	100.9044	91.1207	100.1845
3	90.4653	99.4362	93.4095	99.9396

**Tabla Ap.B7** Pérdidas de propagación calculadas por el simulador para los puntos de recepción

Potencia de recepción (dBm)				
Punto de recepción	eNB1	eNB2	eNB3	eNB4
1	-39.7122	-26.3813	-41.4028	-36.8918
2	-37.0082	-42.8941	-33.1104	-42.1742
3	-32.4550	-41.4259	-35.3992	-41.9293

**Tabla Ap.B8** Potencia de recepción calculada por el simulador para los puntos de recepción



## APÉNDICE B: VERIFICACIÓN DEL SIMULADOR

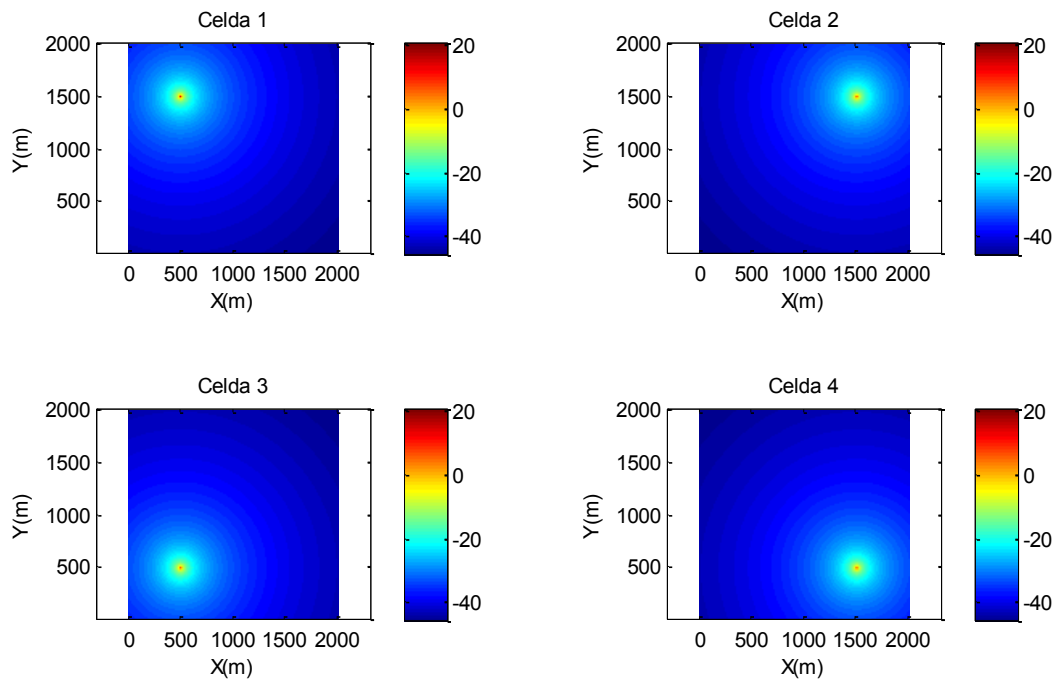


Figura Ap.B3 Potencia de recepción percibida por los puntos del escenario

### • Prueba 4

<b>Fecha :</b>	<b>09/12/2013 – 20/12/2013</b>	<b>Prueba No.</b>	<b>4</b>
<b>Descripción de prueba:</b>	Verifica el código de cálculo de potencia de recepción en la grilla de receptores usando las antenas: TR 36.942, Katherein 742215 y Katherein 80010681; y los modelos de propagación: espacio libre, COST-231 (macro urbano, micro urbano y macro suburbano), TR 36.942 (urbano y suburbano).		
<b>Elementos Requeridos</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Elemento</b>	
	1	Computador portátil	
	1	Software Matlab® versión 7.13	
<b>Resultados Esperados</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obtener una matriz de datos con la potencia recibida en la grilla de receptores (puntos del escenario).</li> <li>• Visualizar mediante mapas de colores la potencia de recepción en la grilla de receptores.</li> </ul>		
<b>Resultados obtenidos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se obtuvo una matriz de datos con información de la potencia de recepción para cada punto del escenario al simular tres tipos de antena y seis modelos de pérdidas de trayectoria. Para verificar que los datos de la matriz fueran correctos, se tomaron muestras de los puntos del</li> </ul>		



## APÉNDICE B: VERIFICACIÓN DEL SIMULADOR

	<p>escenario al azar y se realizaron los cálculos teóricos correspondientes, como se muestra en el procedimiento 3.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>Se obtuvo una gráfica de mapa de colores que muestra la variación de la potencia de recepción para la grilla de receptores ubicada en todo el escenario, se observa que la potencia recibida sigue la forma del patrón de radiación de la antena, como se muestra en la figura Ap.B4</li></ul>
<b>Observaciones</b>	<p>Los modelos y antenas evaluados en esta prueba son seleccionados directamente desde el código, por lo que se debe desarrollar una interfaz gráfica de usuario que permita la selección de forma dinámica.</p> <p>Esta prueba permite verificar completamente los requerimientos 3 y 4, y parcialmente el requerimiento 13, se continúa desarrollando el código para incluir más funcionalidades.</p>

**Tabla Ap.B9** Descripción prueba 4

### - Procedimiento 3

Procedimiento que se realizó para verificar la inclusión de los modelos de propagación y tipos de antena que considera el simulador. Se tomaron puntos al azar y se desarrolló el proceso de cálculo teórico respectivo.

Para calcular la distancia entre un punto del escenario y un eNB se consideran dos factores,  $\Delta x$  y  $\Delta y$  que se describen en la ecuación Ap.B4 y Ap.5

$$\Delta_x = (x_{eNB} - x_i) \quad (\text{Ap.B4})$$

$$\Delta_y = (y_{eNB} - y_i) \quad (\text{Ap.B5})$$

Donde,

$\Delta_x$  Diferencia de posiciones en el eje X entre el eNB y el usuario. Se mide en metros

$\Delta_y$  Diferencia de posiciones en el eje Y entre el eNB y el usuario. Se mide en metros

$x_{eNB}$  Posición en el eje X del eNB. Se mide en metros



## APÉNDICE B: VERIFICACIÓN DEL SIMULADOR

- $x_i$  Posición en el eje X del usuario. Se mide en metros  
 $y_{eNB}$  Posición en el eje Y del eNB. Se mide en metros  
 $y_i$  Posición en el eje Y del usuario. Se mide en metros

La relación de los factores  $\Delta_x$  y  $\Delta_y$  que muestra la ecuación Ap.B6 corresponde al valor de la distancia angular entre el eNB y un punto específico del escenario y relaciona la ganancia percibida en el punto de recepción según el patrón de ganancia de la antena.

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right) \quad (\text{Ap.B6})$$

El procedimiento descrito toma como ejemplo el eNB4 y tres puntos al azar en el escenario de recepción, la tabla Ap.B10 detalla la posición del eNB y los puntos.

Elemento	Ubicación (X,Y) [m]
Punto de recepción 1	(3000,4000)
Punto de recepción 2	(1500, 2000)
Punto de recepción 3	(6000, 7000)
eNB 4	(2000, 6000)

**Tabla Ap.B10** Posición de los puntos de recepción muestra y el eNB 4

Una vez seleccionados los puntos de recepción se verificó la distancia calculada por el simulador entre estos y el eNB4 como se hizo en el procedimiento 1. Teóricamente se determinaron los valores de  $\Delta_x$  y  $\Delta_y$  y se les aplicó la relación de la ecuación Ap.B6, para obtener la distancia angular. A fin de verificar el cálculo de la ganancia de antena para el punto de recepción, se compararon los valores obtenidos del simulador con los teóricos, para el caso de la antena TR 36.942, mediante la fórmula matemática que determina su patrón de ganancia y para el de las antenas Katherein los archivos .msi brindados por el fabricante. Los valores teóricos y de simulación coinciden y el procedimiento verificó que el simulador calcula adecuadamente la distancia angular y el valor de ganancia de



## APÉNDICE B: VERIFICACIÓN DEL SIMULADOR

acuerdo a la antena seleccionada entre un punto de recepción en el escenario y los eNB.

La tabla Ap.B11 muestra los valores de ganancia de antena para los puntos de recepción seleccionados con la antena katherinein 742215 con una ganancia máxima de 18 dBi.

Punto de recepción	Distancia (m)	$d_x$ (m)	$d_y$ (m)	Distancia Angular (°)	Ganancia Normalizada(dBi)
1	2236	-1000	2000	-63.4349	1.44
2	4031	500	4000	82.8749	-10.39
3	4123	-4000	-1000	14.0362	-20.66

**Tabla Ap.B11** Distancia Angular y ganancia para los puntos de recepción

La verificación en el cálculo de las pérdidas de trayectoria considera las fórmulas que definen a cada uno de los modelos de propagación, estas se encuentran en el anexo A y por su extensión no se mencionan en este apéndice. Sin embargo se realizó el cálculo teórico que determina las pérdidas de cada uno de ellos y se comparó con los resultados obtenidos del simulador, tal y como se hizo en el procedimiento 2.

Se concluye que el simulador mantiene un cálculo de distancia y ángulo entre los puntos de recepción del escenario y los eNB, además de determinar correctamente la ganancia de acuerdo a la antena y las pérdidas de trayectoria de acuerdo al modelo de propagación seleccionado.

- **Prueba 5**

<b>Fecha :</b>	<b>06/01/2014 – 10/01/2014</b>	<b>Prueba No.</b>	<b>5</b>
<b>Descripción de prueba:</b>	Verifica el código de cálculo de potencia de recepción en la grilla de receptores, cuando se incluye el efecto del desvanecimiento lento y rápido. La prueba se realiza con antena TR 36.942 y modelo de pérdidas de trayectoria de espacio libre.		
<b>Elementos</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Elemento</b>	



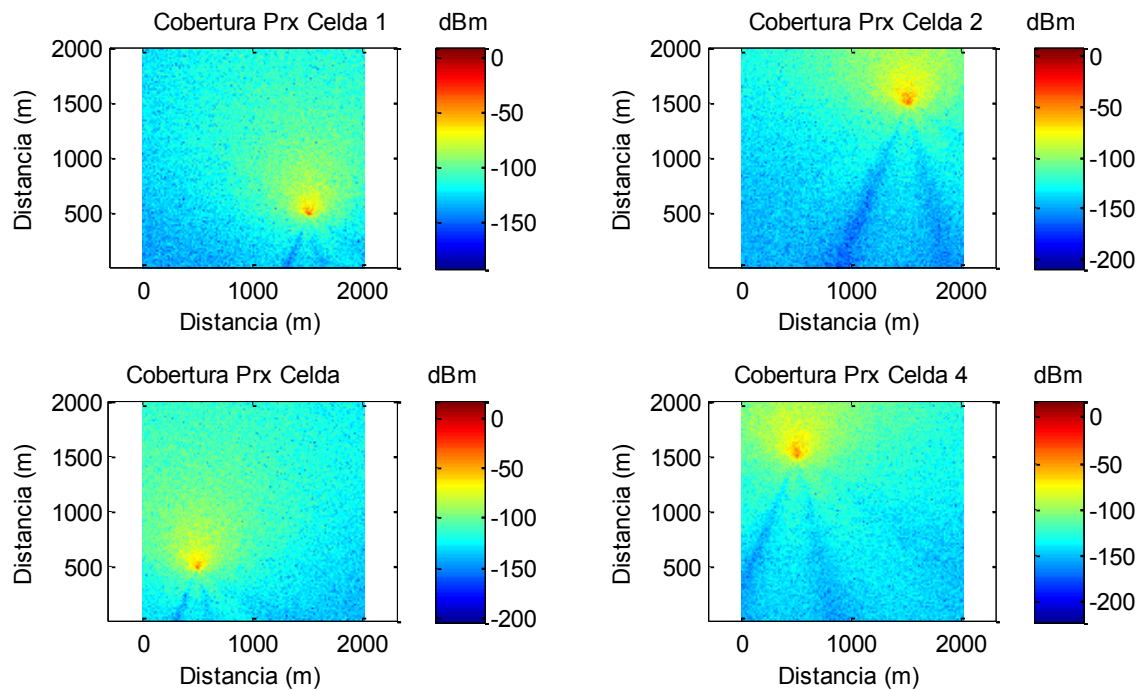
## APÉNDICE B: VERIFICACIÓN DEL SIMULADOR

<b>Requeridos</b>	1	Computador portátil
	1	Software Matlab® versión 7.13
<b>Resultados Esperados</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Obtener una matriz de datos con la potencia recibida en la grilla de receptores (puntos del escenario) al incluir el efecto del desvanecimiento causado por obstáculos y por multitrayectoria.</li><li>• Visualizar mediante mapas de colores, la potencia de recepción en la grilla de receptores cuando se incluye el efecto del desvanecimiento lento.</li></ul>	
<b>Resultados obtenidos</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Se obtuvo una matriz de datos con información de la potencia de recepción para cada punto del escenario cuando se incluye el efecto del desvanecimiento. La verificación de los datos de la matriz se realizó al sumar los valores de la variable aleatoria generada por Matlab® con la matriz de potencia de recepción verificada previamente.</li><li>• Se obtuvo una gráfica de mapa de colores que muestra la variación de la potencia de recepción para la grilla de receptores ubicada en todo el escenario cuando se incluye el efecto del desvanecimiento rápido, como se muestra en la figura Ap.B5</li></ul>	
<b>Observaciones</b>	Esta prueba permite verificar en su totalidad el requerimiento 12, se continúa desarrollando el código para incluir más funcionalidades.	

**Tabla Ap.B12** Descripción prueba 5



## APÉNDICE B: VERIFICACIÓN DEL SIMULADOR



**Figura Ap.B5** Potencia de recepción con efecto del desvanecimiento – Antena katherinein 742215

- **Prueba 6**

<b>Fecha :</b>	<b>13/01/2014 – 17/01/2014</b>	<b>Prueba No.</b>	<b>6</b>
<b>Descripción de prueba:</b>	Verifica el código de variación de azimut y <i>tilt</i> de antena del eNB, cuando se simula la antena TR 36.942 y se usa el modelo de pérdidas de trayectoria de espacio libre.		
<b>Elementos Requeridos</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Elemento</b>	
	1	Computador portátil	
	1	Software Matlab® versión 7.13	
<b>Resultados Esperados</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Visualizar mediante mapas de colores la potencia de recepción en la grilla de receptores para diferentes valores de <i>tilt</i> y azimut de antena.</li> </ul>		
<b>Resultados obtenidos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se obtuvo una gráfica de mapa de colores que muestra la variación de la potencia de recepción para la grilla de receptores ubicada en todo el escenario para diferentes valores de <i>tilt</i> y azimut de antena, como se muestra en la figura Ap.B6</li> <li>• La verificación de esta parte del código se realizó visualmente, al observar los cambios en las gráficas de mapas de colores obtenidas.</li> </ul>		

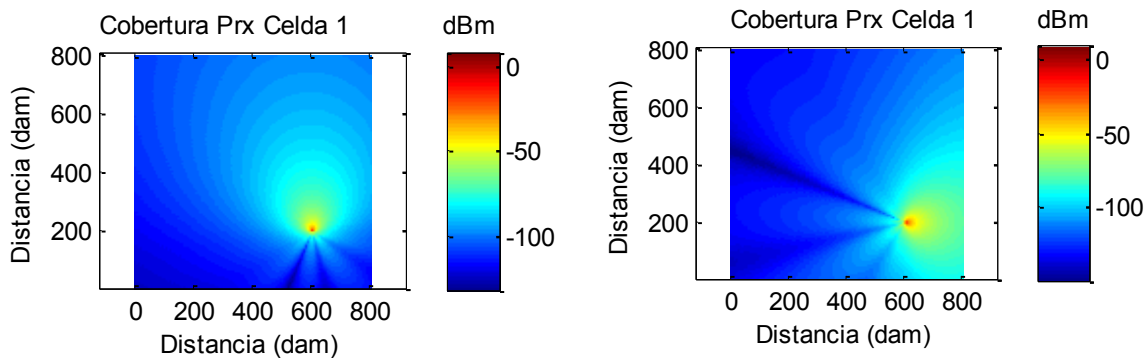




## APÉNDICE B: VERIFICACIÓN DEL SIMULADOR

<b>Observaciones</b>	La variación de azimut y <i>tilt</i> se realiza manualmente dentro del código fuente, por lo que hace falta desarrollar una interfaz gráfica de usuario que permita la selección dinámica. Esta prueba permite verificar en su totalidad el requerimiento 5, se continúa desarrollando el código para incluir más funcionalidades.
----------------------	--

**Tabla Ap.B13** Descripción prueba 6



*Tilt* de antena y ángulo azimut 0°  
(a)

*Tilt* de antena 0° y ángulo azimut 90°  
(b)

**Figura Ap.B6** Potencia de recepción para la celda 1 cuando el eNB radia con una antena Katherein 742215

- **Prueba 7**

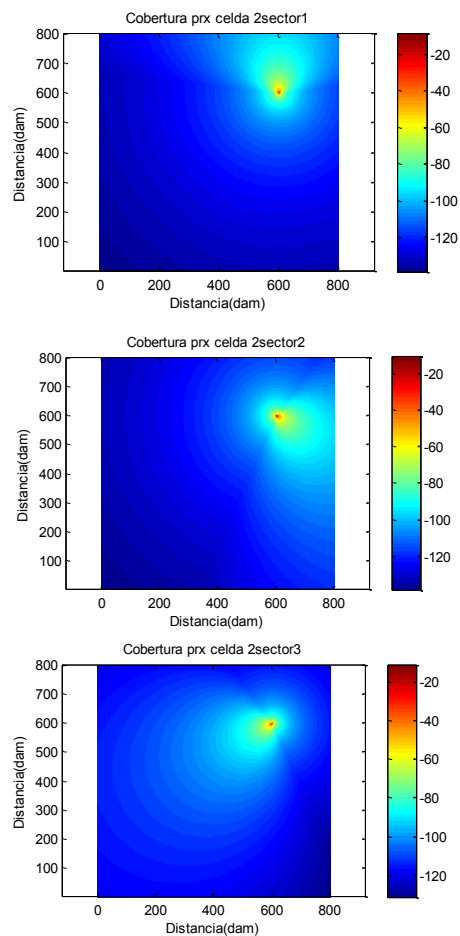
<b>Fecha :</b>	<b>20/01/2014 – 24/01/2014</b>	<b>Prueba No.</b>	<b>7</b>
<b>Descripción de prueba:</b>	Verifica el código de sectorización de celdas cuando se usa la antena TR 36,942 y modelo de pérdidas de propagación de espacio libre.		
<b>Elementos Requeridos</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Elemento</b>	
	1	Computador portátil	
	1	Software Matlab® versión 7.13	
<b>Resultados Esperados</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Visualizar mediante mapas de colores la potencia de recepción en la grilla de receptores para diferentes valores de <i>tilt</i> y azimut de antena cuando cada celda es sectorizada con un factor de 3.</li> </ul>		



## APÉNDICE B: VERIFICACIÓN DEL SIMULADOR

<b>Resultados obtenidos</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Se obtuvieron múltiples gráficas de mapa de colores que muestran la cobertura para cada sector en las cuatro celdas evaluadas, como se muestra en la figura Ap.B7</li><li>• La verificación de esta parte del código se realizó visualmente, al observar los resultados obtenidos en las diferentes gráficas de mapas de colores.</li></ul>
<b>Observaciones</b>	Esta prueba permite verificar en su totalidad el requerimiento 6, se continúa desarrollando el código para incluir más funcionalidades.

**Tabla Ap.B14** Descripción de prueba 7



**Figura Ap.B7** Potencia de recepción para todos los sectores de la celda 2 del sistema

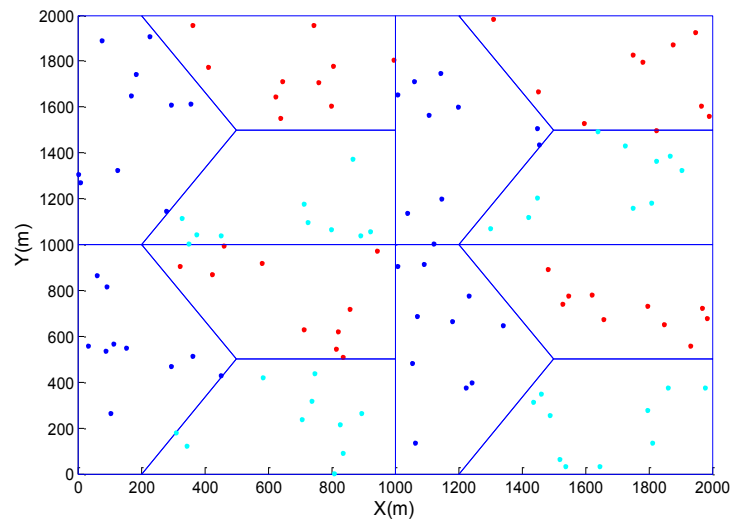


## APÉNDICE B: VERIFICACIÓN DEL SIMULADOR

### • Prueba 8

<b>Fecha :</b>	<b>27/01/2014 – 31/01/2014</b>	<b>Prueba No.</b>	<b>8</b>
<b>Descripción de prueba:</b>	Prueba que verifica el código de asignación aleatoria de usuarios por sector.		
<b>Elementos Requeridos</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Elemento</b>	
	1	Computador portátil	
	1	Software Matlab® versión 7.13	
<b>Resultados Esperados</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Asignar el mismo número de usuarios dentro del área que delimita a un sector.</li> </ul>		
<b>Resultados obtenidos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se obtuvo una gráfica donde se observaba el escenario sectorizado en tres partes y a los usuarios distribuidos aleatoriamente en igual número para cada sector, como se presenta en la figura Ap.B8. La verificación de este segmento de código se realizó visualmente y analizando las matrices obtenidas, en donde se especificaban las posiciones de los usuarios asignados en cada sector de la celda.</li> </ul>		
<b>Observaciones</b>	Esta prueba permite verificar parcialmente el requerimiento 7, se continúa desarrollando el código para incluir más funcionalidades.		

**Tabla Ap.B15** Descripción prueba 8



**Figura Ap.B8** Distribución aleatoria de usuarios en el escenario sectorizado

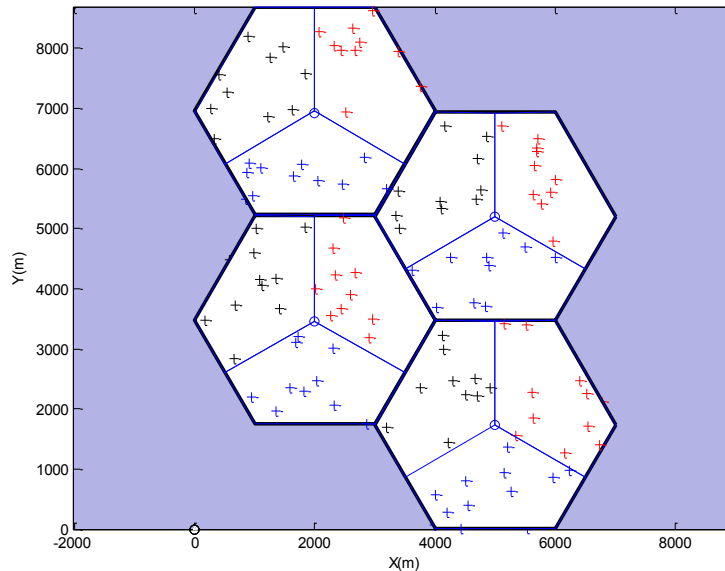


## APÉNDICE B: VERIFICACIÓN DEL SIMULADOR

- **Prueba 9**

<b>Fecha :</b>	<b>03/02/2014 – 07/02/2014</b>	<b>Prueba No.</b>	<b>9</b>
<b>Descripción de prueba:</b>	<p>Prueba que verifica el código de geometría de celda hexagonal.</p> <p>Inicialmente se planteó un escenario con geometría cuadrada pero para asignar adecuadamente las frecuencias y evitar la interferencia, se implementó una geometría hexagonal.</p>		
<b>Elementos Requeridos</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Elemento</b>	
	1	Computador portátil	
	1	Software Matlab® versión 7.13	
<b>Resultados Esperados</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desplegar una gráfica donde se muestre la geometría de las celdas del sistema y que muestre los usuarios distribuidos aleatoriamente en esta área y por sector.</li> </ul>		
<b>Resultados obtenidos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se obtuvo una gráfica donde se observaba el escenario con geometría hexagonal y cada celda es sectorizada en tres partes y los usuarios son distribuidos aleatoriamente en igual número por sector, como se presenta en la figura Ap.B9</li> <li>• Se obtuvo una matriz de datos con información de la ubicación de cada uno de los usuarios asignados de manera aleatoria en los sectores de las celdas.</li> </ul> <p>La verificación de este segmento de código se realizó visualmente y analizando las matrices obtenidas, en donde se especificaban las posiciones de los usuarios asignados en cada sector de la celda.</p>		
<b>Observaciones</b>	<p>Esta prueba permite verificar parcialmente el requerimiento 7, se continúa desarrollando el código para incluir más funcionalidades.</p>		

**Tabla Ap.B16** Descripción prueba 9



**Figura Ap.B9** Distribución aleatoria de 10 usuarios en el escenario con 4 celdas hexagonales

- **Prueba 10**

<b>Fecha :</b>	<b>10/02/2014 – 14/02/2014</b>	<b>Prueba No.</b>	<b>10</b>
<b>Descripción de prueba:</b>	Prueba que verifica el código de implementación de reuso de frecuencia y estrategia de planificación de paquetes.		
<b>Elementos Requeridos</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Elemento</b>	
	1	Computador portátil	
	1	Software Matlab® versión 7.13	
<b>Resultados Esperados</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asignación equitativa de los recursos disponibles en el eNB entre todos los usuarios de la celda.</li> <li>• Cada celda del sistema debe tener el mismo rango de frecuencias.</li> </ul>		
<b>Resultados obtenidos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Todos los usuarios del sistema cuentan con la misma cantidad de bloques de recursos, a cada usuario se le asigna una matriz de frecuencias portadoras de acuerdo el número bloques asignados por el eNB.</li> <li>• Todas las celdas del sistema tiene una matriz con iguales frecuencias portadoras que puede asignar a los usuarios servidos por el eNB, garantizando un reuso de frecuencia con factor 1.</li> </ul>		



## APÉNDICE B: VERIFICACIÓN DEL SIMULADOR

	La verificación de este segmento de código se realizó mediante el análisis de las matrices obtenidas en donde se especificaban las frecuencias portadoras y bloques de recursos por usuario del sistema.
<b>Observaciones</b>	Esta prueba permite verificar totalmente los requerimientos 8 y 9, se continúa desarrollando el código para incluir más funcionalidades.

**Tabla Ap.B17** Descripción prueba 10

- **Prueba 11**

<b>Fecha :</b>	<b>17/02/2014 – 21/02/2014</b>	<b>Prueba No.</b>	<b>11</b>
<b>Descripción de prueba:</b>	Prueba que verifica el código de cálculo de potencia interferentes		
<b>Elementos Requeridos</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Elemento</b>	
	1	Computador portátil	
	1	Software Matlab® versión 7.13	
<b>Resultados Esperados</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obtener una matriz de datos con la potencia recibida por los usuarios del sistema desde el eNB que le atiende, como desde los eNB vecinos que causan la potencia interferente.</li> <li>• Obtener una matriz de datos con la suma de la potencia interferente total generada a cada usuario del sistema.</li> </ul>		
<b>Resultados obtenidos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se obtuvo una matriz de datos por celda con los valores de ganancia percibido por los usuarios.</li> <li>• Se obtuvo una matriz de datos por celda con los valores de pérdidas de propagación percibido por los usuarios.</li> <li>• Se obtuvo una matriz de datos por cada celda con información de la potencia percibida por los usuarios desde su eNB y desde los eNB vecinos.</li> <li>• Se obtuvo una matriz por cada celda que representa la sumatoria de las potencias interferentes generadas por los eNB vecinos sobre los equipos de usuario del sistema. Los valores de ganancia, pérdidas de propagación y potencia recibida fueron verificados de acuerdo al procedimiento 1,2 y 3 considerando la posición del equipo de usuario y la de los eNB.</li> </ul>		



## APÉNDICE B: VERIFICACIÓN DEL SIMULADOR

	Para verificar el cálculo de la potencia interferente sobre un usuario, se realizó el procedimiento 4.
<b>Observaciones</b>	Esta prueba permite verificar totalmente el requerimiento 14. Se continúa desarrollando el código para incluir más funcionalidades.

**Tabla Ap.B18** Descripción prueba 11

### - Procedimiento 4

La tabla Ap.B19 muestra la posición de los 4 eNB del sistema y de 3 equipos de usuario distribuidos aleatoriamente en el sector 1 de la celda 1 que se toman como muestra para la verificación.

<b>Elemento</b>	<b>Posición (x, y) [m]</b>
usuario1	1000 - .3908
usuario2	1497 – 4859
usuario3	1637– 4799
eNB1	2000 – 3464
eNB2	2000 – 6928
eNB3	5000 – 1732
eNB4	5000 – 5196

**Tabla Ap.B19** Coordenadas de ubicación de los equipos de usuario y los eNB

Se aplica el procedimiento 1 para calcular teóricamente el valor de la distancia entre cada equipo de usuario y los eNB, los valores obtenidos teóricamente coinciden con los que muestra el simulador. La tabla Ap.B20 relaciona los valores de distancia obtenidos.

<b>Distancia (m)</b>				
<b>Usuario</b>	<b>eNB1</b>	<b>eNB2</b>	<b>eNB3</b>	<b>eNB4</b>
1	1093.7	3181.3	4553.2	4201.9
2	1483	2129.2	4695.7	3519.1
3	1383.9	2159.4	4551.8	3386.2

**Tabla Ap.B20** Valores de distancia entre los equipos de usuario y los eNB



Se aplica el procedimiento 2 y 3 para calcular teóricamente las pérdidas de propagación y la potencia recibida de los usuarios desde cada uno de los eNB, los valores obtenidos teóricamente coinciden con los que muestra el simulador. La tabla Ap.B21 muestra los valores de potencia que percibe cada uno de los usuarios seleccionados desde los eNB vecinos.

Potencia de recepción (dBm)				
usuario	eNB1	eNB2	eNB3	eNB4
1	-42.5588	-64.7996	-55.6329	-53.5257
2	-57.5646	-63.2698	-58.5404	-51.1684
3	-58.8689	-65.1688	-58.4189	-50.8792

**Tabla Ap.B21** Potencia percibida por los usuarios desde cada eNB calculada por el simulador

Las potencias interferentes deben corresponder a la suma de la totalidad de las potencias generadas por los eNB vecinos sobre cada usuario. Una vez que los valores de potencias de recepción en dBm se convierten a unidades lineales se suman para determinar el valor de la potencia interferente como expresa la ecuación Ap.B7.

$$P_{IUE} = \sum_{i=1}^3 P_{eNB_i} \quad (\text{Ap.B7})$$

Donde,

$P_{IUE}$  Potencia interferente percibida por un equipo de usuario. Se mide en watts

$P_{eNB_i}$  Potencia interferente percibida por el equipo de usuario objetivo desde un eNB vecino. Se mide en watts

La tabla Ap.B22 muestra los valores de potencias interferentes por usuario desde cada eNB en unidades lineales y el valor de potencia de interferencia total sobre cada uno de los usuarios. Se realizó los cálculos teóricos correspondientes y respaldan los valores obtenidos del simulador.





## APÉNDICE B: VERIFICACIÓN DEL SIMULADOR

Potencia de recepción interferente (mW)					
usuario	eNB2	eNB3	eNB4	Interferencia Total	<b>Interferencia Total (dBm)</b>
1	0.00033	0.00273	0.00444	0.00751	-51.2464
2	0.00047	0.00140	0.00764	0.00951	-50.2174
3	0.00030	0.00144	0.00817	0.00991	-50.0390

**Tabla Ap.B22** Potencias interferentes de los eNB vecinos a los equipos de usuario

- **Prueba 12**

Fecha :	24/02/2014 – 28/02/2014	Prueba No.	12
<b>Descripción de prueba:</b>	Prueba que verifica el código de cálculo de SINR		
<b>Elementos Requeridos</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Elemento</b>	
	1	Computador portátil	
	1	Software Matlab® versión 7.13	
<b>Resultados Esperados</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelar el ruido térmico.</li> <li>• Obtener una matriz con los valores de SINR para cada usuario.</li> </ul>		
<b>Resultados obtenidos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se obtuvo el valor de ruido térmico para para un ancho de banda de 1 Hz a temperatura ambiente.</li> <li>• Se obtuvo una matriz con el valor de la SINR percibida por cada usuario en cada una de las celdas del sistema.</li> </ul> <p>La verificación de este segmento de código se realizó mediante el procedimiento 5.</p>		
<b>Observaciones</b>	Esta prueba permite verificar totalmente el requerimiento 15, se continúa desarrollando el código para incluir más funcionalidades.		

**Tabla Ap.B23** Descripción prueba 12



- **Procedimiento 5**

Procedimiento que se realizó para verificar el valor de SINR calculado por el simulador para los usuarios del sistema. La SINR se define como indica la ecuación Ap.B8

$$\text{sinr} = \frac{P_{rx}}{P_i + P_N} \quad (\text{Ap.B8})$$

Donde,

$\text{sinr}$  Valor de la relación señal a interferencia más ruido percibida por un usuario objetivo en un eNB objetivo. Es adimensional

$P_{rx}$  Potencia de la señal recibida por un usuario objetivo de un eNB objetivo. Se mide en watts

$P_i$  Potencia interferente co-canal total recibida por un usuario objetivo de los eNB vecinos. Se mide en watts

$P_N$  Potencia de ruido térmico. Se mide en watts

El valor del ruido térmico se modela de acuerdo al ancho de banda seleccionado y al número de bloques de recursos que el sistema ofrece a cada usuario. La ecuación Ap.B9 indica el cálculo del ancho de banda por usuario en el sistema.

$$BW_{UE} = \text{Numero de Bloques de recursos} * 180.000 \text{ Hz} \quad (\text{Ap.B9})$$

La potencia de ruido térmico en el simulador se modela como muestra la ecuación Ap.B10 considerando temperatura ambiente.

$$P_N = -174 + 10 \log_{10}(BW_{UE}) \quad (\text{Ap.B10})$$

Donde,

$BW_{UE}$  Ancho de banda por equipo de usuario en el sistema



## APÉNDICE B: VERIFICACIÓN DEL SIMULADOR

Para este caso de prueba en el que el ancho de banda del sistema es de 20 MHz y hay 10 equipos de usuario por sector, el valor de la potencia de ruido térmico que resulta de la simulación es de  $-116.6760$  dBm y de  $2.0498 * 10^{-12}$  W.

Considerando la información de potencia de recepción y potencia interferente de los 3 equipos de usuario de la prueba 11, se convierten a unidades lineales y se reemplazan los valores en la ecuación Ap.B8 para obtener la SINR correspondiente. La tabla Ap.B24 muestra los valores de SINR para los tres equipos de usuario que ofrece el simulador y que corresponden a los obtenidos teóricamente.

Usuario	SINR (dB)
1	8.6876
2	-7.3471
3	-8.8299

Tabla Ap.B24 Valor de SINR para los 3 equipos de usuario de prueba

- Prueba 13

Fecha :	10/03/2014 – 14/03/2014	Prueba No.	12
Descripción de prueba:	Prueba del cálculo de <i>throughput</i> del sistema		
Elementos Requeridos	Cantidad	Elemento	
	1	Computador portátil	
	1	Software Matlab® versión 7.13	
Resultados Esperados	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mapear los valores de SINR obtenidos para cada usuario con los valores de SINR de referencia para una BLER menor o igual al 10%.</li><li>• Matriz de datos con los valores de <i>throughput</i> percibido por usuarios de sector, celda y sistema.</li><li>• Obtener el <i>throughput</i> promedio del sistema.</li></ul>		
Resultados obtenidos	<ul style="list-style-type: none"><li>• Se obtuvo una matriz con los valores de mapeo de la SINR de referencia para una BLER menor o igual al 10%</li><li>• Se obtuvo una matriz con el Índice de Calidad de Canal (CQI) asignado a cada usuario.</li></ul>		



## APÉNDICE B: VERIFICACIÓN DEL SIMULADOR

	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se obtuvo una matriz con el valor del tamaño del bloque de transporte (TBS) según las condiciones de MCS y SINR.</li> <li>Se obtuvo una matriz con el valor del <i>throughput</i> por usuario, sector celda y sistema.</li> </ul> <p>La verificación de este segmento de código se realizó inicialmente mediante el seguimiento del mapeo de los valores de SINR, CQI, TBS que determinan el valor del <i>throughput</i> por usuario, sector, celda y sistema.</p> <p>Una vez comprobado que el simulador realiza las asignaciones de los indicadores de desempeño, se procede a realizar el procedimiento 6 para comparar los valores de <i>throughput</i> obtenidos con las tasas teóricas.</p>
<b>Observaciones</b>	Esta prueba permite verificar totalmente los requerimientos 13 y 16.

**Tabla Ap.B25** Descripción prueba 13

### - Procedimiento 6

Procedimiento que se realizó para verificar los resultados de *throughput* por usuario obtenidos del simulador, al comparar con tasas pico teóricas para LTE. La tabla Ap.B26 muestra los valores pico de *throughput* en el enlace descendente para diferentes anchos de banda de canal en LTE, mientras que la tabla Ap.B27 representa los valores de *throughput* obtenidos en el simulador para diferentes valores de SINR, índices de calidad de canal (CQI) y modulación al considerar un ancho de banda de 20 MHz y 33 usuarios por sector.

<b>Modulación y codificación</b>	Uso MIMO	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
QPSK ½	SISO	0.8	2.2	3.7	7.4	11.2	14.9
16 QAM ½	SISO	1.5	4.4	7.4	14.9	22.4	29.9
16 QAM ¾	SISO	2.3	6.6	11.1	22.3	33.4	44.8
64 QAM ¾	SISO	3.5	9.9	16.6	33.5	50.4	67.2
64 QAM	SISO	4.6	13.2	22.2	44.7	67.2	89.7

**Tabla Ap.B26** Velocidades de transmisión de datos pico en el DL (Mbps)



## APÉNDICE B: VERIFICACIÓN DEL SIMULADOR

SINR (dB)	CQI	Modulación	Throughput (Mbps)
5.816	6	QPSK	13.6
11.26	9	16 QAM	28
27.01	15	64 QAM	71.2

**Tabla Ap.B27** Valores de *throughput* alcanzados por el simulador

Al comparar las tabla Ap.B26 y la tabla Ap.B27 se observa que los valores de *throughput* obtenidos de la simulación son menores a los valores pico de LTE, sin embargo se mantienen dentro del rango y concuerdan con los valores de la especificación TS 36.213.

- **Prueba 14**

Fecha :	03/03/2014 – 07/03/2014	Prueba No.	12
<b>Descripción de prueba:</b>	Prueba que verifica el funcionamiento de la interfaz gráfica de usuario		
<b>Elementos Requeridos</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Elemento</b>	
	1	Computador portátil	
	1	Software Matlab® versión 7.13	
<b>Resultados Esperados</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se despliega una interfaz gráfica de usuario amigable que permite la selección de las entradas al simulador para realizar los cálculos de cobertura y capacidad.</li> <li>• La interfaz gráfica se conecta con el bloque de cálculo de cobertura y el bloque de cálculo de capacidad a fin de realizar una simulación conforme las preferencias del usuario.</li> </ul>		
<b>Resultados obtenidos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se obtuvo una interfaz gráfica principal en la que el usuario puede elegir entre realizar cálculos de cobertura o cálculos de capacidad.</li> <li>• Se obtuvo una interfaz secundaria que permite al usuario modificar los parámetros de entrada del bloque de cálculo de cobertura: potencia de transmisión del eNB, modelo de</li> </ul>		



## APÉNDICE B: VERIFICACIÓN DEL SIMULADOR

	<p>propagación, frecuencia de operación, tipo de desvanecimiento, radio de la celda, tipo, <i>tilt</i> y azimut de antena.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Se obtuvo una interfaz secundaria que permite al usuario modificar los parámetros de entrada del bloque de cálculo de capacidad: número de usuarios por sector, el ancho de banda del sistema, la potencia de transmisión del eNB, la frecuencia de operación, el modelo de propagación, el radio de la celda y el tipo de antena.</li></ul> <p>La verificación del código de interfaces se desarrolló evaluando que la interfaz para cada bloque permitiera la selección de los parámetros respectivos y que los valores seleccionados efectivamente afectaran los resultados en simulación.</p>
<b>Observaciones</b>	Esta prueba permite verificar totalmente los requerimientos 3, 4, 5, 7, 10 y 11.

**Tabla Ap.B28** Descripción prueba 14



## APÉNDICE C: MANUAL DE USUARIO

### C.1. INTRODUCCIÓN

A continuación se presenta el manual de usuario del simulador básico a nivel de sistema para LTE desarrollado en la Universidad del Cauca, este describe los archivos que lo conforman, la interfaz de usuario y algunos de los problemas con los que el usuario se puede encontrar y la manera de resolverlo.

Este simulador se ofrece de manera gratuita para uso académico. Fue desarrollado en el software Matlab® de Mathworks y puede ejecutarse en la versión 7.13 y sus compatibles.

El objetivo del simulador básico a nivel de sistema para LTE es permitir el cálculo de cobertura y capacidad para escenarios de red caracterizados por los parámetros variables disponibles en el simulador.

### C.2. ARCHIVOS DEL SIMULADOR

La carpeta que contiene al simulador recibe el nombre de “SBNS LTE UNICAUCA”, dentro se pueden encontrar 30 archivos que se describen a continuación:

GUI\_principal.m: archivo que controla la interfaz principal del simulador. Ofrece enlace a los bloques de cálculo de capacidad y cobertura.

GUI\_principal.fig: interfaz principal del simulador. Ofrece la posibilidad de elegir entre iniciar el cálculo de cobertura o cálculo de capacidad.

GUI\_parametros\_capacidad.m: archivo que controla la interfaz del bloque de cálculo de capacidad del simulador. Dirige los valores de los parámetros de simulación al archivo de cálculo de capacidad.

GUI\_parametros\_capacidad.fig: interfaz del bloque de cálculo de capacidad del simulador. Permite la elección de diferentes parámetros que caracterizan el escenario de simulación.



GUI\_parametros\_cobertura.m: archivo que controla la interfaz del bloque de cálculo de cobertura del simulador. Dirige los valores de los parámetros de simulación al archivo de cálculo de cobertura.

GUI\_parametros\_cobertura.fig: interfaz del bloque de cálculo de cobertura del simulador. Permite la elección de diferentes parámetros que caracterizan el escenario de simulación.

Simulador\_LTE\_capacidad.m: archivo que recibe los valores de cada uno de los parámetros en la interfaz de cálculo de capacidad, los almacena y realiza la simulación del sistema planteado.

CQI.xls: hoja de cálculo que relaciona los valores de SINR y CQI para la asignación del esquema de codificación y modulación en el cálculo de capacidad.

capacidad.xls: hoja de cálculo que relaciona los valores de CQI y TBS para la asignación del esquema de codificación y modulación en el cálculo de capacidad.

Simulador\_LTE\_cobertura.m: archivo que recibe los valores de cada uno de los parámetros en la interfaz de cálculo de capacidad, los almacena y realiza la simulación del sistema planteado.

Los 20 archivos restantes corresponden a archivos .msi y describen el patrón de radiación de las antenas Katherein implementadas. La carpeta contiene un archivo por cada valor de *tilt* de antena.

### **C.3. INTERFAZ DEL SIMULADOR**

Para ingresar al simulador es necesario seleccionar en la carpeta “SBNS LTE UNICAUCA” el archivo GUI\_principal.m, este despliega la interfaz gráfica principal que permite elegir entre realizar un cálculo de capacidad o uno de cobertura. Figura Ap.C1 muestra la interfaz principal descrita.

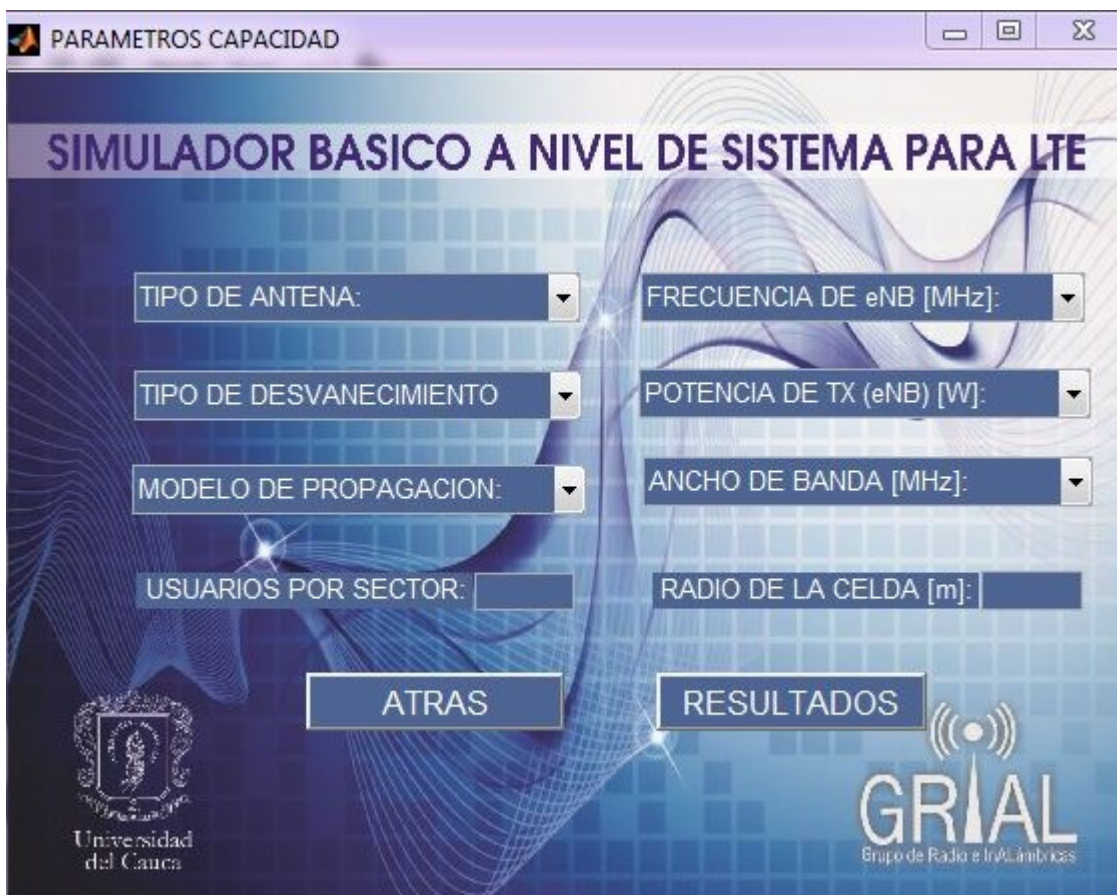




**Figura Ap.C1** Interfaz principal del simulador básico a nivel de sistema para LTE

Una vez realizada la selección entre el cálculo de capacidad y cobertura, se despliega la interfaz que permite la configuración de los parámetros del sistema.

En la figura Ap.C2 se muestra la interfaz que despliega la información necesaria para realizar los cálculos de capacidad.



**Figura Ap.C2** Interfaz de cálculo de capacidad del simulador básico a nivel de sistema para LTE

La interfaz de cálculo de capacidad de la figura Ap.C2 permite seleccionar los valores de los parámetros que se muestran en los menús desplegados entre los rangos que indica la tabla Ap.C1.

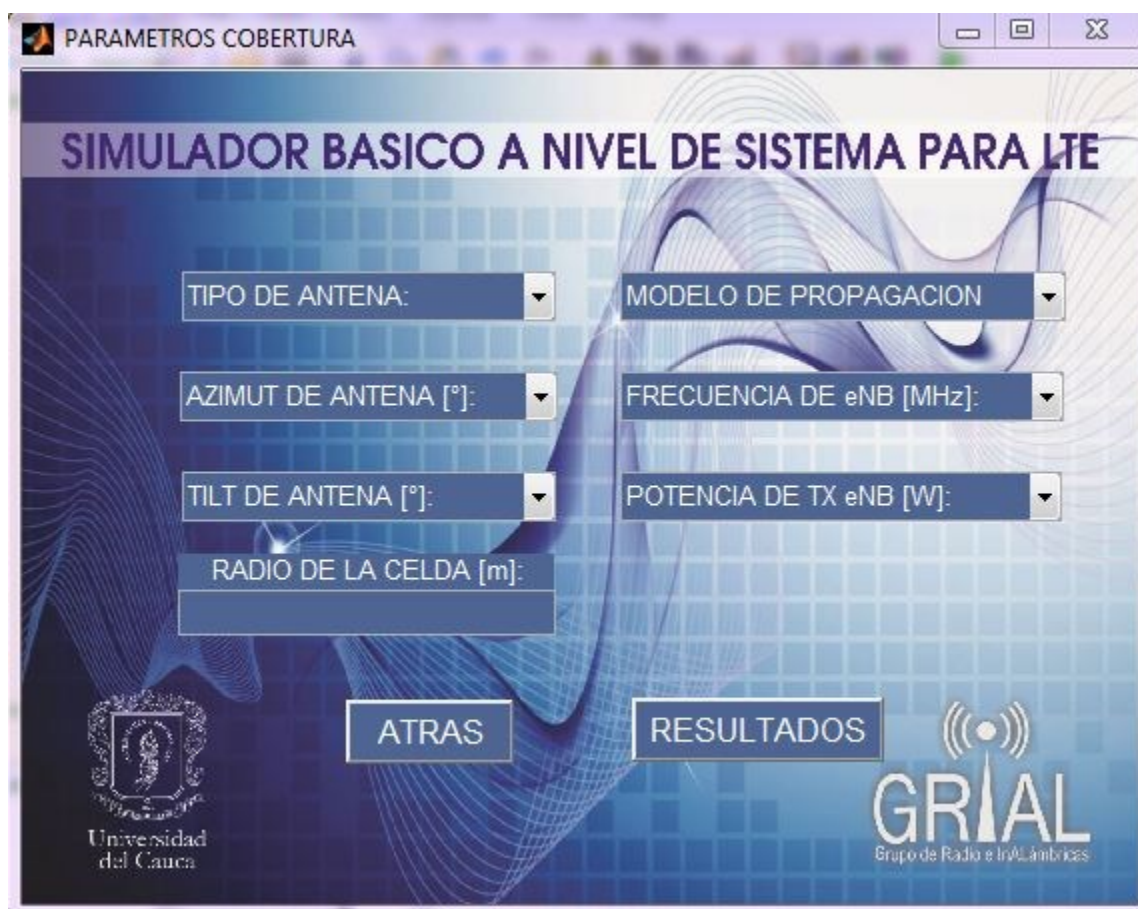
Parámetros variables	Valores
Potencia de transmisión [W]	20, 40
Frecuencia de transmisión [MHz]	1720, 1900, 2500
Tipo de antena	Katherein 742215, Katherein 80010681, TR 36.942
Modelo de propagación	Espacio libre COST 231 macro Urbano COST 231 micro Suburbano COST 231 macro Suburbano TR 36.942 Urbano TR 36.942 Suburbano



Tipo de desvanecimiento	Rápido, lento
Ancho de banda de la celda (MHz)	3, 5, 10, 15, 10
Radio de la celda (m)	Definido por el usuario
Número de usuarios por sector	Límite máximo de acuerdo a ancho de banda seleccionado

**Tabla Ap.C1** Parámetros variables para el cálculo de capacidad en el simulador básico a nivel de sistema para LTE

La figura Ap.C3 muestra la interfaz que permite realizar los cálculos de cobertura del sistema.



**Figura Ap.C3** Interfaz de cálculo de cobertura del simulador básico a nivel de sistema para LTE



La interfaz de cálculo de cobertura de la figura Ap.C3 permite seleccionar los valores de los parámetros que se muestran en los menús desplegables entre los rangos que indica la tabla Ap.C2.

Parámetros variables	Valores
Potencia de transmisión [W]	20, 40
Frecuencia de transmisión [MHz]	1720, 1900, 2500
Tipo de antena	Katherein 742215, Katherein 80010681, TS 36.942
Modelo de propagación	Espacio libre COST 231 macro Urbano COST 231 micro Suburbano COST 231 macro Suburbano TR 36.942 Urbano
Tilt de antena (°)	0-10
Azimuth de antena (°)	0, 45, 90, 135, 180, 225, 270
Radio de la celda (m)	Definido por el usuario

**Tabla Ap.C2** Parámetros variables para el cálculo de cobertura en el simulador básico a nivel de sistema para LTE

Cuando se hayan fijado los valores de los parámetros para el cálculo de capacidad o cobertura según la elección, se debe presionar el botón resultados ubicado en el costado derecho de la interfaz, esta acción permite el despliegue del archivo de simulación de capacidad o cobertura.

Finalmente se debe ejecutar el archivo de cálculo a través del icono de la función *run* en Matlab o presionando la tecla F5, de esta manera al finalizar la ejecución se podrán observar los resultados.

#### C.4. RESULTADOS

Cuando el archivo termina de ejecutarse se muestran los resultados del cálculo realizado. La tabla Ap.C3 lista los resultados que se obtienen del bloque de cálculo de cobertura y el bloque de cálculo de capacidad.





<b>Bloque de Calculo</b>	<b>Resultados</b>
<b>Bloque de capacidad</b>	Gráfica de escenario de simulación con distribución de usuarios
	SINR de la celda 1
	SINR de la celda 2
	SINR de la celda 3
	SINR de la celda 4
	SINR del sistema
	<i>Throughput</i> Celda 1
	<i>Throughput</i> Celda 2
	<i>Throughput</i> Celda 3
	<i>Throughput</i> Celda 4
	<i>Throughput</i> del sistema
<b>Bloque de cobertura</b>	Gráfica de patrón teórico de la antena
	Gráfica de colores de la potencia de recepción en el sector 1 de la celda 1 a la celda 4
	Gráfica de colores de la potencia de recepción en el sector 2 para la celda 1 a la celda 4
	Gráfica de colores de la potencia de recepción en el sector 3 para la celda 1 a la celda 4
	Gráfica de colores de la potencia de recepción en el sector 4 para la celda 1 a la celda 4
	Gráfica de colores de la potencia de recepción con efecto del desvanecimiento rápido en el sector 1 para la celda 1 a la celda 4
	Gráfica de colores de la potencia de recepción con efecto del desvanecimiento rápido en el sector 2 para la celda 1 a la celda 4
	Gráfica de colores de la potencia de recepción con efecto del desvanecimiento rápido en el sector 3 para la celda 1 a la celda 4
	Gráfica de colores de la potencia de recepción con efecto del desvanecimiento rápido en el sector 4 para la celda 1 a la celda 4

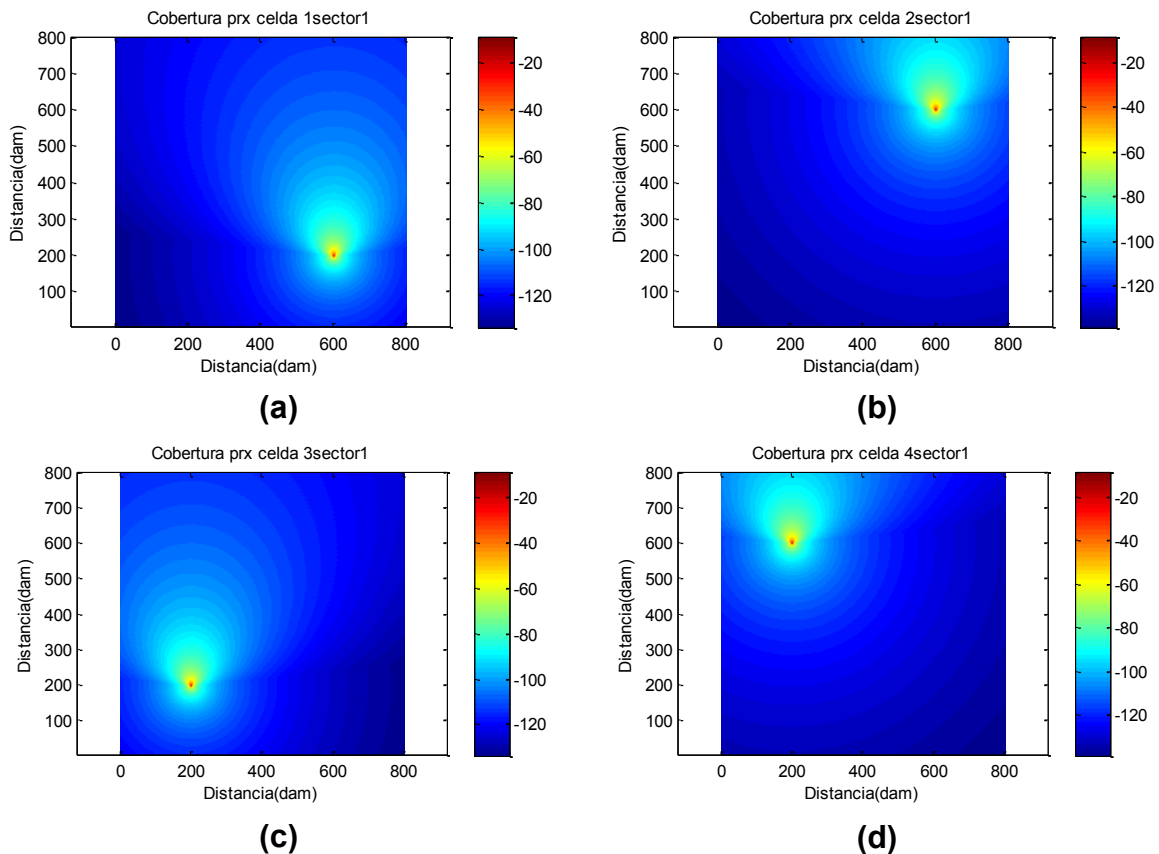
**Tabla Ap.C3** Resultados para el bloque de cálculo de capacidad y el bloque de cálculo de cobertura



A continuación se presentan los resultados brindados por el simulador tanto en cobertura como en capacidad.

- **RESULTADOS GRAFICOS EN COBERTURA**

Las figura Ap.C4 a la figura Ap.C9 presentan los resultados gráficos en cobertura que ofrece el simulador básico a nivel de sistema para LTE, estos se encuentran en función de la distancia y de la potencia de recepción para cada sector en las cuatro celdas que componen el sistema, ubicándose el sector 1 a un ángulo azimut de  $90^\circ$  respecto al eje x positivo, el sector 2 a  $120^\circ$  en el sentido de las manecillas del reloj respecto al sector 1 y el sector 3 a  $120^\circ$  en contra de las manecillas del reloj respecto al sector 1. Adicionalmente, se presentan los resultados para el escenario cuando se evalúa el sistema con desvanecimiento rápido y cuando no se considera el efecto del desvanecimiento. Dichas figuras presentan la totalidad de resultados obtenidos en cobertura específicamente para el caso de estudio 1 cuando se evalúa la antena TR 36.942.



**Figura Ap.C4** Potencia de Recepción para el sector 1 de todas las celdas

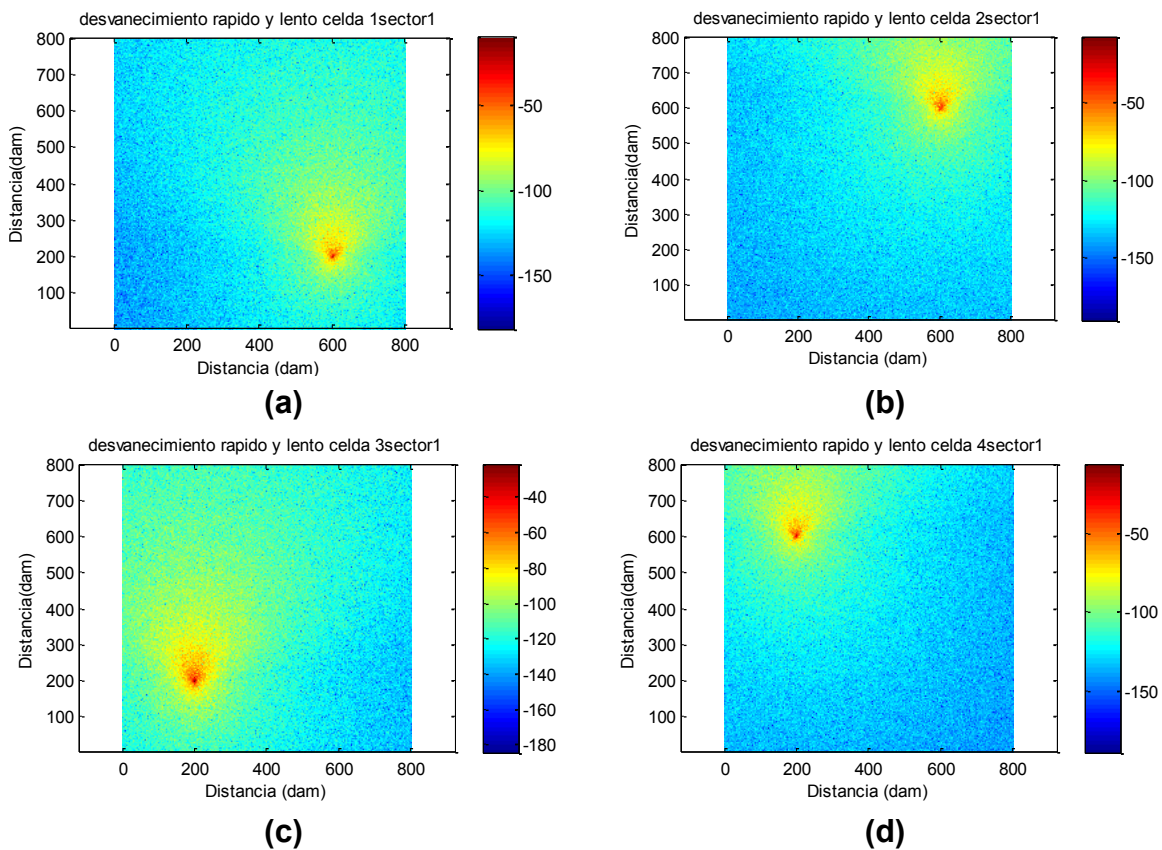
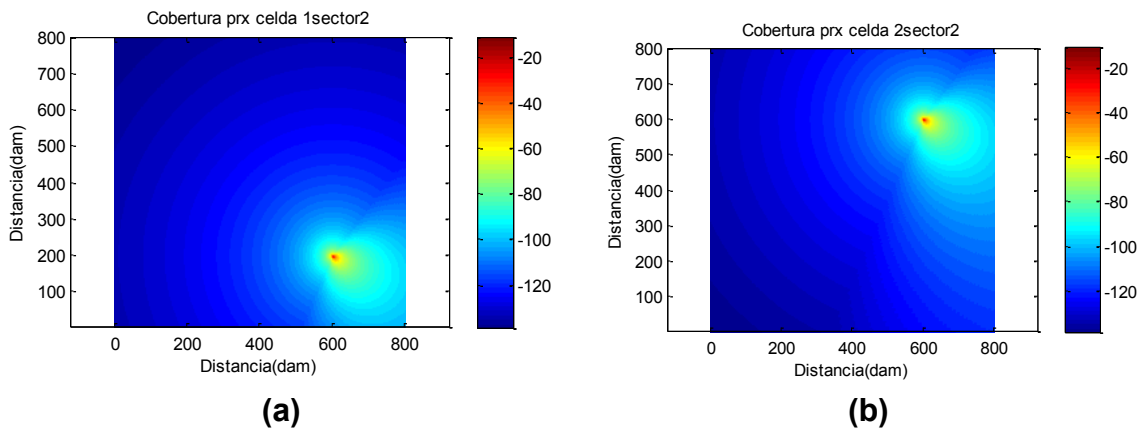


Figura Ap.C5 Potencia de Recepción para el sector 1 de todas las celdas – Con desvanecimiento



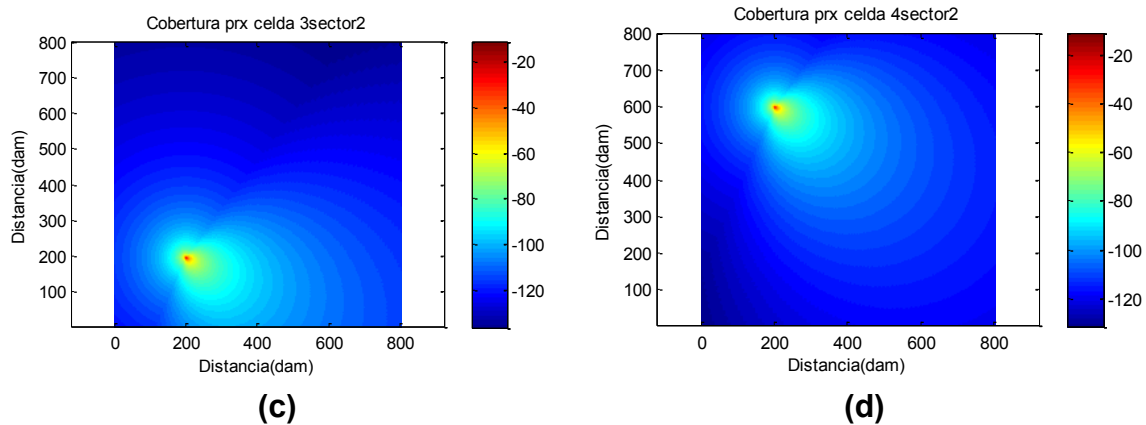


Figura Ap.C6 Potencia de Recepción para el sector 2 de todas las celdas

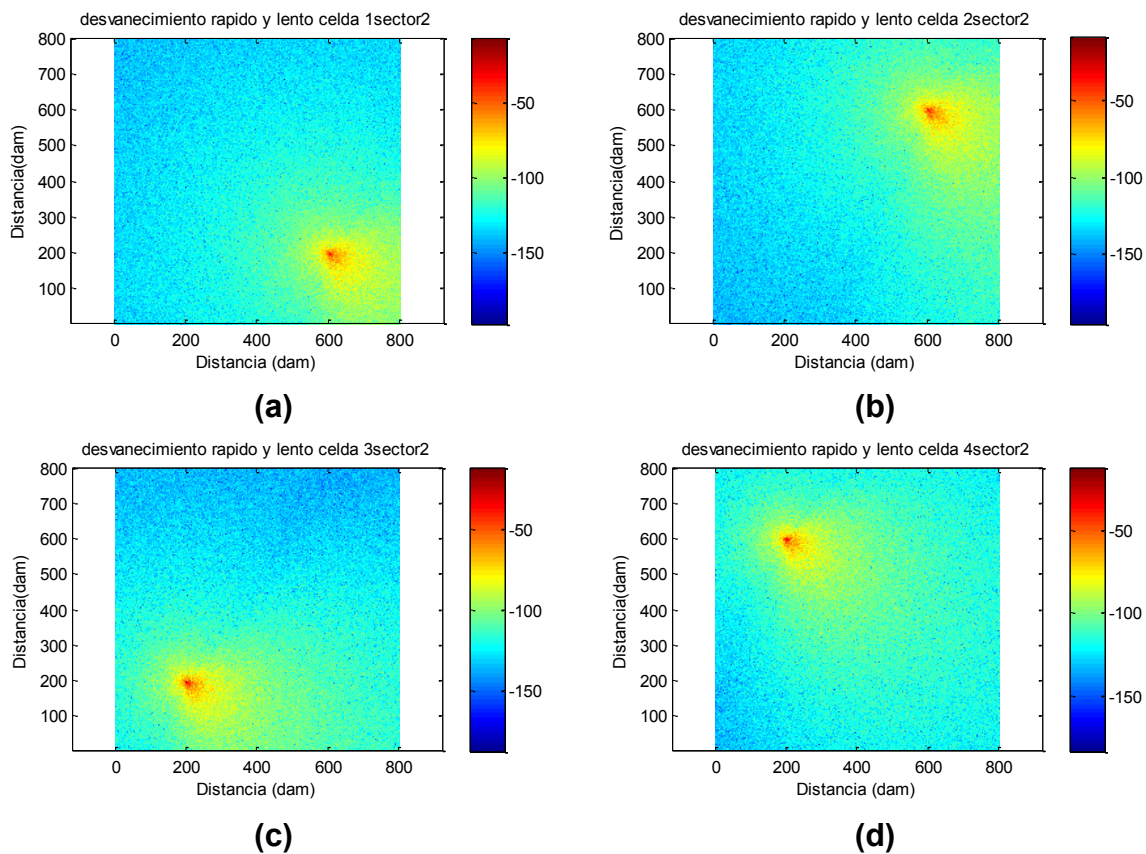


Figura Ap.C7 Potencia de Recepción para el sector 2 de todas las celdas – Con desvanecimiento



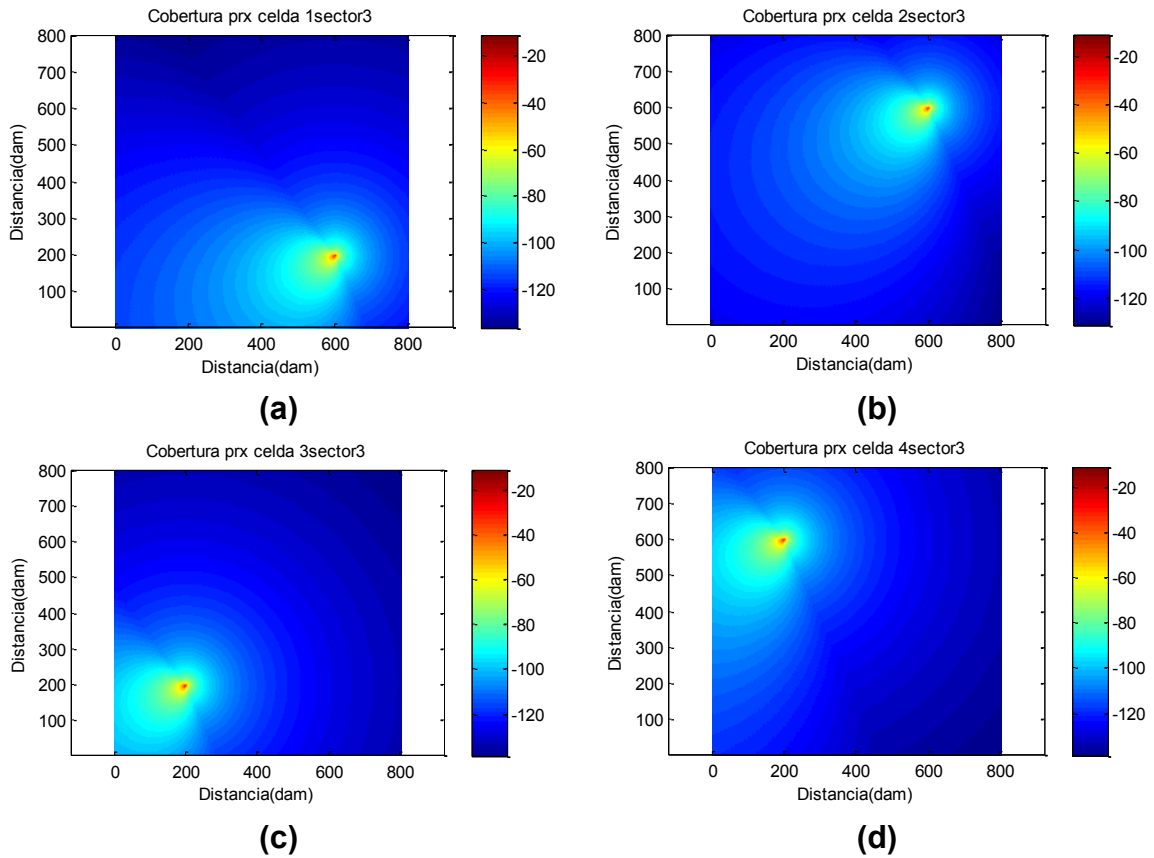
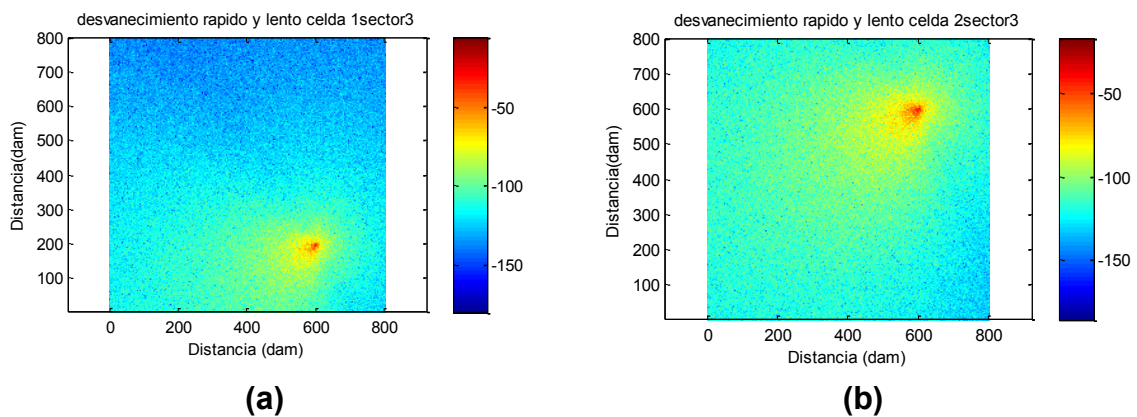


Figura Ap.C8 Potencia de Recepción para el sector 3 de todas las celdas



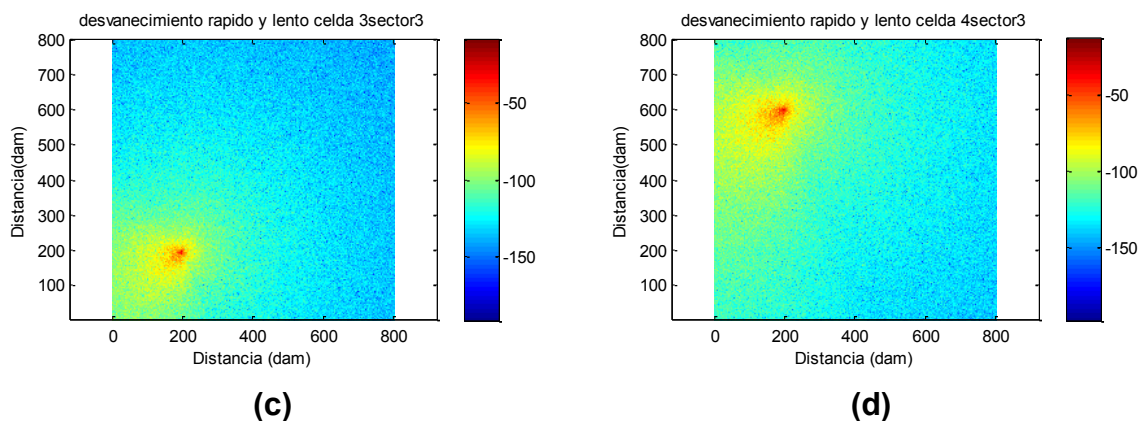


Figura Ap.C9 Potencia de Recepción para el sector 3 de todas las celdas – Con desvanecimiento

• RESULTADOS GRAFICOS EN CAPACIDAD

Las figuras Ap.C10 a la Ap.C17 presentan los resultados del desempeño en capacidad que ofrece el simulador básico a nivel de sistema para LTE, estos son el escenario de simulación con las celdas sectorizadas y los usuarios distribuidos aleatoriamente, histogramas de SINR por celda, histogramas de *throughput* por celda y sistema, además de curvas de función de densidad de probabilidad para la SINR y el *throughput* por celda y sistema. Los resultados en capacidad del sistema se muestran para desvanecimiento lento o desvanecimiento rápido de acuerdo a la selección del usuario.

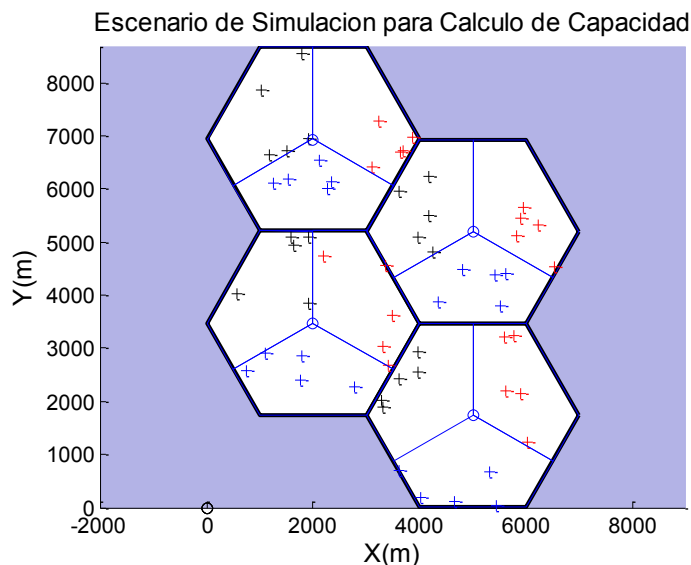
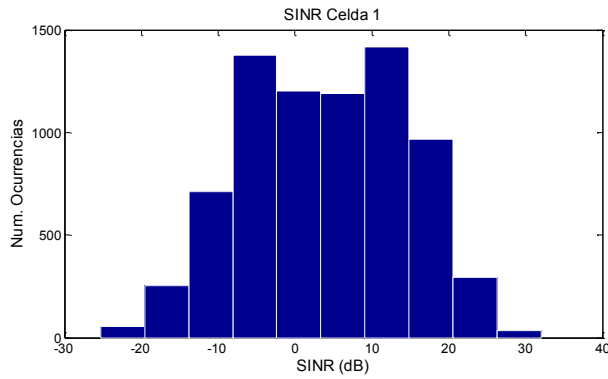
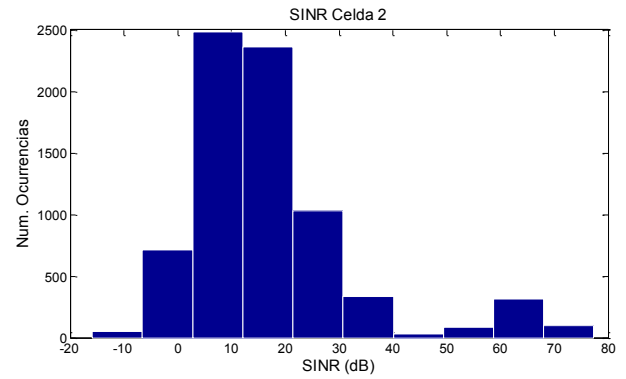


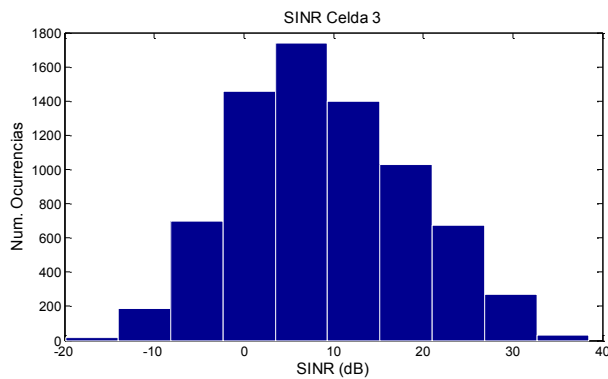
Figura Ap.C10 Escenario de simulación para cálculo de capacidad



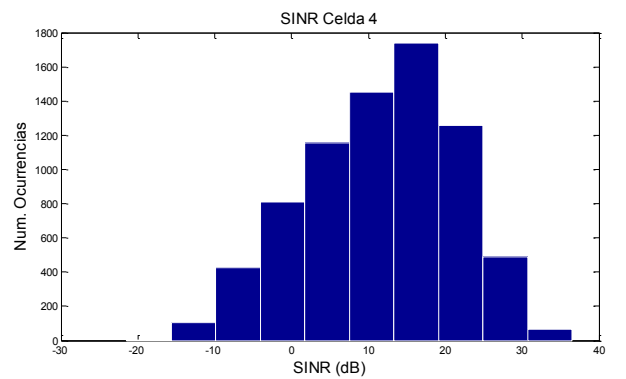
(a)



(b)

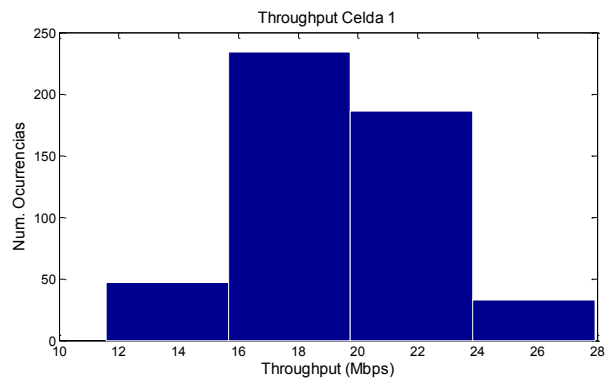


(c)

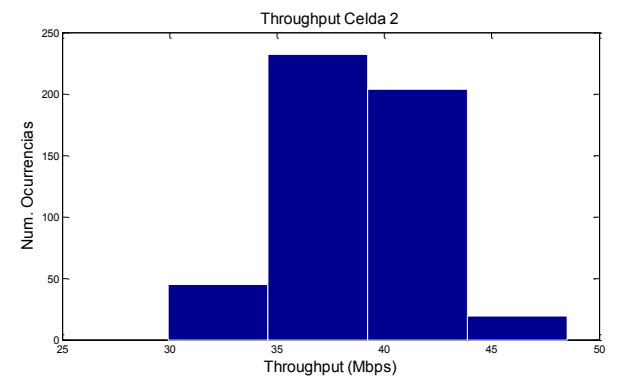


(d)

Figura Ap.C11 Histograma de SINR para todas las celdas del sistema



(a)



(b)

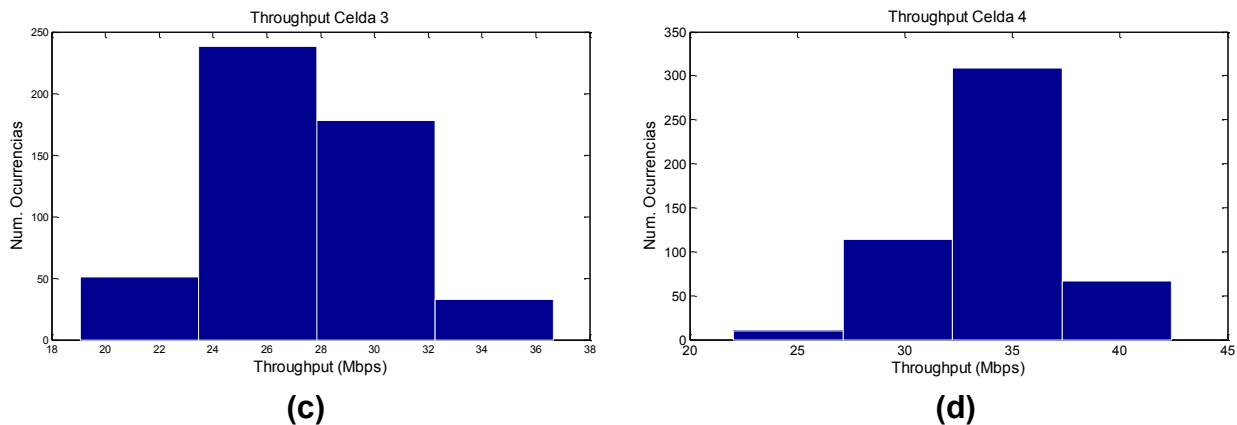


Figura Ap.C12 Histograma de *throughput* para todas las celdas del sistema

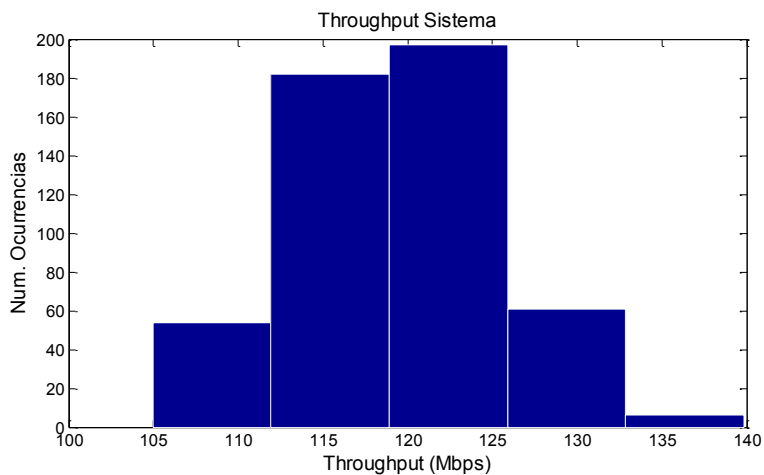


Figura Ap.C13 Histograma del *throughput* promedio de sistema

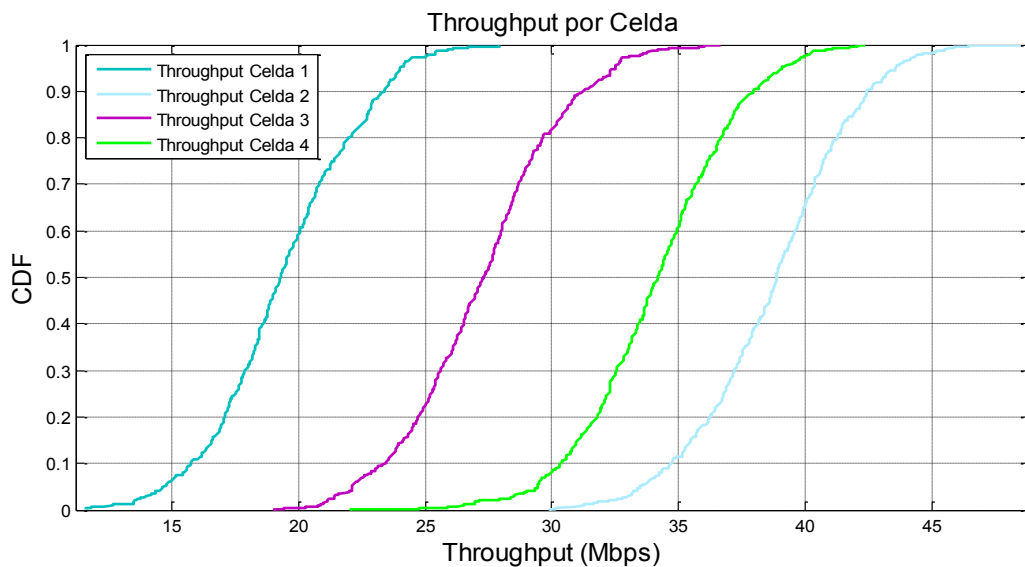


Figura Ap.C15 CDF del *throughput* para todas las celdas del sistema

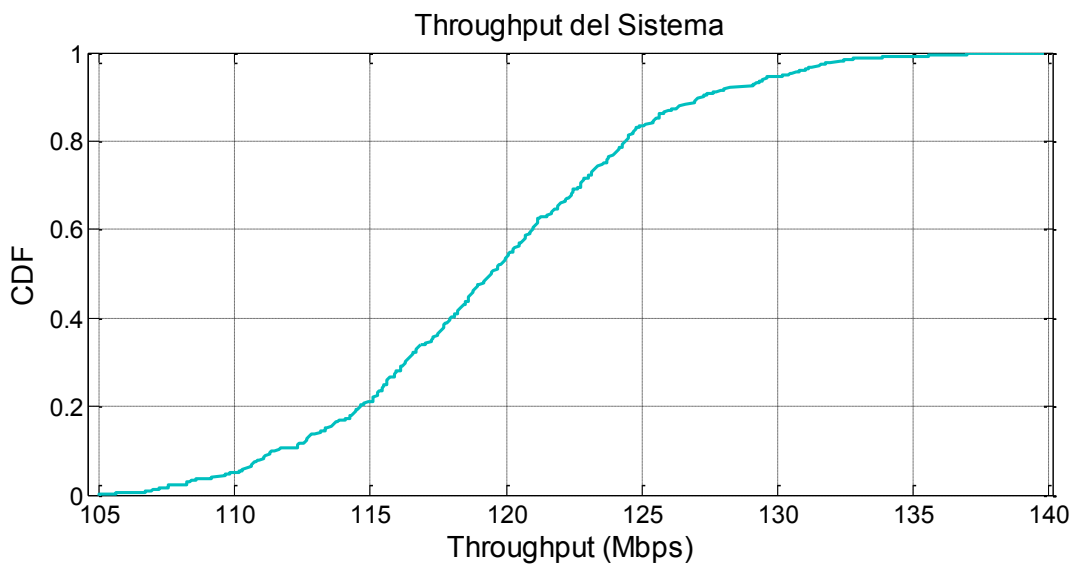


Figura Ap.C16 CDF del *throughput* promedio del sistema

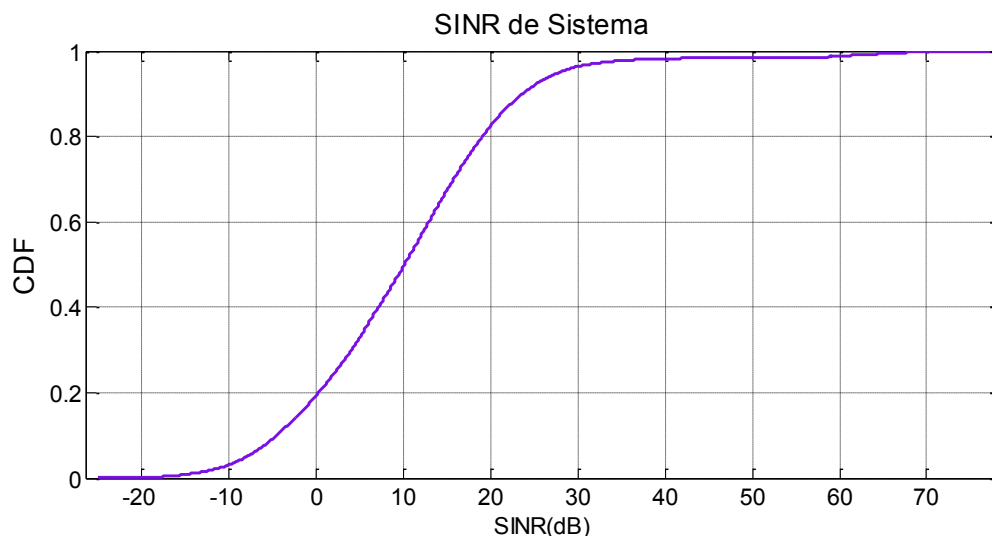


Figura Ap.C17 CDF de la SINR promedio del sistema

## C.5. RECOMENDACIONES

En caso de que el simulador genere un error en la ventana de comandos que indique que una de las variables no se reconoce, puede solucionarlo corriendo nuevamente la interfaz y asegurándose de seleccionar un valor para todos los parámetros que considera la interfaz de cálculo de capacidad o cobertura, elegir el botón resultados y ejecutar el código de cálculo de capacidad como se ha indicado.

El simulador restringe el número de equipos de usuario por sector de acuerdo al valor de ancho de banda seleccionado en la interfaz de cálculo de capacidad a fin de asegurar que los usuarios reciban la mínima unidad de recursos disponibles. En caso de que el número de usuarios sea superior al permitido, la interfaz muestra una ventana de información que indica el error, por ejemplo si para un ancho de banda de 15 MHz se elige un número de equipos de usuario por sector superior a 25 se despliega el cuadro de información que muestra la figura Ap.C18.

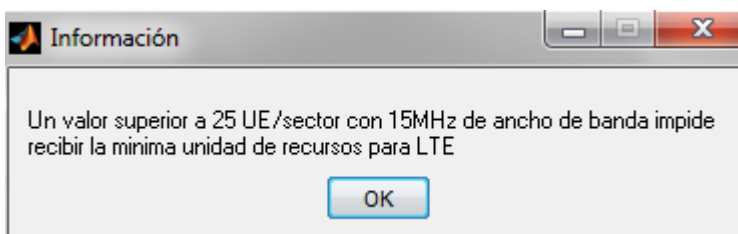


Figura Ap.C18 Mensaje de información.



La tabla Ap.C4 relaciona el máximo número de equipos de usuario permitido para cada ancho de banda.

Ancho de Banda(MHz)	Número de equipos de usuario
3	5
5	8
10	16
15	25
20	33

**Tabla Ap.C4** Número máximo de equipos de usuario por sector según el ancho de banda



## ANEXO A: MODELOS DE PROPAGACIÓN

En sistemas de comunicación inalámbrica, la información viaja entre el transmisor y la antena del receptor a través de ondas electromagnéticas. Una interacción se produce en el medio ambiente durante la propagación de la onda que provoca una degradación en la señal transmitida, llamada pérdida de trayectoria (PL, *Path Loss*) [1], esta se puede expresar como muestra la ecuación A.1:

$$L = P_T + G_T + G_R + P_R - L_T - L_R \quad (\text{A.1})$$

Donde,

- $L$  Pérdida de trayectoria. Se mide en dB
- $P_T, P_R$  Potencias para el transmisor y receptor respectivamente. Se miden en dBm
- $G_T, G_R$  Ganancias de transmisión y recepción de la antena respectivamente. Se miden en dBi
- $L_T, L_R$  Pérdidas para el transmisor y el receptor respectivamente. Se miden en dB

La planificación de la red inalámbrica requiere un modelo de propagación adecuado basado en el cálculo de la intensidad del campo eléctrico y la evaluación de la pérdida de trayectoria. Los modelos de propagación son importantes para predecir el área de cobertura, analizar la interferencia, asignar frecuencias y calcular parámetros básicos de las celdas para el proceso de planificación de la red [2].

La pérdida de trayectoria se caracteriza por dos tipos principales de modelos: determinísticos y modelos empíricos. Los primeros usan leyes físicas que rigen la propagación de ondas electromagnéticas y calculan la potencia de señal recibida en un lugar determinado, estos modelos requieren información geométrica detallada sobre el perfil del terreno, la ubicación y dimensiones de los edificios. Los modelos empíricos se basan en mediciones y predicen la pérdida media de trayectoria como una función de diversos parámetros, por ejemplo, alturas de antena, distancia y frecuencia [1]. Este tipo de modelos se basan en la caracterización estadística de la señal recibida, son más fáciles de implementar,





requieren menor procesamiento computacional, y son menos sensibles a la geometría del medio ambiente [3].

### A.1. Espacio Libre

Modelo que representa el escenario más simple posible, trata la región entre las antenas transmisora y receptora como libre de todos los objetos que puedan absorber o reflejar la energía de Radio Frecuencia (RF, *Radio Frequency*). En este modelo de espacio libre idealizado, la atenuación de la energía de RF entre el transmisor y el receptor se comporta de acuerdo a la ley del inverso cuadrado, y se considera la tierra infinitamente lejos de la señal de propagación, es decir con un coeficiente de reflexión insignificante. La pérdida de trayectoria se expresa como la relación entre la potencia recibida y la transmitida en unidades lineales, dada por la fórmula de transmisión de Friss descrita en la ecuación A.2 [4]:

$$L = \frac{P_R}{P_T} = \frac{G_T G_R \lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (\text{A.2})$$

Donde,

- $L$  Perdida de trayectoria. Se mide en dB
- $P_T, P_R$  Potencias para el transmisor y receptor respectivamente. Se miden en watts
- $G_T, G_R$  Ganancias de la transmisión y recepción de la antena respectivamente. Son adimensionales
- $\lambda$  Longitud de onda de la señal. Se mide en metros
- $d$  Distancia entre el transmisor y el receptor. Se mide en metros

Una manera simplificada y conveniente de expresar la fórmula de pérdidas de trayectoria del modelo de espacio libre se muestra en la ecuación A.3 [5]:

$$L = 32.4 + 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) \quad (\text{A.3})$$

Donde,

- $d$  Distancia entre el transmisor y el receptor. Se mide en kilómetros
- $f$  Frecuencia de Transmisión. Se mide en MHz



## A.2. COST HATA

La Cooperativa Europea para la Investigación Científica y Técnica (EURO-COST, *The European Co-operative for Scientific and Technical research*) formó el comité de trabajo COST-231 para experimentar e investigar modelos de propagación existentes y crear nuevos basado en los planteamientos de Walfisch-Bertoni, Ikegami y Hata [6]. Para el interés de este trabajo de grado se explican los modelos de propagación COST231-Hata y el modelo COST 231-Walfish Ikegami. Cada modelo está definido para uno o más ambientes por lo que es necesario considerar inicialmente los tipos de celda que tiene en cuenta COST 231 para aplicar sus modelos de propagación, a fin de aclarar el tipo de ambiente en el que cada uno puede desarrollarse. La tabla A.1 muestra la información que relaciona el tipo de celda con el rango del radio que lo caracteriza.

Tipo de Celda	Radio Típico de Celda [Km]
Macro Celda (Gran celda)	1 a 30
Pequeña Macro Celda	0.5 a 3
Micro Celda	Hasta 1
Pico Celda (en casa)	Hasta 0.5

**Tabla A.1** Radio típico para tipos de celda.  
Tomada de: [7]

COST 231 propuso la fórmula presentada en la ecuación A.4 para extender el modelo de Okumura-Hata a 2Ghz [8] [9].

$$L = A + B \log_{10}(d) + C \quad (\text{A.4})$$

Los términos A y B de la ecuación A.4 se describen en la ecuación A.5 y A.6:

$$A = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_b) - a(h_m) \quad (\text{A.5})$$

$$B = (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_b)) \quad (\text{A.6})$$

Donde,

$f$  Frecuencia de transmisión. Se mide en MHz

$h_b$  Altura efectiva de la antena de transmisión de la estación base. Se mide en metros

$h_m$  Altura efectiva de la antena de la estación móvil. Se mide en metros

$d$  Distancia entre estación base y estación móvil. Se mide en Kilómetros

$a(h_m)$  Factor de corrección para la altura de la antena de la estación móvil



descrito en el modelo Hata para áreas urbanas como se muestra en la ecuación A.7 [9]. Se mide en dB

- C Parámetro de corrección que se pone a 0dB para ambientes Suburbanos y 3dB para ambientes urbanos. Se mide en dB

$$a(h_m) = (1.1 \log_{10}(f) - 0.7)h_m - (1.56 \log_{10}(f) - 0.8) \quad (\text{A.7})$$

El modelo COST-Hata está restringido a macro celdas grandes y pequeñas [7]. La fórmula del modelo de Hata modificado no debe ser usada para micro celdas. COST- Hata restringe sus parámetros a los valores que muestra la tabla A.2.

Parámetro	Rango
$f_c$ [MHz]	1500-2000
$h_m$ [m]	1-10
$h_b$ [m]	30-200
$d$ [Km]	1-20

**Tabla A.2** Rango de valores permitidos en COST Hata.  
Tomada de: [7]

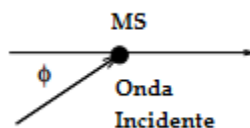
### A.3. COST Walfish Ikegami

Conocido también como modelo COST-WI, es un modelo empírico resultado de la combinación del modelo de J. Walfish y F. Ikegami que propuso COST 231, mejora la estimación de las pérdidas de trayecto considerando mayor cantidad de datos para describir el carácter del entorno urbano [7]. Los parámetros considerados en este modelo de propagación se muestran en la tabla A.3

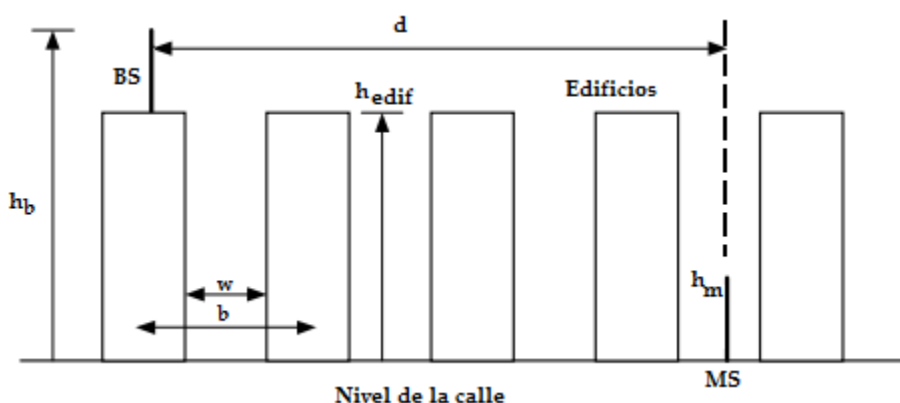
Parámetro	Descripción del parámetro
$h_b$ [m]	Altura efectiva de la antena de transmisión de la estación base
$h_m$ [m]	Altura efectiva de la antena de la estación móvil
$h_{edif}$ [m]	Altura de los edificios
$d$ [m]	Distancia del enlace
$b$ [m]	Separación entre edificios
$w$ [m]	Ancho de la calle
$\varphi$ [m]	Angulo de incidencia de la onda con respecto a la vía

**Tabla A.3** Parámetros considerados por el modelo de propagación Walfish-Ikegami  
Tomada de :[7]

Las figuras A.1 y A.2 muestran la descripción del ángulo  $\varphi$  y el modelo de Walfish Ikegami considerando edificios uniformemente espaciados, con dimensiones idénticas y sin variación en el área del terreno respectivamente.



**Figura A.1** Descripción del ángulo  $\varphi$  para el modelo Walfish Ikegami.  
Tomada de: [10]



**Figura A.2** Escenario del modelo de propagación Walfish Ikegami.  
Tomada de: [11]

Este modelo de propagación distingue entre situaciones de Línea De Vista (LOS, *Line Of Sight*) y su contraria, Sin Línea De Vista (NLOS, *Non Line Of Sight*). Para el caso de LOS la propagación corresponde a una variación respecto a la del modelo de espacio libre, como muestra la ecuación A.8 y para las condiciones de NLOS, las pérdidas por trayectoria se forman de las pérdidas de espacio libre y otros dos componentes que permiten capturar los efectos de la difracción, dispersión y reflexión múltiple de la señal [7].

$$L = 42.6 + 26 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) \quad (\text{A.8})$$

Donde,

- $d$  Distancia del enlace, y debe ser mayor a 0.2. Se mide en Kilómetros
- $f$  Frecuencia de transmisión. Se mide en MHz



Las pérdidas por trayectoria para condiciones de NLOS están dadas por la ecuación A.9.

$$L = L_o + L_{rts} + L_{msd} \quad (\text{A.9})$$

Donde,

- $L_o$  Pérdidas en el espacio libre. Descritas en la ecuación A.3 . Se miden en dB
- $L_{rts}$  Pérdidas del Edificio a la Calle (RTS, *Roof to Street Loss*), representa la difracción desde lo más alto de los edificios cuando la onda se propaga hacia la calle. Como muestra la ecuación A.10, estas pérdidas consideran el ancho y orientación de la calle y se miden en dB
- $L_{msd}$  Pérdidas Múltiples por Difracción (MSDL, *Multi Screen Diffraction Loss*), que generan las alturas de los edificios y sus separaciones espaciales a lo largo de la ruta de acceso radio directo. Se muestran en la ecuación A.12 y se miden en dB

$$L_{rts} = -16.9 - 10\log_{10}(w) + 10\log_{10}(f) + 20\log_{10}(hb - hm) + L_{ori} \quad (\text{A.10})$$

Donde,

- $w$  Ancho de la calle. Se mide en metros
- $f$  Frecuencia de transmisión. Se mide en MHz
- $h_b$  Altura efectiva de la antena de transmisión de la estación base. Se mide en metros
- $h_m$  Altura efectiva de la antena de la estación móvil. Se mide en metros
- $L_{ori}$  Factor de corrección en unidades lineales que está en función de la orientación de la calle y la trayectoria radio directa en grados ( $\varphi$ ). Se muestra en la ecuación A.11 y es adimensional

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.34\varphi & \text{Para } 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\varphi - 35) & \text{Para } 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4.0 - 0.114(\varphi - 55) & \text{Para } 55^\circ \leq \varphi < 90^\circ \end{cases} \quad (\text{A.11})$$

Donde,

- $\varphi$  Angulo de incidencia de la onda con respecto a la calle. Se mide en grados



La ecuación A.12 describe las pérdidas múltiples por difracción necesarias para el cálculo de las pérdidas por trayectoria en este modelo de propagación.

$$L_{msd} = L_{bsh} + K_a + K_d \log_{10}(d) + K_f \log_{10}(f) - 9 \log(b) \quad \text{A.12}$$

Donde,

$l_{bsh}$  Representa la pérdida por la separación entre edificios. Está descrita por la ecuación A.13 y es adimensional

$k_a$  Representa el incremento de las pérdidas por trayectoria para las antenas de estaciones base por debajo de la altura de los edificios adyacentes. Este factor se muestra en la ecuación A.14 y es adimensional

$k_d$  Es la dependencia de la difracción múltiple versus la distancia. Se observa en la ecuación A.15 y es adimensional

$d$  Distancia del enlace. Se mide en kilómetros

$k_f$  Es la dependencia de la difracción múltiple versus la frecuencia. Se describe en la ecuación A.16 y es adimensional

$f$  Frecuencia de transmisión. Se mide en MHz

$b$  Separación entre edificios. Se mide en metros

Las ecuaciones A.13, A.14, A.15 y A.16 que definen los anteriores parámetros se detallan a continuación:

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log_{10}(1 + \Delta h_{base}) & \text{Para } h_b > h_{edif} \\ 0 & \text{Para } h_b \leq h_{edif} \end{cases} \quad \text{(A.13)}$$

$$K_a = \begin{cases} 54 & \text{Para } h_b > h_{edif} \\ 54 - 0.8(\Delta h_{base}) & \text{Para } d \geq 0.5 \text{ Km y } h_b \leq h_{edif} \\ 54 - 0.8 \left( (\Delta h_{base}) * \frac{d}{0.5} \right) & \text{Para } d < 0.5 \text{ Km y } h_b \leq h_{edif} \end{cases} \quad \text{(A.14)}$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{Para } h_b > h_{edif} \\ 18 - 15 \left( \frac{(\Delta h_{base})}{(h_{edif})} \right) & \text{Para } h_b \leq h_{edif} \end{cases} \quad \text{(A.15)}$$

$$k_f = -4 + \begin{cases} 0.7 \left( \frac{f}{925} - 1 \right) & \text{Para ciudades de tamaño medio.} \\ 1.5 \left( \frac{f}{925} - 1 \right) & \text{Para Centros metropolitanos.} \end{cases} \quad \text{(A.16)}$$



Donde,

$\Delta h_{base}$  Diferencia entre la altura del edificio y la altura de la antena de la estación base. Se define en la ecuación A.17 y se mide en metros

$h_b$  Altura efectiva de la antena de transmisión de la estación base. Se mide en metros

$h_m$  Altura efectiva de la antena de la estación móvil. Se mide en metros

$$\Delta h_{base} = h_b - h_{edif} \tag{A.17}$$

El modelo de propagación COST-WI restringe su aplicación a los valores de la Tabla A.4.

Parámetros	Rango
Frecuencia de operación [MHz]	800 - 2000
Altura de la antena de transmisión de la estación base [m]	4 - 50
Altura de la antena de la estación móvil [m]	1 - 3
Distancia del enlace entre transmisor y receptor [Km]	0.02 - 5

**Tabla A.4** Rango de valores para parámetros de COST-WI  
Tomada de [8]

#### A.4. TR 36.942

La recomendación técnica (TR, *Technical Report*) 36.942, propone un modelo de propagación para macro celdas en escenarios urbanos, suburbanos y rurales [12]. La ecuación A.18 describe el modelo para los dos primeros ambientes, mientras la ecuación A.19 representa el último de ellos.

$$L = 40 * (1 - 4 * 10^{-3} * Dhb) * \log_{10}(R) - 18 \log_{10}(Dhb) + 21 \log_{10}(f) + 80 \tag{A.18}$$

$$L(R) = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(Hb) + A + B \tag{A.19}$$

Los valores para A y B de la ecuación A.19 se describen en las ecuaciones A.20 y A.21 a continuación.



$$A = [44.9 - 6.55 \log_{10}(Hb)] * \log(R) \quad (\text{A.20})$$

$$B = 4.78 * (\log_{10}(f))^2 + 18.33 \log_{10}(f) - 40.94 \quad (\text{A.21})$$

Donde,

*R* Separación entre la estación base y el equipo de usuario. Se mide en kilómetros

*f* Frecuencia de la portadora. Se mide en MHz

*Dhb* Altura en metros de la estación base medida desde el nivel medio del edificio. Se mide en metros

*Hb* Altura de la antena de la estación base sobre el suelo. Se mide en metros

El modelo descrito por TR 36.942 es válido únicamente para condiciones NLOS. *Dhb* y *R* deben estar en el rango de 0 a 50 metros y de pocos metros a kilómetros respectivamente.





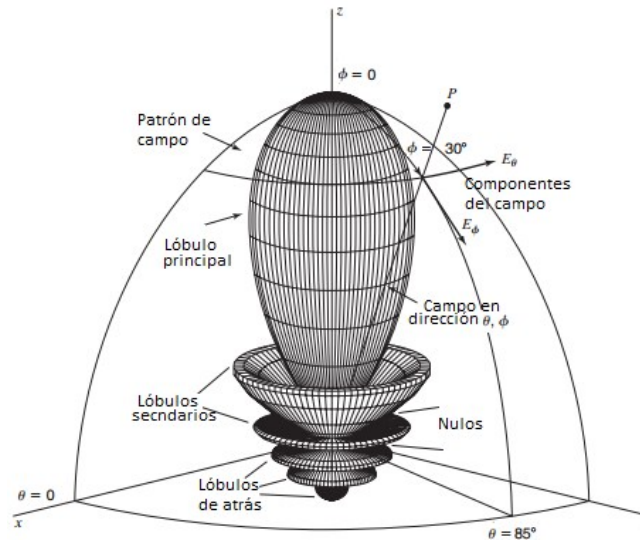
## ANEXO B: CARACTERÍSTICAS DE ANTENA

Una antena es un elemento o estructura que permite la adaptación de un medio guiado a un medio no guiado, que transforma energía no radiante en energía radiante y viceversa [13]. El desempeño de una red móvil celular depende en gran parte de los elementos radiantes, específicamente de la correcta configuración de parámetros de antenas transmisoras y receptoras [14], por esto, es importante analizar las características de las antenas y aquellos parámetros que influyen directamente en el desempeño a nivel de sistema de una red LTE. A continuación se explican los conceptos más importantes sobre antenas.

### B.1. Patrón de Radiación de Antena

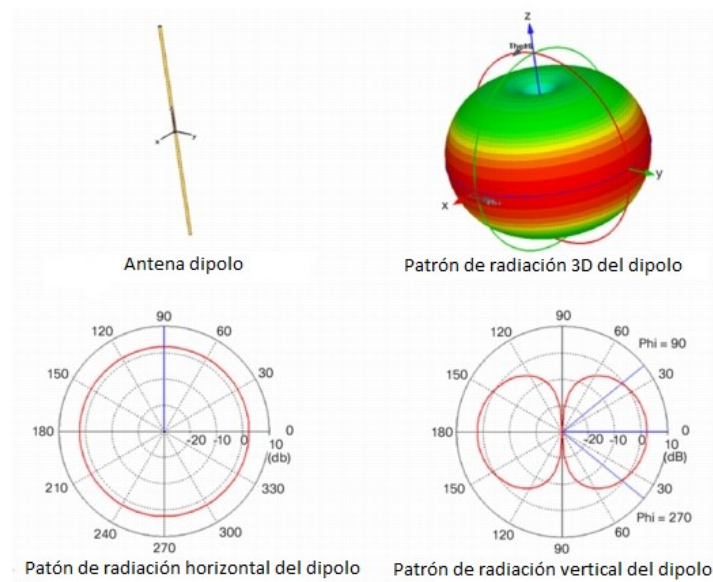
El patrón de radiación corresponde a la función no negativa que indica las direcciones preferenciales de radiación de una antena [15], se representa por gráficos tridimensionales y se obtiene mediante la variación de la intensidad de campo o potencia en función de las coordenadas esféricas  $\theta$  y  $\Phi$  [16].

La figura B.1 representa un patrón de radiación con intensidad de campo  $E(\theta, \Phi)$  en donde el lóbulo principal se encuentra sobre el eje z en dirección  $\Phi=0^\circ$ ; además se observan los lóbulos secundarios y los posteriores; los nulos determinan los puntos en los que el campo tiene valor cero; y el punto P representa la intensidad de campo E para los ángulos  $\Theta=85^\circ$  y  $\Phi=30^\circ$ .



**Figura B.1** Patrón de radiación tridimensional de una antena  
Modificada de: [16]

Aunque el patrón real de una antena este representado por una figura tridimensional, generalmente se usan los patrones horizontal y vertical para mostrar el comportamiento de la antena, el primero muestra el patrón de radiación en un corte sobre el plano XY, cuando el ángulo de elevación  $\Phi$  es  $90^\circ$ , y el segundo muestra el patrón de radiación en un corte sobre el plano YZ cuando el ángulo azimut  $\Theta$  es constante. La figura B.2 muestra el patrón tridimensional, horizontal y vertical para una antena tipo dipolo.



**Figura B.2** Patrón de radiación tridimensional, horizontal y vertical para una antena dipolo  
Tomada de: [17]

## B.2. Directividad

La directividad es la capacidad de la antena para dirigir la radiación en una dirección específica del espacio [18]. La directividad se calcula mediante la ecuación B.1 [19].

$$D(\theta, \Phi) = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{P(\theta, \Phi)}{P_{max}} \text{sen}(\theta) d\theta d\Phi} \quad (\text{B.1})$$

Donde,

- $D(\theta, \Phi)$  Directividad en la dirección  $\theta, \Phi$ . Es adimensional
- $P(\theta, \Phi)$  Potencia de antena en la dirección  $\theta, \Phi$ . Se mide en watts
- $P_{max}$  Potencia máxima de antena. Se mide en watts

### B.3. Ganancia

La ganancia de una antena en unidades lineales está definida como la relación entre la potencia de la antena en una dirección específica y la potencia de una antena de referencia en la misma dirección, generalmente se toma como referencia el radiador isotrópico o el dipolo de  $\lambda/2$ . La ecuación B.2 permite calcular la ganancia de una antena.

$$G_a(\theta, \Phi) = \frac{P_a(\theta, \Phi)}{P_i(\theta, \Phi)} \quad (\text{B.2})$$

Donde,

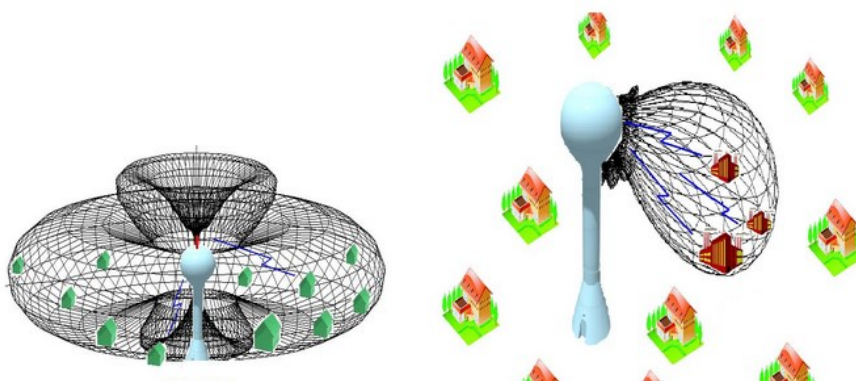
$G_a(\theta, \Phi)$  Ganancia de la antena  $a$ . Es adimensional

$P_a(\theta, \Phi)$  Potencia de la antena  $a$  en la dirección  $\theta, \Phi$ . Se mide en watts

$P_i(\theta, \Phi)$  Potencia de un radiador isotrópico  $i$  en la dirección  $\theta, \Phi$ . Se mide en watts

### B.4. Tipos de Antena Según la Directividad

En general, las antenas se pueden clasificar en dos tipos de acuerdo a la directividad, las antenas omnidireccionales que radian la señal con igual magnitud para todo ángulo y las antenas directivas que concentran la energía en una dirección específica. La figura B.3 muestra el patrón de radiación tridimensional representado por una rejilla para una antena omnidireccional (izquierda) y para una antena directiva (derecha).



**Figura B.3** Patrón de radiación de antena omnidireccional (derecha) y directiva (izquierda)

Tomada de: [20]



## ANEXO B: CARACTERÍSTICAS DE ANTENA

La selección entre estos tipos de antena, obedece principalmente a requerimientos de cobertura, capacidad y tipo de tecnología.

Una de las características más importantes de LTE es el incremento en la capacidad de la red respecto a tecnologías anteriores lo cual se puede lograr gracias a la sectorización de las celdas e implementación de sistemas de antenas múltiples, por esta razón en LTE es común el uso de antenas directivas que permitan concentrar la señal radio sobre una zona específica.

### B.5. Altura de la antena

La altura de la antena es uno de los parámetros que determina el área de cobertura de una estación base. Si aumenta la altura de la antena, la pérdida de trayectoria se reduce y si disminuye la altura de la antena las pérdidas de trayectoria aumentan [21].

La tabla B.1 muestra los valores de ganancia y altura de antena típicos para estaciones base en LTE de acuerdo a la frecuencia de operación y tipo de área.

	Área rural	Área urbana	
	900 MHz	2000 MHz	900 MHz
Ganancia de antena (dBi)	15	15	12
Altura de antena (m)	45	30	30

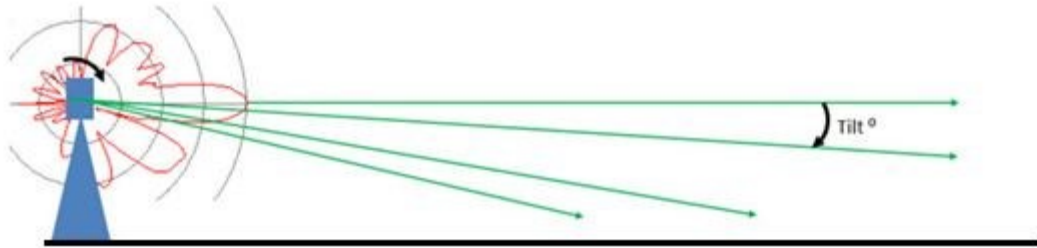
**Tabla B.1** Altura de antena y ganancia para macro celdas  
Tomada de: [12]

### B.6. Angulo de elevación de antena

El ángulo de elevación o tilt ( $\Phi$ ) determina la inclinación o dirección de radiación de la antena en el plano vertical, es decir, determina la dirección de radiación de la antena hacia abajo (downtilt) o hacia arriba (uptilt). En la optimización de redes de comunicación móvil se configura el downtilt de las antenas de la estación base con el objetivo de disminuir la cobertura de la celda, concentrando la energía sobre una zona específica, o para evitar interferencia con otras celdas. La figura B.4 ilustra diferentes valores del ángulo de inclinación para una antena directiva, se observa que a menor valor del tilt aumenta el área de cobertura y a mayor valor



del tilt la energía se concentra sobre una región más pequeña, disminuyendo el área de cobertura.



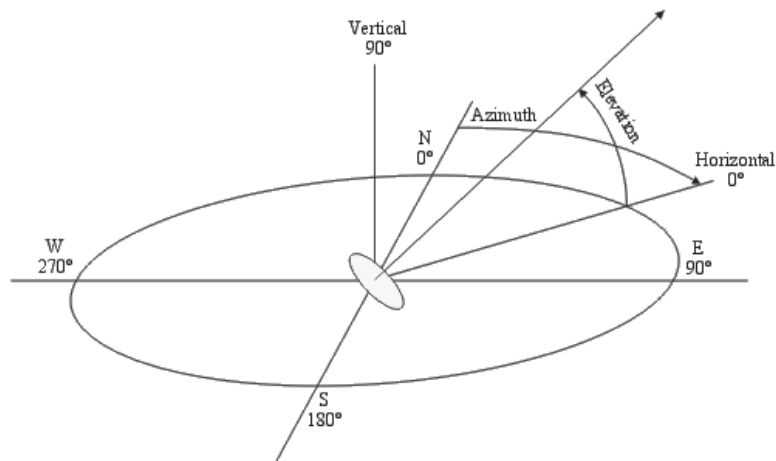
**Figura B.4** Tilt de antena

Tomada de: [22]

Existen dos técnicas que permiten variar el tilt de antena: mecánica y eléctrica, en la mecánica se mueve la antena físicamente usando accesorios mecánicos mientras que en la eléctrica se cambian características de la fase de la señal.

### B.7. Azimut de antena

El azimut de la antena corresponde al ángulo formado entre el eje X y el eje Y, como se observa en la figura B.5, y determina la dirección de la radiación horizontal máxima respecto al eje x positivo.

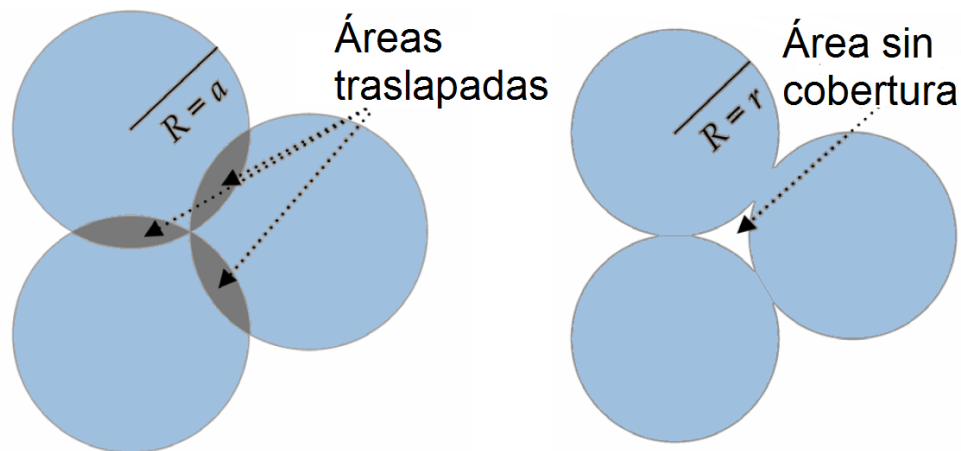


**Figura B. 5** Azimut de antena

Tomada de: [23]

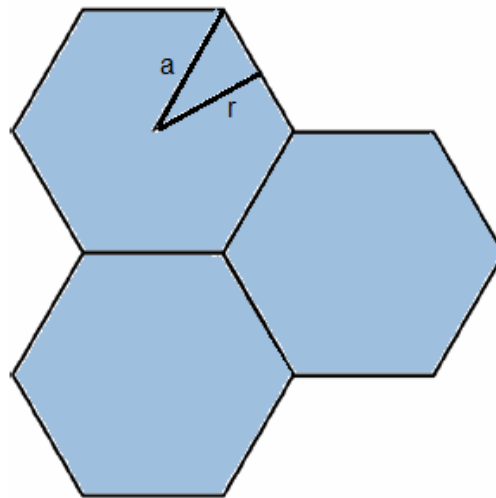
## ANEXO C: GEOMETRÍA DE CELDA

Un parámetro importante en el modelado de una red de comunicación móvil celular es la geometría de la celda porque proporciona la ubicación de las estaciones base y los datos necesarios para cálculos de interferencia y distancia de reutilización de frecuencias. Aunque en una red real, las celdas tienen forma irregular y compleja dependiente del terreno, edificios, estructuras y propiedades intrínsecas de la antena, en el diseño de la red se adoptan modelos de celda con formas regulares como el círculo o el hexágono, que permiten realizar cálculos computacionales y simulaciones de la red de forma eficiente [24]. El modelo de celda que emplea el círculo tiene ventajas por ser simple de implementar y por su bajo consumo computacional, sin embargo presenta desventajas al traslapar regiones de diferentes celdas vecinas lo que se traduce en niveles de interferencia altos que afectan el desempeño de la red, o al dejar zonas sin cobertura entre celdas [24]. La figura C.1 muestra la geometría celular circular para las situaciones descritas anteriormente, donde el radio  $a$  es mayor que el radio  $r$ .



**Figura C.1** Geometría circular de celda

Por otra parte, el modelo de celda que emplea el hexágono presenta la ventaja que permite ubicar celdas juntas coincidiendo perfectamente, por lo que varias celdas pueden cubrir toda la región sin huecos de cobertura o traslapes, además, este modelo es ampliamente usado para representar celdas sectorizadas, situación típica en LTE. La figura C.2 muestra una configuración de tres celdas hexagonales, donde  $a$  es el radio y  $r$  la apotema del hexágono.



**Figura C.2** Geometría hexagonal de celda

El área de cobertura de la celda hexagonal se calcula a partir de la ecuación C.1.

$$A_{hexago} = \frac{3^2\sqrt{3} (R)^2}{2} \quad (\text{C.1})$$

Donde,

$A_{hexago}$  Área del hexágono regular. Se mide en metros cuadrados  
 $R$  Radio de la circunferencia circunscrita al hexágono. Se mide en metros

Y la apotema mediante la ecuación C.2

$$apotema_{hexagono} = \sqrt{(R)^2 - \left(\frac{R}{2}\right)^2} \quad (\text{C.2})$$

Donde,

$apotema_{hexagono}$  Apotema del hexágono regular. Se mide en metros  
 $R$  Radio de la circunferencia circunscrita al hexágono. Se mide en metros





## ANEXO D: BALANCE DEL ENLACE

El balance del enlace es parte del proceso de planificación de la red, dimensiona la cobertura, capacidad y calidad de servicio requeridos [25]. El cálculo del balance del enlace estima con un modelo de propagación adecuado la máxima atenuación de la señal permitida, es decir, las pérdidas de trayectoria entre el móvil y la antena de la estación base, además permite el cálculo del rango de la celda y el número de estaciones base para cubrir determinada área geográfica [26].

El balance del enlace considera parámetros para el enlace descendente y ascendente, por el interés de estudio de este trabajo de grado, se introducen en la tabla D.1 los parámetros más relevantes usados para el balance del enlace descendente.

Parámetro	Descripción	Unidad
<b>Transmisor eNB</b>		
$P_{TX}$	Máxima potencia de transmisión en la estación base	[dBm]
$G_{Tx}$	Ganancia de la antena de Transmisión	[dBi]
$PIRE$	Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (PIRE, <i>effective isotropically radiated power</i> )	[dBm]
$L_{tt}$	Pérdidas debido al cable entre el conector de la antena de la estación base y la antena	[dB]
<b>Receptor UE</b>		
$L_{tr}$	Pérdidas por el contacto del equipo receptor con el cuerpo del usuario	[dB]
$NF$	Figura de Ruido del equipo de usuario UE	[dB]
$P_N$	Potencia de Ruido Térmico	[dBm]
$SINR$	Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR, Signal to Interference plus Noise Ratio)	[dB]
$G_{RX}$	Ganancia de la antena del receptor	[dBi]

**Tabla D.1** Parametros del balance del enlace descendente

Tomada de [26]



## ANEXO D: BALANCE DEL ENLACE

---

El balance del enlace se describe por las ecuaciones D.1 y D.2

$$P_r = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - L_{tt} - L_{tr} - L_b \quad (\text{D.1})$$

$$P_r = PIRE + G_{RX} - L_{tr} - L_b \quad (\text{D.2})$$

Donde  $L_b$  corresponde a las pérdidas básicas totales, consideradas como las máximas pérdidas de propagación permitidas en el enlace.



## ANEXO E: DESVANECIMIENTO

Las formulas previas descritas por los modelos de propagación que calculan las pérdidas por trayectoria no consideran el hecho de que dos ubicaciones con igual distancia desde el transmisor pueden experimentar una gran diferencia en la atenuación de la señal como resultado de la ubicación de obstáculos y de su ambiente circundante, por lo que es necesario adicionar el efecto del desvanecimiento [27]. El desvanecimiento es la desviación de la atenuación que afecta a una señal sobre determinados medios de propagación, este varia con el tiempo, la posición geográfica o la frecuencia y se clasifica en dos tipos, el primero es el desvanecimiento de gran escala, donde se encuentran las pérdidas por trayectoria y el desvanecimiento por sombra que ocurre cuando el usuario se mueve a distancias comparables con el rango de la celda y el segundo es el desvanecimiento de pequeña escala, que ocurre por multitrayectoria en distancias del orden de la longitud de onda de la portadora [28].

El desvanecimiento por sombra es causado por los obstáculos entre el transmisor y el receptor que atenúan la señal de potencia a través de la absorción, reflexión, dispersión y difracción. Para caracterizar esta atenuación se usa el modelo estadístico *Log-normal*, que ha sido confirmado empíricamente para modelar con precisión la variación en la potencia recibida en entornos de propagación radio [27]. La distribución *Log-normal* que modela el desvanecimiento por sombra para una relación de potencias de transmisión y recepción dada por  $\psi = P_t/P_r$ , se describe en ecuación E.1 [6].

$$F_{\psi_{dB}} = \frac{\exp - \frac{(\ln \psi - \mu)^2}{2\sigma^2}}{\sigma\sqrt{2\pi}}, \quad \psi > 0 \quad (\text{E.1})$$

Donde,

$\mu_{\psi_{dB}}$  Media de  $\psi$  en dB

$\sigma_{\psi_{dB}}$  Desviación estándar de  $\psi$  en dB

El desvanecimiento por multitrayectoria consiste en fluctuaciones rápidas de la señal transmitida causadas por el efecto combinado de versiones de la misma señal que llegan al receptor a lo largo de diferentes caminos, dicha combinación de señales puede ser constructiva o destructiva. El desvanecimiento por multitrayectoria se modela mediante la función de distribución *Rayleigh* que describe el caso en el cual todos los caminos desde el transmisor al receptor son



obstruidos en cierto grado [27]. La ecuación E.2 expone este desvanecimiento para una relación de potencia dada por  $\psi = P_t/P_r$ .

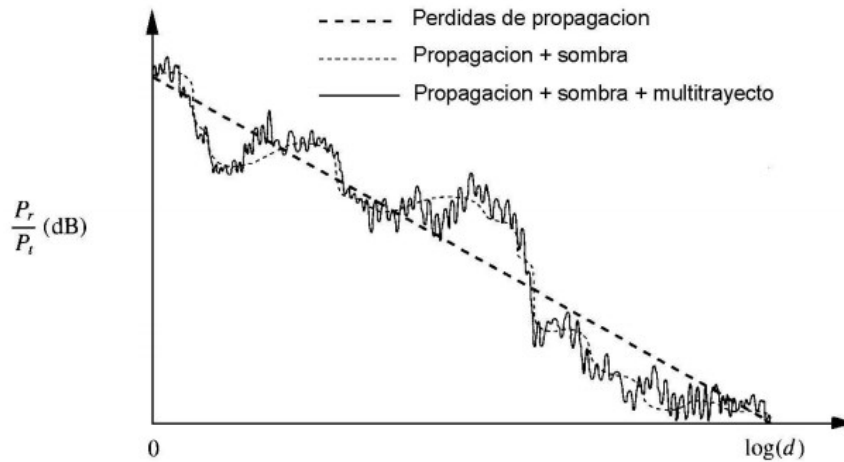
$$F_\psi(\psi) = \frac{\psi}{\sigma_\psi} \exp\left[-\frac{\psi^2}{2\sigma_\psi^2}\right], \quad \psi > 0 \quad (\text{E.2})$$

Donde,

$\mu_{\psi_{dB}}$  Es la media de  $\psi$  en dB

$\sigma_{\psi_{dB}}$  Es la desviación estándar de  $\psi$  en dB

Como muestra la figura E.1, la potencia recibida varia en torno a la estimada por los modelos de pérdidas de propagación debido a los fenómenos de desvanecimiento por sombra y desvanecimientos por multitrayecto.



**Figura E.1** Pérdidas de trayectoria, desvanecimiento por sombra, desvanecimiento por multitrayectoria versus la distancia. Modificada de:[28]



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Y. Ahmad, "Studying different propagation models for LTE-A system," *Comput. Commun. Eng. (ICCCE), 2012 Int. Conf.*, pp. 848 – 853, 2012.
- [2] M. Roslee and K. F. Kwan, "Optimization of hata propagation prediction model in suburban area in Malaysia," *Prog. Electromagn. Res. C*, vol. 13, pp. 91–106, 2010.
- [3] T. Sarkar, Z. Ji, and K. Kim, "A survey of various propagation models for mobile communication," *Antennas Propag. Mag. IEEE*, vol. 45, no. 3, pp. 51 – 82, 2003.
- [4] M. Rahnema, "Multipath and Path Loss Modeling," in *UMTS Network Planning, Optimization, and Inter- Operation with GSM*, 2008, pp. 41–63.
- [5] M. Alshami and T. Arslan, "Frequency analysis of path loss models on WIMAX," *Comput. Sci. ...*, vol. 10, pp. 1–6, 2011.
- [6] T. Rappaport, *Wireless communications: principles and practice*. 1996, pp. 1–640.
- [7] D. Cichon and T. Kurner, "Propagation prediction models," in *COST 231 Final Rep*, 1995, pp. 116–208.
- [8] M. Rani, S. Behara, K. Suresh, and A. Visakhapatnam, "Comparison of Standard Propagation Model (SPM) and Stanford University Interim (SUI) Radio Propagation Models for Long Term Evolution (LTE)," *Int. J. Adv. Innov. Res.*, vol. 1, no. 6, pp. 221–228, 2012.
- [9] J. Chebil, A. K. Lwas, M. R. Islam, and A.-H. Zyoud, "Comparison of empirical propagation path loss models for mobile communications in the suburban area of Kuala Lumpur," *2011 4th Int. Conf. Mechatronics*, no. May, pp. 1–5, May 2011.
- [10] C. of Engineering, "Personal & Mobile Communications Path Loss Models Okumura-Hata Model." Georgia Tech, Georgia, pp. 1–16.
- [11] S. Ranvier, "Path loss models," no. November. Helsinki, pp. 1–36, 2004.
- [12] 3GPP, "TR 36.942 - V8.2.0 - LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios," Sophia Antipolis, Francia, 2009.



- [13] W. Araújo, G. Glionna, and M. Sampaio, "Generation of 3D Radiation Patterns: A Geometrical Approach." IEEE, Campina Grande, Brazil, p. 1, 2002.
- [14] K. A. Akpado, O. S. Oguejiofor, C. O. Ezeagwu, and A. U. Okolibe, "Investigating the Impacts of Base Station Antenna Height , Tilt and Transmitter Power on Network Coverage," *Int. J. Eng. Sci. Invent.*, vol. 2, no. 7, pp. 32–38, 2013.
- [15] C. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 2nd ed. Arizona, United States: John Wiley and Sons, 1997.
- [16] "Antennas." [Online]. Available: [http://117.55.241.6/library/E-Books/Antennas\\_mcgraw-hill\\_2nd\\_ed\\_1988-john\\_d\\_kraus.pdf](http://117.55.241.6/library/E-Books/Antennas_mcgraw-hill_2nd_ed_1988-john_d_kraus.pdf). [Accessed: 04-Feb-2014].
- [17] CISCO, "Antenna Patterns and Their Meaning." [Online]. Available: [http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-antennas-accessories/prod\\_white\\_paper0900aecd806a1a3e.html](http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-antennas-accessories/prod_white_paper0900aecd806a1a3e.html).
- [18] E. Monachesi, A. Frenzel, G. Chaile, Agustín Carrasco, and F. Gómez, "Conceptos generales de Antenas." Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional, Tucumán, Argentina, 2011.
- [19] Universidad Politécnica de Valencia, "Antenas." [Online]. Available: <http://www.upv.es/antenas/>. [Accessed: 04-Mar-2014].
- [20] MobileMark, "Antenna Terminology Defined." [Online]. Available: <http://www.mobilemark.com/engineering/antenna-theory-simplified.html>. [Accessed: 20-Feb-2014].
- [21] S. Sharma and R. Uppal, "RF Coverage Estimation of Cellular Mobile System," *Int. Journal Eng. Technol.*, vol. 3, no. 6, pp. 398–403, 2012.
- [22] L. Pedrini, "What is Antenna Electrical and Mechanical Tilt." [Online]. Available: <http://www.telecomhall.com/what-is-antenna-electrical-and-mechanical-tilt-and-how-to-use-it.aspx>. [Accessed: 23-Feb-2014].
- [23] Giangrandi, "Satellite Antenna Bearing Calculator." [Online]. Available: <http://www.giangrandi.ch/index.shtml>. [Accessed: 10-Mar-2014].
- [24] K. B. Baltzis, "Hexagonal vs Circular Cell Shape : A Comparative Analysis and Evaluation of the Two Popular Modeling Approximations," in *Cellular Networks - Positioning, Performance Analysis, Reliability*, no. Cci, A. Melikov, Ed. InTech, 2011, pp. 103–122.



- [25] M. Rahnema, "Radio Site Planning, Dimensioning, and Optimization," in *UMTS Network Planning, Optimization, and Inter- Operation with GSM*, 2008, pp. 81–120.
- [26] H. Holma and A. Toskala, *LTE for UMTS – OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*, 1 st. Chichester, United Kingdom: John Wiley and Sons, 2009, pp. 1–450.
- [27] T.-D. Chiueh, P.-Y. Tsai, and I.-W. Lai, *Baseband Receiver Design for Wireless MIMO-OFDM Communications (Google eBook)*, 2nd ed. John Wiley & Sons, 2012, p. 350.
- [28] D. Tse, "The wireless channel," in *Fundamentals Wireless Communication*, 2005, pp. 10–48.

