



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**“MODELAMIENTO DE LAS INTERFERENCIAS CROSS-
TIER Y CO-TIER EN REDES LTE DE DOS CAPAS
PARA LA BANDA AWS”**

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del título de

MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES

JORGE LUIS YÁNEZ ROCA

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2017

AGRADECIMIENTOS

A Dios por su infinito amor y misericordia, a la PhD. Rebeca Estrada por valiosa guía en el desarrollo de este trabajo, a mi familia por su apoyo y cariño, a los amigos por su soporte y ayuda durante este proceso.

“Gratitud siempre al favor, es un deber justo y grato, y por eso el hombre ingrato es un monstruo que da horror”, José Joaquín de Olmedo

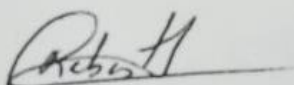
DEDICATORIA

El presente trabajo va dedicado a mi familia, docentes y amigos que de una forma u otra colaboraron en la culminación de este proyecto.

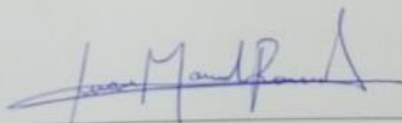
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN



César Martín Moreno, Ph.D.
SUBDECANO DE LA FIEC




Rebeca Estrada Pico, Ph.D.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN



Juan Manuel Romero, M.Sc.
MIEMBRO PRINCIPAL DEL TRIBUNAL

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me corresponde exclusivamente; y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Jorge Luis Yáñez Roca

RESUMEN

El despliegue de femtoceldas beneficia la experiencia de usuario al mejorar la cobertura en interiores, pero incrementa las fuentes de interferencia en la red de acceso. Existe la posibilidad de que las femtoceldas se conviertan en una fuente de interferencia que termine degradando la red, en lugar de mejorar la calidad de la misma.

Determinar modelos de interferencia y propagación de trayectoria adecuados habilitaría a los operadores de red celular hacer un control efectivo de la potencia transmitida, lo cual permitiría el reuso de las frecuencias de una manera más eficiente por parte de las femtoceldas desplegadas en el área de cobertura de la macrocelda. De esto dependerá la calidad de la red y la efectividad de la femtoceldas.

Se plantea el escenario particular de Ecuador, donde se ha asignado la banda AWS (1700/2100 MHz) a los operadores privados Conecel S.A. y Otecel S.A. Se trabajará con la densidad de usuarios del operador dominante que al momento es Conecel S.A. para un ambiente urbano de Guayaquil.

El presente trabajo toma modelos de propagación propuestos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones y el 3rd Generation Partnership Project y los adapta a la banda de frecuencia AWS tanto para los enlaces de Downlink y Uplink. Se realiza un análisis de la interferencia Co-tier y Cross-Tier para una red LTE de dos capas, el impacto de las pérdidas de penetración por los diferentes materiales, interacción de femtoceldas dentro de un mismo edificio y entre edificios diferentes.

Estos análisis nos permitieron llegar a fórmulas optimizadas para la aproximación del cálculo de interferencia y definición de principales zonas de interacción entre macro BTS y femto BTS, así como zonas donde el uso de femtoceldas sea efectivo.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN	Error! Bookmark not defined.
DECLARACIÓN EXPRESA	Error! Bookmark not defined.
RESUMEN	vii
CAPÍTULO 1	1
1. PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA.....	1
1.1 Identificación del problema.....	1
1.2 Justificación.....	5
1.3 Solución propuesta.....	6
1.4 Objetivos del trabajo de titulación.....	6
1.4.1 Objetivo general.....	6
1.4.2 Objetivos específicos.....	6
1.5 Metodología.....	7
1.6 Alcance.....	8
CAPÍTULO 2.....	9
2. INTRODUCCIÓN A LA RED DE RADIO ACCESO.....	9
2.1 Fundamentos de la red de radio acceso.....	9
2.1.1 Elementos.....	9
2.1.2 Interfaces.....	10
2.1.3 Ancho de banda del canal de radio acceso.....	11
2.1.4 Bandas operativas.....	12
2.1.5 Redes heterogéneas.....	14
2.1.6 Tipos de radio bases.....	15
2.2 Interfaz aire.....	18
2.2.1 Esquema de acceso múltiple.....	18
2.2.2 Estructura de trama.....	20

2.2.3	Bloques de recursos.....	21
2.3	Planificación de red.....	22
2.3.1	Planificación de red de radio acceso.....	23
2.3.2	Presupuesto de enlace.....	24
2.3.3	Planificación de frecuencia.....	28
CAPÍTULO 3.....		32
3.	DEFINICIÓN DEL ESCENARIO A SIMULAR.....	32
3.1	Parámetros de la Red Móvil.....	32
3.1.1	Macrocela.....	32
3.1.2	Femtocelda.....	33
3.1.3	Equipo de usuario.....	33
3.2	Consideraciones del escenario.....	34
3.2.1	Rangos de cobertura.....	34
3.2.2	Densidad de usuarios.....	39
3.2.3	Frecuencias.....	41
CAPÍTULO 4.....		42
4.	PROPAGACIÓN E INTERFERENCIA CO-TIER Y CROS-TIER.....	42
4.1	Modelos de propagación en interiores y exteriores para la banda AWS.....	42
4.2	Cálculo de la interferencia Co-Tier.....	50
4.2.1	Edificaciones a un solo nivel.....	52
4.2.2	Edificaciones con varios niveles.....	55
4.3	Cálculo de la interferencia Cross-Tier.....	60
4.4	Análisis e impacto de materiales de edificios en el cálculo de la interferencia Co-Tier.....	62
4.4.1	Edificaciones a un solo nivel.....	62
4.4.2	Edificaciones con varios niveles.....	65
4.5	Análisis e impacto de materiales de edificios en el cálculo de la interferencia Cross-Tier.....	67
4.6	Métodos abreviados para la estimación de interferencia Co-Tier.....	69

4.6.1	Estimación basada en umbral de distancia para las femtoceldas o femtousuarios.....	71
4.6.2	Aproximación basada en distancia promedio de las femtoceldas o femtousuarios vecinos.....	71
4.6.3	Ponderación de la femtocelda o femtousuario más cercano.	72
4.7	Simulación y análisis de resultados.....	72
4.7.1	Bidimensional: departamentos distribuidos en un solo nivel de cota.....	72
4.7.2	Tridimensional: edificio con varios departamentos.....	79
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		82
BIBLIOGRAFÍA.....		84
ANEXOS.....		87

CAPÍTULO 1

1. PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA.

La alta demanda de tráfico de datos en las redes inalámbricas permitió el desarrollo de estándares como Long Term Evolution (LTE). Sin embargo, el despliegue de este tipo de infraestructuras sigue siendo costoso, por lo que se ha empezado a buscar formas más rentables de brindar cobertura [1].

Estudios sobre el uso de redes inalámbricas, muestran que el 50% de las llamadas de voz y el 70% de las llamadas de datos son generadas en ubicaciones interiores (indoor). Mientras que las redes de voz tienen una tolerancia a las condiciones de baja calidad, dado que la tasa de transmisión requerida está en el orden de los 10 Kbps o menos. Las redes de datos requieren condiciones de calidad de señal mayores para proveer las tasas de transmisión que esperan los usuarios [1].

Bajo este contexto, aparece la opción del uso de femtoceldas como una respuesta que permite mejorar la cobertura en ubicaciones interiores. Proporcionar una mayor capacidad, reducir la carga en la macrocelda, brindar mejor señal a los usuarios y un menor costo de inversión son los beneficios del uso de femtoceldas [1].

1.1 Identificación del problema.

El despliegue de femtoceldas beneficia la experiencia de usuario al mejorar la cobertura en interiores, pero incrementa las fuentes de interferencia en la red de acceso. Abriendo la posibilidad de que las femtoceldas se conviertan una fuente de interferencia que termine degradando la red, en lugar de mejorar la calidad (objetivo inicial).

A diferencia de una macrocelda que se instala luego de un proceso de planificación y afinamiento de parámetros de propagación, las femtoceldas no se pueden planificar. El modelo de negocio permitiría a los usuarios comprar la femtocelda al operador y éste lo ubicaría en cualquier parte, por lo cual no habría un control de ubicación ni vecindades[2].

La red de radio acceso que originalmente fue concebida para ser compuesta por macroceldas (primer nivel o capa), con la presencia de femtoceldas pasa a ser una red de dos capas; sin tener un control sobre la estructura de la segunda capa compuesta por femtoceldas. De ahí la necesidad de poder encontrar una forma que permita estimar el valor de la interferencia en una red de dos capas. Conocer los niveles de interferencia equivale a decir que conocemos la calidad de la señal de la red. Por lo que el modelado de la interferencia de una red se vuelve en una tarea fundamental para poder determinar la calidad de la señal.

Tener modelos de interferencia y propagación de trayectoria adecuados habilitaría a los operadores de red celular hacer un control efectivo de la potencia transmitida (sobre los enlaces de transmisiones desde y hacia la macrocelda), lo cual permitiría el reuso de las frecuencias de una manera más eficiente por parte de las femtoceldas desplegadas en el área de cobertura de la macrocelda.

Las interferencias que se generan en una red de dos capas pueden ser clasificadas de la siguiente manera:

- Interferencia Co-Tier: este tipo de interferencia se presenta entre elementos de red que pertenecen a una misma capa. Por ejemplo, la interferencia entre femtoceldas cercanas [3].
- Interferencia Cross-Tier: este tipo de interferencia se presenta entre elementos de red de diferentes capas. Por ejemplo, la interferencia entre femtoceldas y macrocelda [3].

La variedad de escenarios de interferencia que se generan al tener dos capas se puede representar a través de la Figura 1.1 para el enlace Downlink (DL) y en la Figura 1.2 para el enlace Uplink (UL). En ambas figuras se pueden observar una macrocelda y dos femtoceldas. La femtocelda 1 proporciona acceso al usuario 1, mientras que la femtocelda 2 al usuario 2 y la macrocelda al usuario 3. Las interferencias que se proponen analizar son:

- Para el enlace Downlink de la Figura 1.1:
 - La interferencia que genera la femtocelda 2 sobre el enlace entre femtocelda 1 y usuario 1. De acuerdo a la definición previa, ésta

corresponde a una interferencia co-tier, en la Figura 1.1 se representa con la línea punteada roja.

- La interferencia que genera la macrocelda sobre el enlace entre femtocelda 1 y usuario 1. Esta sería una interferencia cross-tier, representada en la Figura 1.1 con una línea punteada lila.
- Para el enlace Uplink de la Figura 1.2:
 - La interferencia que genera el usuario 2 sobre el enlace entre femtocelda 1 y usuario 1. De acuerdo a la definición previa, ésta corresponde a una interferencia co-tier, en la Figura 1.2 se representa con la línea punteada roja.
 - La interferencia que genera el usuario 3 sobre el enlace entre femtocelda 1 y usuario 1. Esta sería una interferencia cross-tier, representada en la Figura 1.2 con una línea punteada lila.

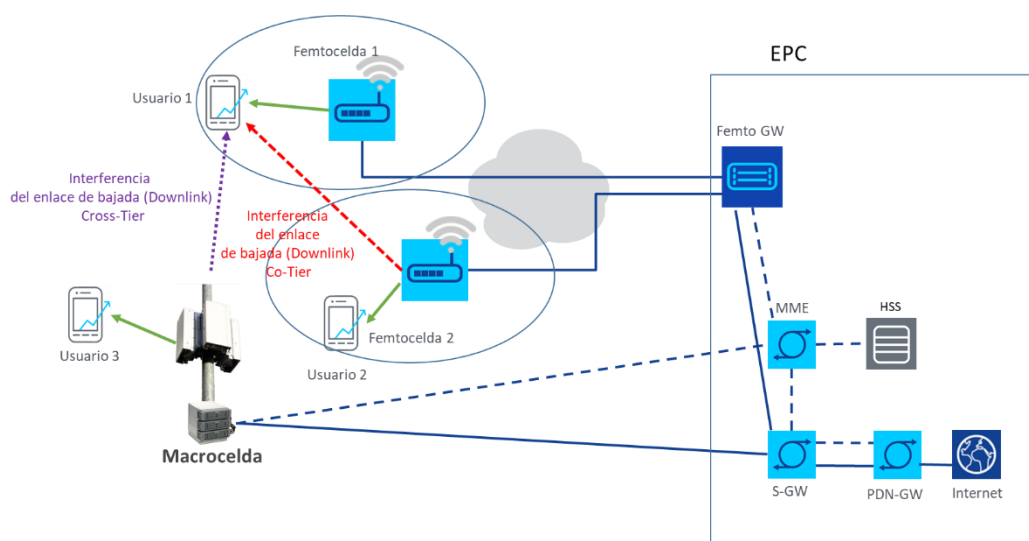


Figura 1.1: Interferencias en la dirección de enlace Downlink [3], [4].

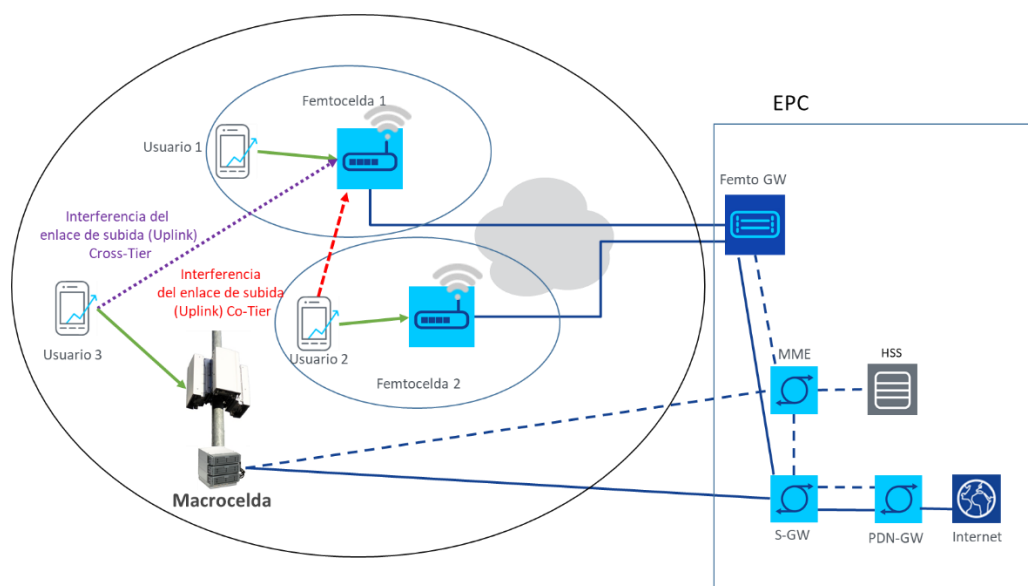


Figura 1.2: Interferencias en la dirección de enlace Uplink [3], [4].

La Tabla 1 sintetiza las interferencias mostradas en las figuras previas:

Dirección del enlace	Tipo de Interferencia	Elementos de red que interactúan
Enlace de bajada (Downlink)	Dentro de la misma capa (Co-tier)	Femtocelda - Femtocelda
	Entre diferentes capas (Cross-tier)	Femtocelda - Macrocelda
Enlace de subida (Uplink)	Dentro de la misma capa (Co-tier)	Femtousuario - Femtousuario
	Entre diferentes capas (Cross-tier)	Femtousuario - Macrouuario

Tabla 1: Tipos de Interferencia en una red de dos capas [3], [4].

Ante esta variedad de escenarios de interferencia que se mencionan en la Tabla 1 surge la necesidad de poder establecer modelos que permitan determinar los niveles de interferencia. De esto dependerá la calidad de la red y la efectividad de la femtoceldas. Se plantea el escenario particular de Ecuador, donde se ha asignado la banda AWS (1700/2100 MHz) a los operadores privados Conecel

S.A. y Otecel S.A. Se trabajará con la densidad de usuarios del operador dominante que al momento es Conecel S.A. para un ambiente urbano de Guayaquil. En la literatura, existen modelos de propagación para interiores y exteriores que pueden ser adaptados a ese rango de frecuencias, a partir de los cuales se propondrán los modelos de interferencia.

Calcular las interacciones e interferencias entre todos los elementos de la red de acceso podría resultar en un trabajo engorroso debido a:

- Ingreso manual de la información de las celdas, lo cual conllevaría a una actualización constante de una base de datos que es susceptible a errores de ingreso de información.
- No hay control sobre la ubicación de las femtoceldas, pues mientras se tenga acceso a una conexión de datos hacia el femto gateway, el propietario podría mover la ubicación de la femtocelda a voluntad.

El uso de femtoceldas beneficia la experiencia de usuario al mejorar la cobertura en interiores, pero a su vez incrementa las fuentes de interferencia en la red de acceso. Por esta razón, es importante poder identificar cuánta interferencia genera el uso de femtoceldas, determinar el impacto que ésta genera en los usuarios y cómo predecir o estimar la interferencia para poder hacer control de potencia en las transmisiones desde y hacia la macrocelda que permita la coexistencia con las femtoceldas.

1.2 Justificación.

Actualmente, existen estudios comparativos de los modelos de propagación LTE Outdoor, tales como [5], [6]: Stanford University Interim (SUI), Okumura, Cost-231 Hata, Cost-231 Walfisch-Ikegami. Sin embargo, ninguno de estos modelos cubre la banda asignada para el rango de frecuencias AWS 1700 / 2100 MHz utilizada en el Ecuador, además que son modelos para exteriores. Razón por la cual, es importante adaptar los modelos desarrollados por los organismos normativos para las bandas asignadas a los operadores LTE del Ecuador, considerando no solo los ambientes en exteriores, sino también en interiores.

1.3 Solución propuesta.

La solución tiene varios componentes y fases:

Primero, se establece el modelo de propagación adecuado considerando el rango de frecuencia y tipo de ambientes (interiores o exteriores). Luego se lo adapta a la banda de frecuencia AWS tanto para los enlaces de Downlink y Uplink.

A continuación, se establecen los rangos de cobertura y niveles de potencia de los elementos de las capas femto y macro para calcular el presupuesto de enlace, lo cual permite realizar el análisis de la interferencia Co-tier y Cross-Tier.

Tercero, se analiza el impacto de las pérdidas de penetración por los diferentes materiales, y se establecen escenarios de interacción: femtoceldas dentro de un mismo edificio y entre edificios diferentes. Estos análisis nos permitirán llegar fórmula optimizada para la aproximación del cálculo de interferencia y definición de principales zonas de interacción entre macro BTS y femto BTS y así poder definir zonas donde el uso de femtoceldas sea efectivo.

1.4 Objetivos del trabajo de titulación.

1.4.1 Objetivo general.

Adaptar un modelo matemático existente de propagación de canal en la banda AWS, que permita calcular los niveles de interferencia cross-tier y co-tier, y determinar las zonas donde las femtoceldas pueden ser desplegadas.

1.4.2 Objetivos específicos.

- Analizar los modelos de propagación apropiados para indoor y outdoor en los enlaces uplink a 1700 MHz y downlink a 2100 MHz.
- Obtener y analizar la interferencia cross-tier y co-tier en los enlaces uplink y downlink para la banda AWS en base a los modelos de propagación elegidos.
- Proponer una fórmula optimizada para la aproximación del cálculo de interferencia cross-tier y co-tier.

- Proponer un método para determinar la zona donde el uso de femtocelda no contribuya a mejorar de la cobertura indoor.

1.5 Metodología.

Para poder resolver el problema planteado se planifica llevar a cabo el siguiente proceso:

1. Investigar las bandas de frecuencia de LTE asignadas en Ecuador.
2. Revisar los valores estadísticos y estimar la cantidad de usuarios LTE a considerar en el análisis de interferencia para un escenario urbano de Guayaquil.
3. Revisar los modelos de propagación propuestos por entidades que regulan las Telecomunicaciones tales como la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y el 3rd Generation Partnership Project (3GPP) [9].
4. Seleccionar los modelos de propagación para ambientes en interiores y exteriores más adecuados al escenario de análisis.
5. Establecer variables y constantes del escenario de propagación para la macrocelda, femtoceldas y usuarios LTE.
6. Adaptar los modelos de propagación al escenario de análisis: red de acceso LTE de dos capas (femtoceldas y macrocelda) para frecuencia AWS en ambiente urbano para el operador dominante Claro.
7. Determinar los niveles de señal entre usuario y radio base en cada una de las dos capas.
8. Analizar los escenarios de Cross-Tier y Co-Tier tanto en downlink como uplink.
9. Valorar el impacto de las interferencias y poder determinar cuáles no se pueden despreciar y cuáles no. Lo cual permitirá obtener un modelo estimado que considere solo las interferencias relevantes, lo cual optimizaría y facilitaría la estimación del valor de interferencia.
10. Desarrollar una simulación que permita comparar el nivel de interferencia considerando todas las interacciones versus la fórmula optimizada, para así validar confirmando o descartando la propuesta.

1.6 Alcance.

El presente trabajo se enfoca en el análisis de una red LTE de dos capas compuesto por una macro BTS y varias femtoceldas operando en la banda AWS (1700 / 2100 MHz). Para ejemplo de cálculos se considera el escenario urbano de la ciudad de Guayaquil con el operador dominante Conecel S.A. Demás parámetros de la red móvil son definidos en la sección 3.

CAPÍTULO 2

2. INTRODUCCIÓN A LA RED DE RADIO ACCESO.

En este capítulo se presenta una revisión técnica de los conceptos de la red evolucionada EUTRAN, se mencionan los motivos para tener una buena planificación de la red, e incluso se presenta un ejemplo práctico de cómo calcular pérdidas de trayectorias.

2.1 Fundamentos de la red de radio acceso.

En esta sección revisaremos los elementos que conforman la red de acceso LTE, sus interfaces, las bandas operativas y los anchos de bandas configurables. Además, se explicará que es una red heterogénea y los tipos de radio bases que la pueden constituir.

2.1.1 Elementos.

A diferencia de las redes de acceso predecesoras a LTE, donde existían controladores de radio bases como el Controlador de Estación Base (BSC) en el caso de GSM o el Controlador de Red de Radio (RNC) en el caso de UMTS; en LTE no existen. A esta característica se le conoce como arquitectura plana, en donde cada uno de sus nodos se conecta directamente al Evolved Packet Core (EPC) [2].

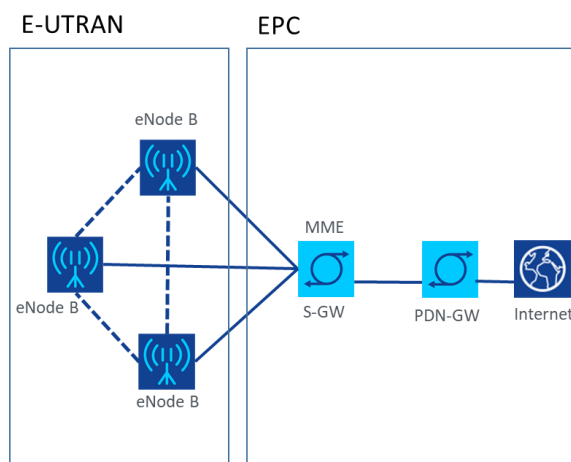


Figura 2.1: Arquitectura de Long Term Evolution (LTE) [2].

En la Figura 2.1 se puede observar la arquitectura de la red de acceso LTE, donde se tienen los nodos B evolucionados (eNode B). No existe controlador y hay conexión directa a los elementos: Entidad de Gestión de Movilidad (MME) y Puerta de Enlace de Servicio (S-GW) del EPC, el eNode B se encarga de la administración de los recursos radio acceso [2].

2.1.2 Interfaces.

Las interfaces de comunicación que posee la red de radio acceso LTE son las siguientes [2]:

- Interfaz Uu: corresponde a la interfaz de aire que conecta al equipo de usuario (UE) y al eNode B.
- Interfaz X2: conecta a un eNode B con otro eNode B, transmite plano de control para la señalización y plano de usuario para los datos de la capa de aplicación.
- Interfaz S1: conecta al eNode B con el EPC, admite tanto señalización como datos.

En la Figura 2.2 se tiene una representación gráfica de las interfaces explicadas previamente.

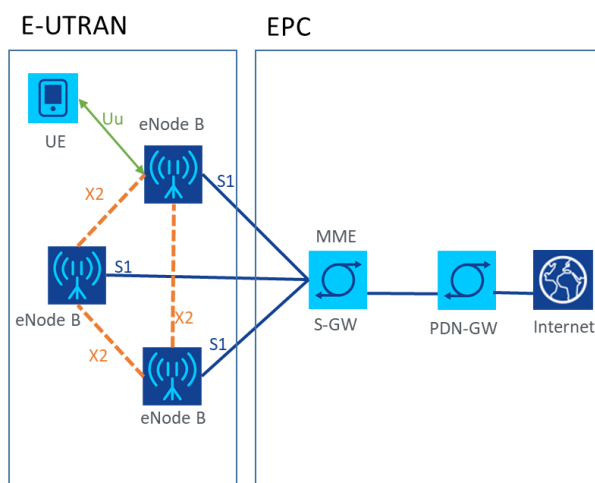


Figura 2.2: Representación lógica de las interfaces de LTE para radio acceso [2].

2.1.3 Ancho de banda del canal de radio acceso.

La organización de las telecomunicaciones 3GPP ha definido seis opciones de ancho de bandas y bloques de recursos, que van desde 1.4 MHz con 6 bloques de recursos hasta 20 MHz con 100 bloques de recursos respectivamente [7], los cuales se presentan en la Tabla 2:

Ancho de banda del canal [MHz]	1.4	3	5	10	15	20
Cantidad de bloques de recursos	6	15	25	50	75	100

Tabla 2: Ancho de Banda para LTE [2].

El bloque de recursos (RB) constituye la unidad básica de recursos en la interfaz de aire de LTE, donde cada uno de ellos cuenta con 12 sub-portadoras. Una sub-portadora ocupa un espacio de 15 KHz. Existe una diferencia de 15 KHz entre el ancho de banda del enlace de subida y el enlace de bajada, esto se debe a que el enlace de bajada incluye una sub-portadora adicional nula que va en el centro de las demás sub-portadoras [2].

2.1.4 Bandas operativas.

Una de las ventajas de LTE es que el espectro existente de otras tecnologías como UMTS y GSM puede ser reutilizado para su introducción [2]. El 3GPP nuevamente define las bandas operativas para LTE [8], las cuales presentamos en la Tabla 3:

Banda Operante	Banda de Uplink (UL) en MHz	Banda de Downlink (DL) en MHz	Duplexación
1	1920 – 1980	2110 – 2170	FDD
2	1850 – 1910	1930 – 1990	FDD
3	1710 – 1785	1805 – 1880	FDD
4	1710 – 1755	2110 – 2155	FDD
5	824 – 849	869 – 894	FDD
6	830 – 840	875 – 885	FDD
7	2500 – 2570	2620 – 2690	FDD
8	880 – 915	925 – 960	FDD
9	1749.9 – 1784.9	1844.9 – 1879.9	FDD
10	1710 – 1770	2110 – 2170	FDD
11	1427.9 – 1447.9	1475.9 – 1495.9	FDD
12	699 – 716	729 – 746	FDD
13	777 – 787	746 – 756	FDD
14	788 – 798	758 – 768	FDD
15	Reservado	Reservado	FDD
16	Reservado	Reservado	FDD
17	704 – 716	734 – 746	FDD
18	815 – 830	860 – 875	FDD
19	830 – 845	875 – 890	FDD
20	832 – 862	791 – 821	FDD
21	1447.9 – 1462.9	1495.9 – 1510.9	FDD
22	3410 – 3490	3510 – 3590	FDD
23 ¹	2000 – 2020	2180 – 2200	FDD
24	1626.5 – 1660.5	1525 – 1559	FDD
25	1850 – 1915	1930 – 1995	FDD
26	814 – 849	859 – 894	FDD
27	807 – 824	852 – 869	FDD
28	703 – 748	758 – 803	FDD
29	N/A	717 – 728	FDD
30	2305 – 2315	2350 – 2360	FDD
31	452.5 – 457.5	462.5 – 467.5	FDD
32	N/A	1452 – 1496	FDD
33	1900 – 1920	1900 – 1920	TDD
34	2010 – 2025	2010 – 2025	TDD
35	1850 – 1910	1850 – 1910	TDD
36	1930 – 1990	1930 – 1990	TDD
37	1910 – 1930	1910 – 1930	TDD
38	2570 – 2620	2570 – 2620	TDD
39	1880 – 1920	1880 – 1920	TDD
40	2300 – 2400	2300 – 2400	TDD
41	2496 – 2690	2496 – 2690	TDD
42	3400 – 3600	3400 – 3600	TDD
43	3600 – 3800	3600 – 3800	TDD
44	703 – 803	703 – 803	TDD
45	1447 – 1467	1447 – 1467	TDD
46	5150 – 5925	5150 – 5925	TDD
47	5855 – 5925	5855 – 5925	TDD
48	3550 – 3700	3550 – 3700	TDD
...			
64	Reservado	Reservado	
65	1920 – 2010	2110 – 2200	FDD
66	1710 – 1780	2110 – 2200	FDD
67	N/A	738 – 758	FDD
68	698 – 728	753 – 783	FDD
69	N/A	2570 – 2620	FDD
70	1695 – 1710	1995 – 2020	FDD

Tabla 3: Bandas operantes para LTE [8].

La Tabla 3 muestra el número de banda, el rango de frecuencia que corresponde al enlace Uplink, el rango de frecuencia para el enlace Downlink y el modo de duplexación soportado.

En Ecuador, el ente regulador licitó a los operadores Conecel S.A., Otecel S.A y Corporación Nacional de Telecomunicaciones Empresa Pública (CNT EP) las siguientes porciones de espectro [9]:

- 60 MHz en la banda AWS (1700/2100 MHz) para Conecel S.A., 20 MHz para mejorar el servicio y 40 MHz para 4G.
- 50 MHz en la banda AWS (1700/2100 MHz) para Conecel S.A., 10 MHz para mejorar el servicio y 40 MHz para 4G.
- 40 MHz en la banda AWS y 30 MHz en la banda de 700 MHz para la Corporación Nacional de Telecomunicaciones Empresa Pública (CNT EP).

2.1.5 Redes heterogéneas.

El despliegue de redes móviles de telecomunicaciones está generalmente basado en el uso de macroceldas, las cuales tienen una alta potencia de transmisión y usan antenas en las terrazas o techos de los edificios. Una red compuesta solo por macroceldas es una red homogénea. Mientras que una red compuesta por diferentes tipos de radio bases es conocida como una red heterogénea [2].

Entre las ventajas que posee una red heterogénea se puede destacar:

- La adquisición de sitios para macroceldas puede ser difícil; mientras que para picoceldas y microceldas suele ser más fácil.
- Al aumentar la densidad de macroceldas para incremento de capacidad de cobertura o transmisión, aumenta la interferencia intercelda. Las picoceldas y microceldas pueden ser desplegadas con una mayor densidad e incrementar la capacidad de la red.
- Las femtoceldas pueden proveer cobertura en ubicaciones fuera del alcance de la red de acceso principal. También pueden proveer

cobertura en ubicaciones interiores donde las pérdidas de penetración del edificio son enormes para las señales de las radio bases exteriores.

- Las soluciones en interiores pueden proveer cobertura y capacidad dedicada para servir a clientes corporativos o especiales[2].

En la Figura 2.3 se muestra una red heterogénea para LTE de dos capas: macrocelda y femtoceldas, caso de estudio del presente trabajo.

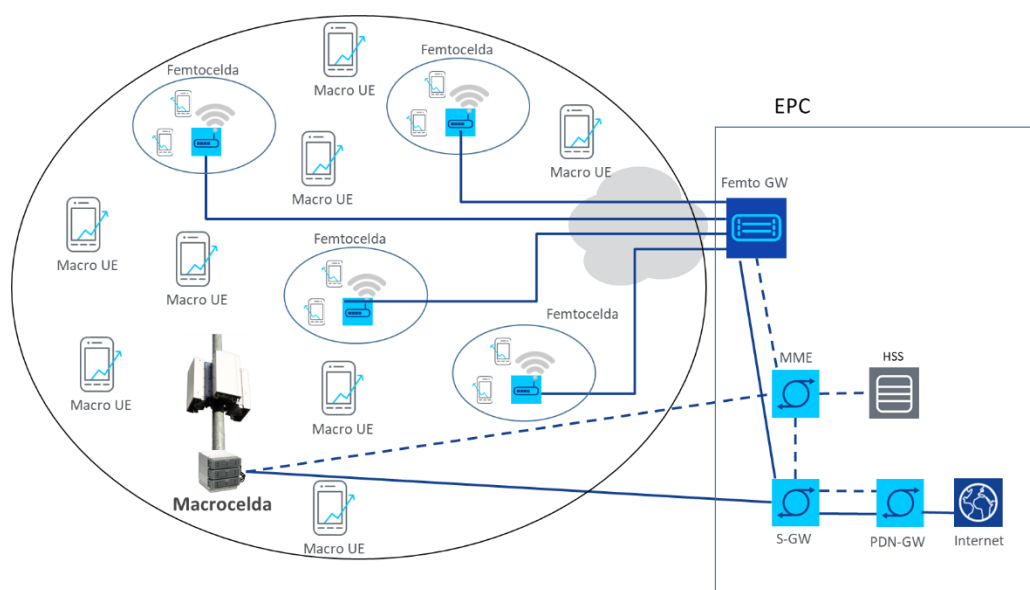


Figura 2.3 : Red heterogénea LTE de dos capas: macrocelda y femtoceldas [2].

En la sección 2.1.1 se mencionó que los eNode B se conectan directamente al EPC.

2.1.6 Tipos de radio bases.

En la Figura 2.4 se pueden observar los principales tipos de radio bases que integran una red heterogénea con su área de cobertura

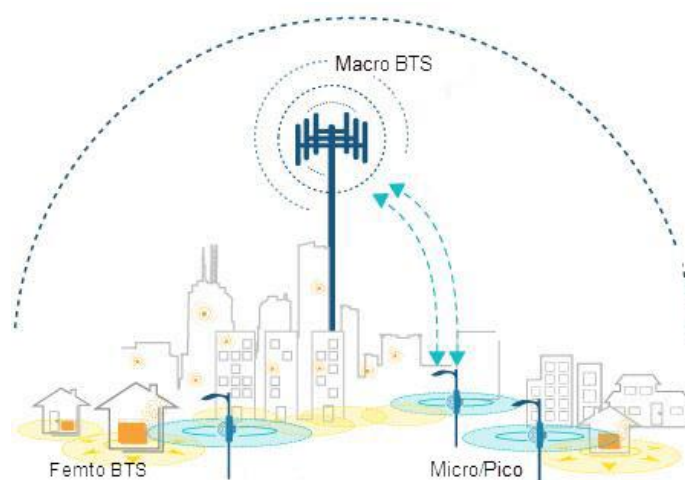


Figura 2.4: Tipos de radio bases y su cobertura[10].

Las radio bases suelen ser propiedad del operador móvil (macro, micro, pico BTS), sin embargo, la femto BTS son estaciones bases vendidas como dispositivo a los usuarios finales. Las características principales de cada tipo de radio base son las siguientes:

- **Macro BTS:** Se caracteriza por tener sus antenas sobre el nivel de terrazas o techos de edificios, de tal manera que su área de cobertura es relativamente extensa. No se define un límite superior para la potencia de transmisión en la especificación del 3GPP, en la práctica el ente regulador del país es quien lo indica. La potencia de transmisión suele ser de 20, 40 o 60 vatios, y tiene más de un sector [2].
- **Micro BTS:** 3GPP no especifica explícitamente una clase de potencia para una micro BTS. Pero una radio base de área extendida con la potencia de transmisión reducida puede ser diseñada y usada como una micro BTS. Al igual que una Macro BTS, tiene su antena por encima del nivel de la terraza o techos de edificios. Su potencia de transmisión de 5 a 10 vatios [2].
- **Pico BTS:** el 3GPP lo categoriza como una radio base de área local. Se caracterizan por su baja potencia de transmisión y su

relativamente pequeña área de cobertura. La potencia de transmisión no supera los 0.25 vatios o 25 dBm. En la Tabla 4 se presentan las configuraciones y niveles de potencia de una pico BTS [2]. Este tipo de radio base también es propiedad del operador.

Clase de BTS	Configuración de antenas	Potencia nominal de Salida
BTS de área local	1 puerto de antena	≤ 24 dBm
	2 puertos de antena	≤ 21 dBm
	4 puertos de antena	≤ 18 dBm
	8 puertos de antena	≤ 15 dBm

Tabla 4: Potencia nominal de salida para una BTS de área local [2].

- **Femto BTS:** el 3GPP lo categoriza como una radio base casera. Las Femto BTS fueron pensadas para su uso en casa y oficinas pequeñas. Su potencia de transmisión no excede 0.1 vatios o 20 dBm, en la Tabla 5 se presentan las configuraciones y niveles de potencia de una femto BTS [2].

Clase de BTS	Configuración de antenas	Potencia nominal de Salida
Home BTS	1 puerto de antena	≤ 20 dBm
	2 puertos de antena	≤ 17 dBm
	4 puertos de antena	≤ 14 dBm
	8 puertos de antena	≤ 11 dBm

Tabla 5: Potencia nominal de salida para una BTS casera [2].

Deben ser usadas en áreas donde la cobertura de cualquier otro tipo de radio base es débil; por ejemplo, en interiores. En contraste con el resto de tipo de radio bases, la ubicación de las femto BTS

usualmente no está controlado por el operador de la red; los usuarios finales son libres de ubicarla donde deseen [2].

Adicionalmente, la femto BTS hace uso de un femto eNode B Gateway (también conocido como Femto Gateway) para conectarse al EPC. La conexión entre el femto BTS y el femto Gateway suele ser a través de conexión de banda ancha para hogares; por ejemplo, ADSL, FTTH [2].

Las femto radio bases pueden usar el concepto de grupos de abonados cerrados (CSG) para el control de acceso. Cuando se activa CSG, solo los abonados registrados pueden acceder a la femto BTS; permitiendo por ejemplo que solo los miembros de la familia accedan cuando la femtocelda provee cobertura en una residencia. La desventaja de usar CSG es que la femto BTS aparece como una fuente de interferencia para los usuarios que no están autorizados [2]. También está la opción de no usar el control de acceso y que todos los usuarios que estén bajo la cobertura de la femtocelda tengan acceso, conocido como grupo de abonados abierto.

El presente trabajo se enfocará en una red heterogénea de dos capas que incluye una macro BTS y varias femto BTSs con control de acceso abierto para todos los femtousuarios, como se muestra en la Figura 2.3 de la sección 2.1.5.

2.2 Interfaz aire.

El objetivo de esta sección es explicar cómo se accede al recurso de la interfaz aire, la estructura de la trama y, principalmente, cómo se estructuran los recursos de transmisión.

2.2.1 Esquema de acceso múltiple.

Las técnicas de acceso múltiple permiten que los recursos puedan ser compartidos entre un grupo de usuarios. El enlace Downlink de LTE utiliza OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Acces), mientras que en

enlace de Uplink utiliza SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) [2].

Una señal OFDMA está basada en un conjunto de sub-portadoras y los recursos son compartidos por la asignación de un subconjunto de sub-portadoras a cada usuario. Las sub-portadoras son ortogonales porque cuando una de ellas se encuentra en su máximo valor, el resto están es cero, tal como se puede observar en la Figura 2.5.

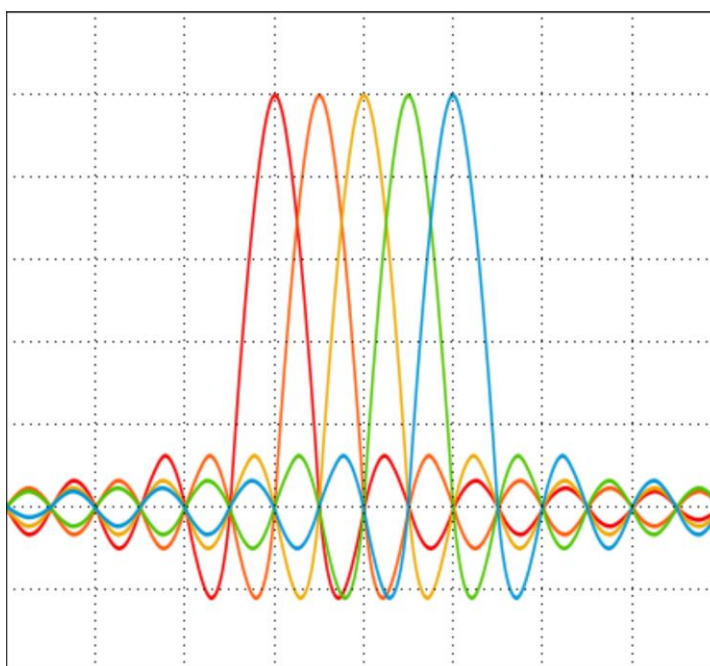


Figura 2.5: Sub-portadoras ortogonales para OFDMA [2].

Una de las desventajas de OFDMA es la alta relación de potencia pico a promedio (PAPR). Un alto PAPR impacta en la eficiencia de la potencia de la batería de los dispositivos móviles, para reducir el PAPR se seleccionó a SC-FDMA como para técnica de acceso múltiple para el Uplink. Sin embargo, el uso de SC-FDMA requiere procesamiento adicional en banda base [2].

Tanto OFMA como SC-FDMA tienen la ventaja de ser tolerante al retardo de propagación, lo que implica que el desvanecimiento sea plano en el dominio de la frecuencia y que la ecualización del receptor se vuelva

simple. En la Tabla 6 se compara a OFDMA y SC-FDMA con otros esquemas de acceso múltiple.

	FDMA	TDMA	CDMA	OFDMA	SC-FDMA
Asignación de Recursos	Portadora de RF	Ranura de tiempo	Códigos	Sub-portadoras	Sub-portadoras
Ejemplo de sistema	AMPS	GSM	UMTS	LTE Downlink	LTE Uplink

Tabla 6: Gama de técnicas de acceso múltiple [2].

2.2.2 Estructura de trama.

La estructura de trama considera solo el dominio del tiempo y son las mismas para el enlace de Downlink y Uplink. El estándar 3GPP TS 36.211 especifica las estructuras de tramas de tipo 1 y tipo 2; tipo 1 es aplicable a duplexación por división de frecuencia (FDD), mientras que tipo 2 es aplicable a duplexación por división de tiempo (TDD). En ambos casos las tramas son enumeradas usando el sistema de número de trama (SFN).

La estructura de la trama tipo 1 se muestra en la Figura 2.6, ésta es válida tanto para el enlace Uplink y Downlink:

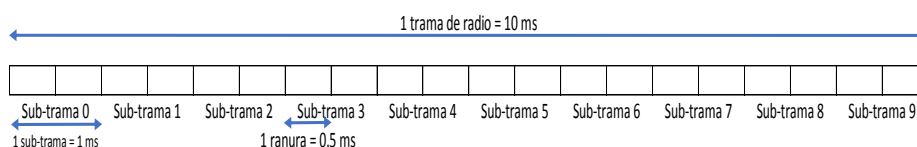


Figura 2.6: Estructura de trama tipo 1 [2].

En la Figura 2.7 en cambio se muestra la trama de tipo 2, las sub-tramas pueden ser para Uplink, Downlink o especial. Las sub-tramas especiales incluyen los campos: ranura de tiempo piloto para Downlink (DwPTS), período de guarda y ranura de tiempo piloto para Uplink (UpPTS). Las sub-tramas especiales se usan para cambiar de transmisión Downlink a Uplink.

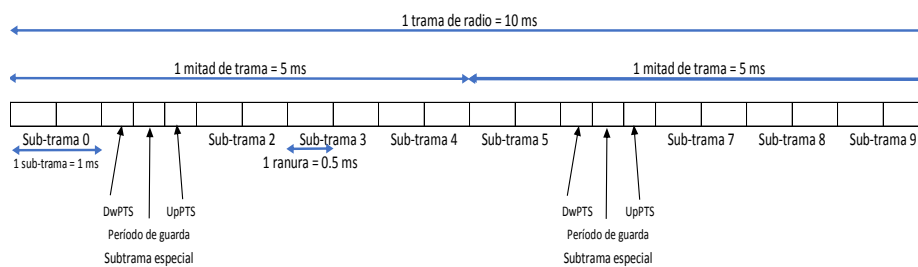


Figura 2.7: Estructura de trama tipo 2 [2].

2.2.3 Bloques de recursos.

Un bloque de recursos (RB) representa la unidad básica de recursos para la interfaz aire de LTE. El programador del eNode B asigna los bloques de recursos a los equipos de usuario (UE) al permitir la transferencia de datos. El RB es el mismo para la transmisión Downlink y Uplink [2].

El bloque de recursos es definido tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia. En el dominio del tiempo ocupa 0.5 ms, los cuales son divididos en 7 símbolos cuando se usa el prefijo cíclico normal y en 6 símbolos cuando se usa el prefijo cíclico extendido. En el dominio de la frecuencia ocupa 12 sub-portadoras de 15 KHz, resultando en un total de 180 KHz [2].

La cuadrícula generada por las sub-portadoras en el dominio de la frecuencia y los símbolos en el dominio del tiempo definen un conjunto de elementos de recursos (RE). Cuando se usa prefijo cíclico normal el RB tiene 84 RE, mientras cuando se usa el prefijo cíclico extendido tiene 72 RE. Un solo RE puede acomodar a un solo símbolo de modulación. En la Figura 2.8 se tiene una representación del RB [2].

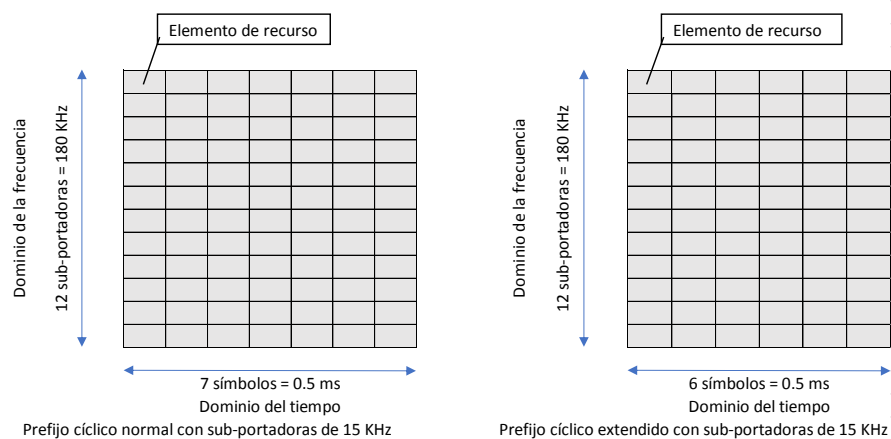


Figura 2.8: Bloque de recursos usando prefijo cíclico normal y extendido [2].

En la Tabla 7 se puede observar la cantidad de bloques de recursos, sub-portadoras, tasas de transmisión y ancho de banda para las seis configuraciones ancho de banda del canal LTE.

Ancho de banda del canal	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Bloques de recursos en el dominio de la frecuencia	6	15	25	50	75	100
Sub-portadoras en el dominio de la frecuencia	72	180	300	600	900	1200
Ancho de banda total de las sub-portadoras (MHz)	1.095	2.715	4.515	9.015	13.515	18.015
Tasa de símbolos de modulación con prefijo cíclico normal (Msps)	1.008	2.52	4.2	8.4	12.6	16.8
Tasa de símbolos de modulación con prefijo cíclico normal (Msps)	0.864	2.16	3.6	7.2	10.8	14.4

Tabla 7: Características del bloque de recursos en función del ancho de banda del canal [2].

2.3 Planificación de red.

La planificación de la red debe considerar aspectos como: cuántos elementos y dónde serán ubicados, qué valor de potencia debe irradiarse, cuál re-uso de

frecuencia es el más adecuado. Estos aspectos serán analizados en las siguientes secciones.

2.3.1 Planificación de red de radio acceso.

La planificación de la red de acceso tiene como objetivos identificar la ubicación geográfica para los eNode B, la configuración de antenas en términos de tipo, altura, azimut e inclinación. En la Figura 2.9 podemos observar como este proceso interactúa con otros tales como dimensionamiento, adquisición de sitio, diseño de sitio, construcción del sitio, aceptación del sitio y optimización [2].

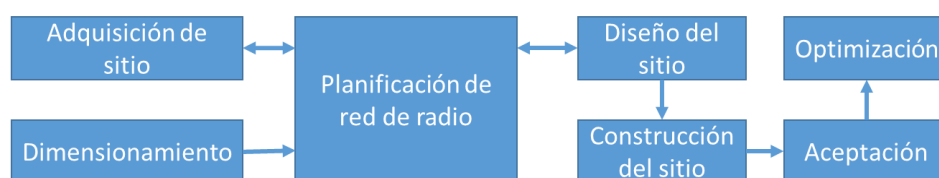


Figura 2.9: Etapas para el despliegue de sitios [2].

Dimensionamiento genera la estimación de la densidad de sitios, en otras palabras, el número de sitios que se requieren para cubrir las expectativas de cobertura y calidad. Adquisición de sitios provee una lista actual de los sitios disponibles a los planificadores de la red. La evaluación de los candidatos a sitios conlleva visitas a la ubicación, modelamiento en una herramienta de planificación; todo esto debido a la gran inversión que representa para el operador. Cuando un operador ya tiene desplegada una red 2G o 4G, entonces es probable el reuso de las ubicaciones existentes con o sin antenas compartidas [2].

Existen dos enfoques fundamentales para la planificación de la red de radio acceso:

- **Enfoque de pérdida de camino:** requiere de una herramienta capaz de completar los cálculos de pérdida de camino y mostrar las áreas geográficas donde los umbrales de pérdida de camino han sido excedidos. Las entradas de para este enfoque son: datos del sitio LTE (ubicación, altura, inclinación, azimut y tipo de antena

por ejemplo), modelo de propagación, mapa digital del terreno, umbrales de la intensidad de la señal. Los resultados suelen ser en términos de mejor cobertura de servicio y mejores áreas de servidor [2].

- **Enfoque basado en simulación:** requiere de una herramienta más sofisticada, la cual suele usar simulación de Mote Carlo. Es un proceso más complejo y que consume tiempo y recursos; sin embargo, genera una gran cantidad de información. Las entradas para este tipo de análisis son: datos del sitio LTE, modelo de propagación, mapa digital del terreno, suposición de parámetros, perfil de tráfico. Los resultados suelen ser en términos de cobertura, potencia transmitida, niveles de interferencia, capacidad de transmisión de la celda [2].

2.3.2 Presupuesto de enlace.

El presupuesto de enlace se usa tanto en el dimensionamiento del sistema como en la planificación de la red. El proceso de dimensionamiento provee una estimación del número de elementos de red que se requieren para alcanzar una cobertura específica y un rendimiento de capacidad. En la etapa de dimensionamiento se usa el presupuesto de enlace para estimar la máxima pérdida de camino permitida y la cobertura de la celda.

En la Tabla 8 se presentan un ejemplo de cálculo de presupuesto de enlace para el canal PUSCH de Uplink.

Ancho de Banda del Canal	20	MHz
Total de Bloques de Recursos	100	RBs
Bloques de Recursos asignados	8	RBs
Sub-portadoras asignadas	96	Sub-portadoras
Máxima potencia de transmisión	23	dBm
Ganancia de la antena del equipo de usuario	0	dBi
Pérdidas en el cuerpo	0	dB
EIRP transmitido	23	dBm

Ruido térmico por sub-portadora	-132,2	dBm
Ruido térmico total	-112,4	dBm
Figura de ruido del receptor	2,5	dB
Margen de interferencia	2	dB
Piso de interferencia	-107,9	dBm
Requisito de SINR	0,5	dB
Requisito de fuerza de la señal recibida (RSSR)	-107,4	dBm

Ganancia de la antena del eNode B	18	dBi
Pérdidas del cable	0	dB
Margen del desvanecimiento lento	9	dB
Ganancia del traslape de handover	2,5	dB
Pérdidas de penetración del edificio	18	dB
Requisito de potencia isotrópica	-100,9	dBm

Máxima pérdida de trayectoria permitida	123,9	dB
---	-------	----

Tabla 8: Ejemplo de cálculo de presupuesto de enlace para PUSCH [2].

En este ejemplo se ha asumido la máxima configuración de ancho de banda de canal de 20 MHz, al cual le corresponden 100 bloques de recursos. También se asume una asignación de 8 bloques de recursos para el enlace, recordemos que 1 bloque de recurso tiene 12 sub-portadoras; lo que a 8 RB le corresponde 96 sub-portadoras.

En la ecuación 2.1 se define el cálculo del EIRP transmitido:

$$EIRP_{Transmitido_{UL}} = \text{Máxima Potencia de Transmisión} + \text{Ganancia de la Antena del equipo de usuario} - \text{pérdidas en el cuerpo} \quad (2.1)$$

El ruido térmico por sub-portadora se calcula mediante la ecuación 2.2, donde k es la constante de Boltzmann, T es temperatura en Kelvin, y B es el ancho de banda de la portadora, en este caso 15 KHz; el ruido térmico total se define en la ecuación 2.3 y el piso de interferencia en la ecuación 2.4.

$$\text{Ruido térmico por sub_portadora} = 10 \log(1000kTB) \quad (2.2)$$

$$\text{Ruido térmico total} = \text{Ruido térmico por subportadora} + 10 \log(\text{número de subportadoras asignadas}) \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \text{Piso de interferencia} &= \text{Ruido térmico total} + \\ &\text{Figura de ruido del receptor} + \text{Margen de interferencia} \end{aligned} \quad (2.4)$$

El requisito de fuerza de la señal recibida se define a través de la expresión 2.5 y el requisito de potencia isotrópica se calcula a través de la ecuación 2.6:

$$\begin{aligned} \text{Requisito de fuerza de la señal recibida} &= \text{Piso de interferencia} + \\ \text{Requisito de SINR} & \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \text{Requisito de potencia isotrópica}_{UL} &= \\ \text{Requisito de fuerza de la señal recibida} &- \\ \text{Ganancia de la antena del eNode B} &+ \text{Pérdidas del cable} + \\ \text{Margen del desvanecimiento lento} &- \text{Ganancia del traslape de handover} + \\ \text{Pérdidas de penetración del edificio} & \end{aligned} \quad (2.6)$$

Finalmente, la máxima pérdida de trayectoria permitida se define a través de la expresión 2.7:

$$\begin{aligned} \text{Máxima pérdida de trayectoria permitida} &= \text{EIRP Transmitido} - \\ \text{Requisito de Potencia Isotrópica} & \end{aligned} \quad (2.7)$$

En la Tabla 9 se presentan un ejemplo de cálculo de presupuesto de enlace para el canal PDSCH de Downlink.

Ancho de Banda del Canal	20	MHz
Total de Bloques de Recursos	100	RBs
Bloques de Recursos asignados	8	RBs
Sub-portadoras asignadas	96	Sub-portadoras
Máxima potencia de transmisión	43	dBm
Potencia transmitida por bloque de recurso asignado	32	dBm
Incremento de antena múltiple	3	dB
Ganancia de la antena del eNode B	18	dB
Pérdidas del cable	2	dB
EIRP transmitido	51	dBm
Ruido térmico por sub-portadora	-132,2	dBm

Ruido térmico total	-112,4	dBm
Figura de ruido del receptor	7	dB
Margen de interferencia	2	dB
Piso de interferencia	-103,4	dBm
Requisito de SINR	-4,6	dB
Requisito de fuerza de la señal recibida (RSSR)	-108	dBm

Ganancia de la antena del equipo de usuario	0	dBi
Pérdidas en el cuerpo	0	dB
Margen del desvanecimiento lento	9	dB
Ganancia del traslape de handover	2,5	dB
Pérdidas de penetración del edificio	18	dB
Requisito de potencia isotrópica	-83,5	dBm

Máxima pérdida de trayectoria permitida	134,5	dB
---	-------	----

Tabla 9: Ejemplo de cálculo de presupuesto de enlace para PDSCH [2].

El cálculo de pérdida de trayectoria Downlink es similar al Uplink. Las principales diferencias se dan en las siguientes ecuaciones:

$$\text{Potencia transmitida por bloque de recursos asignado} = \text{Máxima potencia de transmisión} - 10 \log\left(\frac{\text{Número Total de bloques de recursos}}{\text{Número de bloques de recursos asignado}}\right) \quad (2.8)$$

La EIRP Transmitido para Downlink se define a través de la ecuación 2.9:

$$\text{EIRP Transmitido}_{DL} = \text{Potencia transmitida por bloque de recursos asignado} + \text{Incremento de antena múltiple} + \text{Ganancia de la antena del eNode B} - \text{Pérdida del cable} \quad (2.9)$$

Las ecuaciones 2.2 a 2.5 son válidas para en enlace de Downlink. El requisito de potencia isotrópica si difiere, por lo que se utiliza la ecuación 2.10 para el enlace Downlink.

$$\text{Requisito de potencia isotrópica}_{DL} = \text{Requisito de fuerza de la señal recibida} - \text{Ganancia de la antena del equipo de usuario} + \text{pérdidas en el cuerpo} + \text{margen del desvanecimiento lento} - \text{Ganancia del traslape de handover} + \text{Pérdidas de penetración del edificio} \quad (2.10)$$

Finalmente, la ecuación 2.7 que permite el cálculo de la máxima pérdida de trayectoria también es válida para el enlace Downlink.

2.3.3 Planificación de frecuencia.

La planificación de frecuencia determina el ancho de banda del canal para celda. Por ejemplo, si a un operador se le asignan 15 MHz para el despliegue de nodos LTE, pueden asignar 5 MHz a cada celda y tener una reutilización de frecuencia igual a 3 (ver Figura 2.10); o pueden asignar 15 MHz a cada celda y tener una reutilización de frecuencia igual 1 (ver Figura 2.11). La reutilización de frecuencia igual 1 es generalmente el enfoque aceptado para el despliegue de redes LTE, debido a que maximiza la eficiencia del uso del espectro; pero incrementa los niveles de interferencia intercelda [2].

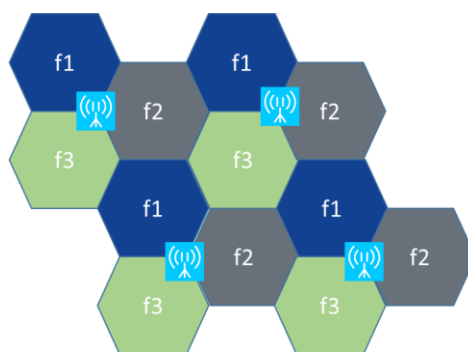


Figura 2.10: Ejemplo de reutilización de frecuencia igual a 3 [2].

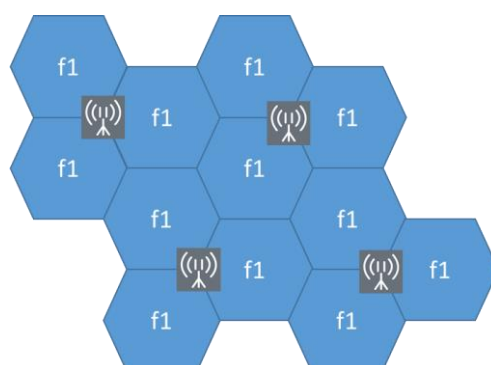


Figura 2.11: Ejemplo de reutilización de frecuencia igual 1 [2].

En redes heterogéneas, la interferencia de co-canal puede ser manejada a través de una combinación de planificación de frecuencia y agregación de portadoras [2]. Por ejemplo, la Figura 2.12 muestra como la implementación de de agregación de portadoras y CSG pueden combinarse para proveer cobertura:

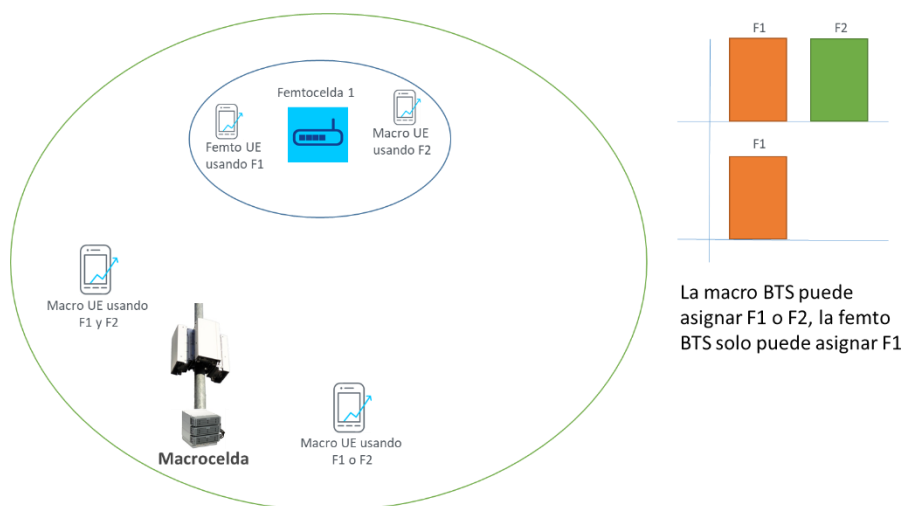


Figura 2.12: Agregación de portadoras en redes heterogéneas [2].

En el ejemplo expuesto, la macro BTS ha sido asignada con dos portadoras de 20 MHz; mientras que la femto BTS usa una sola portadora de 20 MHz. Un equipo de usuario versión 10 del 3GPP podrá usar 40 MHz en la cobertura de la macro BTS, mientras que otro usuario versión 8 o 9 podrá usar solo 20 MHz (F1 o F2). La femtocelda solo puede usar F1 y el macro usuario dentro de la cobertura de la femtocelda podría usar F2 sin generar interferencia de co-canal en la femtocelda [2].

Si bien el esquema propuesto en la Figura 2.12 ayuda a reducir la interferencia cross-tier, ésta aún puede presentarse; pues nada evita que, por cubrir la demanda de cobertura, la macro BTS asigne recursos de la misma portadora de la femtocelda.

A nivel de la capa macro, la interferencia intercelda puede ser reducida si los eNode B se coordinan entre sí para evitar asignar el mismo conjunto de sub-portadoras durante la misma sub-trama, proceso conocido como Coordinación de Interferencia de Intercelda (ICIC). Este proceso mejora

la relación señal a ruido, pero reduce la cantidad de recursos disponibles. Además que requiere la implementación de la interfaz X2 entre los eNode B con la finalidad de coordinar la asignación de recursos [2].

Una técnica ICIC en el dominio del tiempo es el uso de sub-tramas casi en blanco (ABS). Una trama ABS es aquella donde solo señales de referencia y otros canales obligatorios son transmitidos; pero no se transmiten datos. De esta manera, una celda transmitiendo ABS genera menos interferencia a sus vecinas. Se requiere que las celdas estén sincronizadas y coordinadas en los patrones de ABS, la cual puede modificarse dinámicamente a través de la interfaz X2 [11].

El inconveniente de este esquema es que la interfaz X2 no existe entre la macro-celda y la femtocelda. Pero se puede configurar un patrón semi-estático en la femtocelda y controlarlo a través del canal de operación y mantenimiento [11], tal como se muestra en la Figura 2.13.

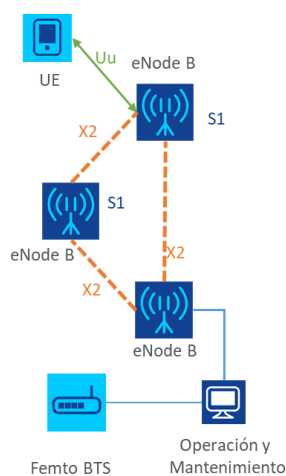


Figura 2.13: Configuración de ABS en una red heterogénea [11].

En la Figura 2.14 se muestra la interacción entre una macrocelda y una femtocelda CSG con ABS.

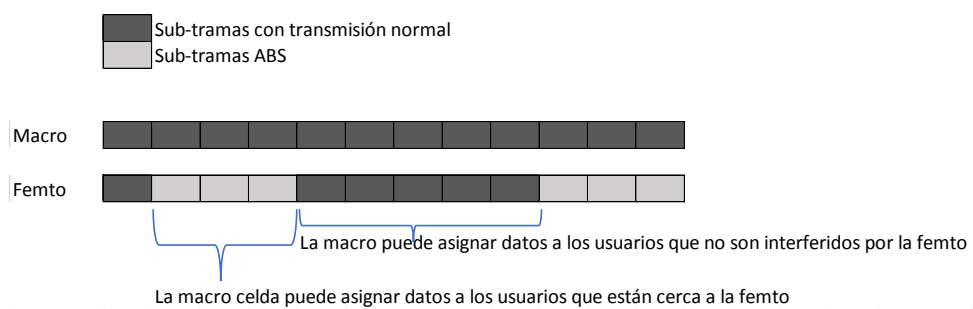


Figura 2.14: ICIC entra una macrocelda y una femtocelda [11].

CAPÍTULO 3

3. DEFINICIÓN DEL ESCENARIO A SIMULAR.

En esta sección se definen el escenario a simular y sus condiciones actuales: parámetros de radio frecuencia para los elementos de red involucrados, rangos de cobertura, análisis de la densidad de usuarios para Ecuador y estimaciones para un ambiente urbano de la ciudad de Guayaquil con el operador de telefonía móvil identificado como así por el extinto Consejo Nacional de Telecomunicaciones [12].

3.1 Parámetros de la Red Móvil.

El escenario de estudio considera los parámetros de radio frecuencia mostrados en la Tabla 10:

Frecuencia de DL	2100	MHz
Frecuencia de UL	1700	MHz
Ancho de banda del canal	20	MHz
Total de Bloques de Recursos	100	RBs
Bloques de recursos asignados por usuario	8	RBs

Tabla 10: Parámetros de radio frecuencia [2], [9].

Estos parámetros son necesarios para ajustar los modelos de propagación, hacer el cálculo del presupuesto de enlace y el análisis de las interferencias.

3.1.1 Macrocelda.

En la Tabla 11 se establecen los valores de potencia, ganancia y pérdidas a considerar en la macro BTS. Estos valores fueron tomados de los documentos [2], [13]:

Máxima potencia de transmisión	43	dBm
Ganancia por múltiples antenas	3	dB
Ganancia de la antena del eNode B	18	dB
Pérdidas del cable	2	dB
Figura de Ruido	5	dB
SINR para en enlace uplink	0,5	dB

Tabla 11: Potencia, ganancia y pérdidas de la macro BTS [2], [13].

Utilizando los valores de la Tabla 10 y 11, junto a la metodología explicada en la sección 2.3.1, se obtienen los siguientes valores de la Tabla 12:

Sub-portadoras asignadas	96	Sub-portadoras
Potencia transmitida por bloque de recurso asignado	32,0	dBm
Máximo EIRP transmitido	51,0	dBm
RSSR para el enlace DL: macro BTS hacia UE	-106	dBm

Tabla 12: Presupuesto de enlace para la macro BTS.

3.1.2 Femtocelda.

En la Tabla 13 se establecen los valores de potencia, ganancia y pérdidas a considerar en la femto BTS. Estos valores fueron tomados de los documentos [2], [13]:

Máxima potencia de transmisión	20	dBm
Ganancia por múltiples antenas	0	dB
Ganancia de la antena del eNode B	5	dBi
Pérdidas del cable	0	dB
Figura de Ruido	8	dB
SINR para el enlace uplink	0,5	dB

Tabla 13: Potencia, ganancia y pérdidas de la femto BTS [2], [13].

Utilizando los valores de la Tabla 10 y 13, junto a la metodología explicada en la sección 2.3.1 se obtienen los valores de la Tabla 14:

Sub-portadoras asignadas	96	Sub-portadoras
Potencia transmitida por bloque de recurso asignado	9,0	dBm
Máximo EIRP transmitido	14,0	dBm
RSSR para el enlace DL: femto BTS hacia UE	-106	dBm

Tabla 14: Presupuesto de enlace para la femto BTS.

3.1.3 Equipo de usuario.

En la Tabla 15 se establecen los valores de potencia, ganancia y pérdidas a considerar en el equipo de usuario [2], [8], [13].

Máxima potencia de transmisión	23	dBm
Ganancia de la antena del UE	0	dBi
Pérdidas en el cuerpo	0	dB
Figura de Ruido	9	dB

SINR para el enlace downlink	4,6	dB
------------------------------	-----	----

Tabla 15: Potencia, ganancia y pérdidas del equipo de usuario [2], [8], [13].

Utilizando los valores de la Tabla 10 y 15, junto a la metodología explicada en la sección 2.3.1 se obtienen los siguientes valores de la Tabla 16:

Sub-portadoras asignadas	96	Sub-portadoras
Máximo EIRP transmitido	23,0	dBm
RSSR para el enlace UL: UE hacia macro BTS	-104,9	dBm
RSSR para el enlace UL: UE hacia femto BTS	-101,9	dBm

Tabla 16: Presupuesto de enlace para el femto UE.

3.2 Consideraciones del escenario

3.2.1 Rangos de cobertura.

Se establece que la macrocelda tendrá una cobertura de un kilómetro de radio. Mientras que la femtocelda deberá tener una cobertura de 6 metros de radio, lo que equivale a decir que la femtocelda cubrirá un área de 113 m² aproximadamente, tamaño adecuado; ya que en planes habitacionales populares del Municipio de Guayaquil se ofertan casas sobre terrenos de 96 m² [14].

La propagación de la señal también depende los materiales de las edificaciones, que de acuerdo al censo realizado en el 2010 por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) el 71% de las casas del cantón Guayaquil son de paredes de bloque o ladrillo [15]. En la Tabla 17 se observa la distribución de las casas de acuerdo al tipo de paredes:

Cantón	Hormigón	Ladrillo o bloque	Adobe o tapia	Madera	Caña revestida o bahareque	Caña no revestida	Otros materiales	Total
GUAYAQUIL	16,48 %	71,32 %	0,27 %	1,81 %	4,44 %	5,46 %	0,21 %	100,00 %
JUAN GOMEZ RENDON (PROGRESO)	5,51 %	75,38 %	0,26 %	3,90 %	5,90 %	8,43 %	0,62 %	100,00 %
MORRO	1,45 %	78,02 %	0,34 %	3,66 %	4,43 %	11,50 %	0,60 %	100,00 %
POSORJA	4,57 %	74,66 %	0,20 %	2,19 %	8,93 %	9,18 %	0,27 %	100,00 %

PUNA	3,80 %	60,21 %	0,61 %	7,15 %	8,53 %	18,55 %	1,16 %	100,00 %
TENGUEL	7,24 %	66,35 %	0,15 %	15,42 %	5,91 %	4,74 %	0,19 %	100,00 %
Total	16,19 %	71,33 %	0,27 %	1,91 %	4,51 %	5,56 %	0,22 %	100,00 %

Tabla 17: Tipo de material de paredes exteriores en la provincia del Guayas [15].

En la actualidad, no existe forma de controlar la ubicación de las femtoceldas. Las femtoceldas celdas pueden estar muy alejadas entre sí como se muestra en la Figura 3.1, o pueden estar muy próximas como se observa en la Figura 3.2.

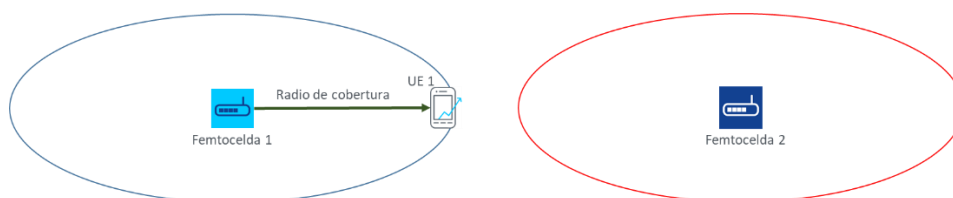


Figura 3.1: Femtoceldas separadas entre sí.

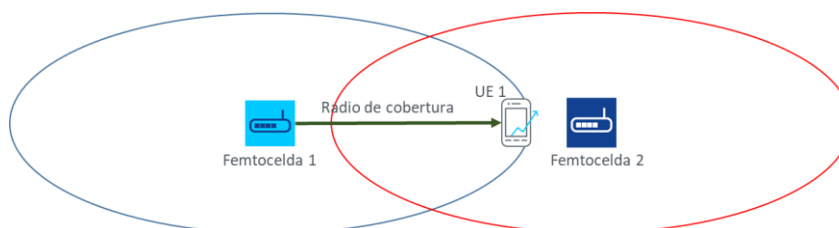


Figura 3.2: Femtoceldas cercanas entre sí.

¿Qué sucede cuando dos departamentos contiguos ubican su femtocelda del mismo lado? En este escenario la cobertura de las dos femtoceldas se traslapa y se tendría una elevada interferencia Co-Tier. Por lo que se propone clasificar la interacción de las femtoceldas de acuerdo a su proximidad en dos: cuando la distancia de separación es menor al doble de radio de cobertura de la femtocelda y cuando es mayor. En el presente trabajo se asume celdas de cobertura circular, que el femtousuario está en el borde de cobertura de la femtocelda, es decir la distancia de separación entre ambos es el radio de cobertura de la femtocelda. Mientras que la presencia de la femtocelda interferente puede ser desde

1 metro hasta salir de la zona de traslape. En la Figura 3.3 se observa mejor la interacción de distancias.

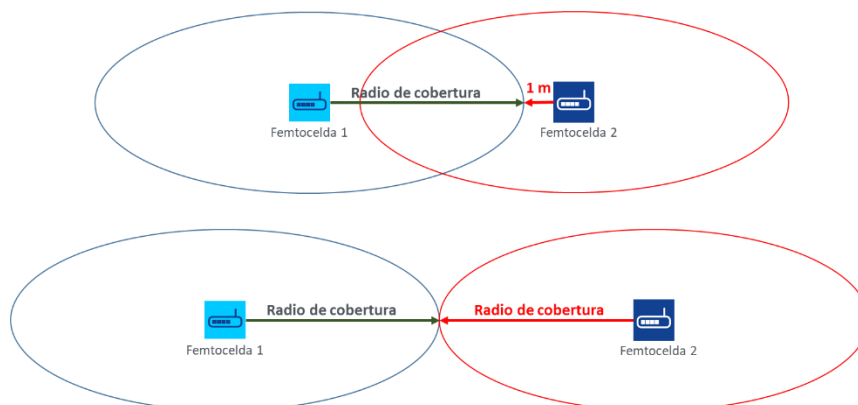


Figura 3.3: Interacción y radios de cobertura en celdas cercanas.

La complejidad del escenario se eleva al recordar que no solo interactúan dos femtoceldas; sino que se deben considerar varias femtoceldas. Se propone un esquema de anillos concéntricos para el análisis de interferencias. En este esquema el punto de estimación de la interferencia es el centro de los anillos, y en los anillos se ubican los femto elementos; tal como se observa en la Figura 3.4:

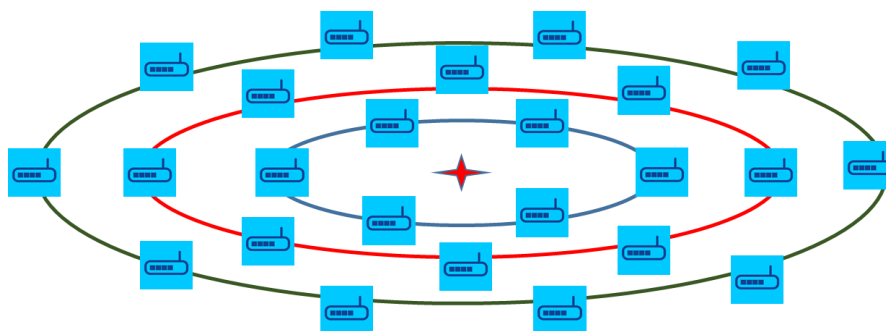


Figura 3.4: Esquema de anillos concéntricos

Al asumir esta distribución se facilita el análisis, pues basta con estimar el nivel de interferencia de un solo elemento del anillo y se puede escalar el valor a diferentes factores para calcular el valor total. Por ejemplo, se podría iterar la cantidad de elementos necesarios para producir interferencia a una determinada distancia.

Otra variante que se tiene en cuenta en el escenario de simulación es la presencia de edificios, donde en cada piso del edificio pueden existir femtoceldas. En la Figura 3.5 se muestra un edificio con una femtocelda por piso.

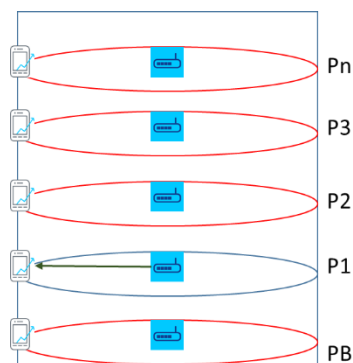


Figura 3.5: Edificio con femtoceldas.

La solución que se propone ante esta complejidad de tres dimensiones es transformarlo a dos dimensiones. Se mantiene el esquema de que el femtousuario está al borde de la cobertura, la femtocelda tiene un radio de cobertura constante de 6 metros, la femto BTS está en el centro del piso y la altura entre pisos se asume constante. Por ejemplo, para estimar la interferencia co-tier del enlace de bajada que percibe el usuario de la femtocelda del piso 1, solo debemos colocar en anillos concéntricos a los demás elementos. Tal como se muestra en la Figura 3.6.

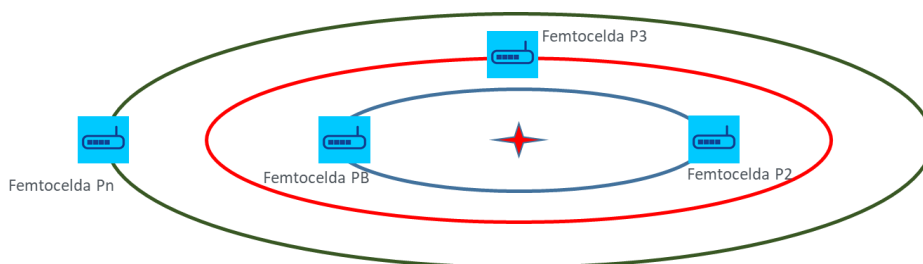


Figura 3.6: Equivalente en dos dimensiones de un edificio.

Incluso un escenario como la interacción de una femtocelda y un edificio, como se muestra en la Figura 3.7, puede obtenerse un equivalente a dos dimensiones como se muestra en la Figura 3.8

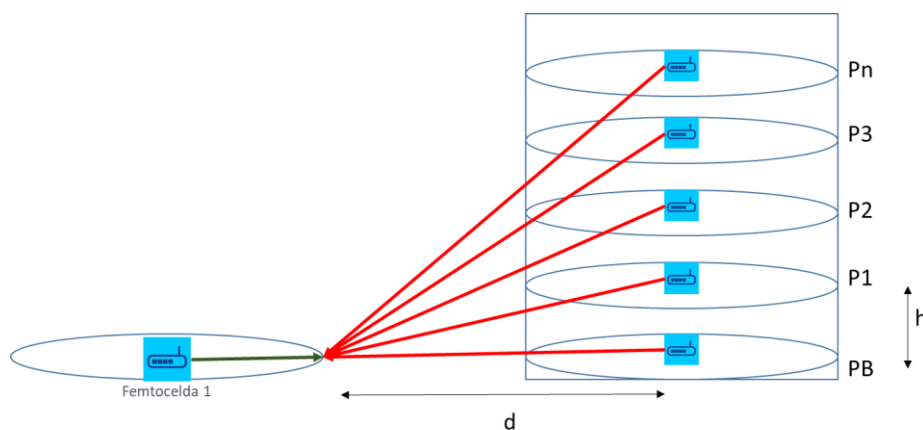


Figura 3.7: Femtocelda y edificio vecino con femtoceldas

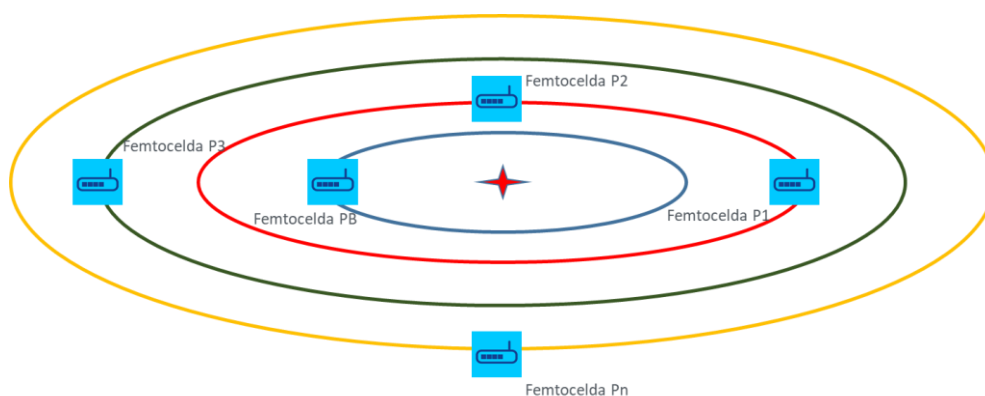


Figura 3.8: Equivalente en dos dimensiones de una femtocelda y edificio vecino con femtoceldas

El radio de los anillos concéntricos “r” estará en función de la distancia “d” entre las femtocelda a nivel del suelo y la altura entre pisos del edificio “h”, como se mostró en la Figura 3.7. Utilizando el teorema de Pitágoras se puede concluir la ecuación 3.1, donde “n” es el número del piso y si es Pb, n=0:

$$r = \sqrt{d^2 + (nh)^2} \quad (3.1)$$

La ecuación es válida cuando el punto de observación se encuentra a nivel de la cota de planta baja. Esta relación debe adaptarse en caso de que el punto de observación sea un piso diferente.

3.2.2 Densidad de usuarios.

La Agencia de Regulación y Control de la Telecomunicaciones (ARCOTEL) para el corte del mes de mayo 2017 en la sección de Servicio Móvil Avanzado (SMA): presentó entre varios reportes los siguientes:

- Densidad de líneas activas y participación de mercado.
- Líneas activas por tecnología
- Radiobases por prestador y tecnología

De los cuales se han tomado los valores que se muestran en la Tabla 18, 19 y 20:

Telefonía	Telefonía e Internet	Internet	Datos	Total Conecel	Total Nacional	Población Nacional
4 043 348	4 145 014	486 896	125 964	8 801 222	15 061 858	16 632 166,25

Tabla 18: Líneas por tipo de servicio para Conecel S.A. a nivel nacional [16].

PARROQUIA	GSM 850	GSM 1900	UMTS 850	UMTS 1900	LTE (AWS)
GUAYAQUIL	427	360	468	434	319
JUAN GOMEZ RENDON (PROGRESO)	4	0	2	2	0
MORRO	1	0	0	0	0
POSORJA	3	3	3	2	0
PUNA	2	0	0	0	0
TENGUEL	2	0	1	1	0

Tabla 19: Base instalada de Conecel S.A. en la provincia del Guayas, cantón Guayaquil [16].

GSM	UMTS	HSPA +	LTE	Total
1 014 576	4 084 533	2 771 959	930 154	8 801 222

Tabla 20: Distribución de los usuarios de Conecel S.A por tecnología de acceso [16].

En los reportes solo se tienen estadísticas de usuarios por tecnología a nivel nacional, no hay un detalle por provincia, cantón o parroquia que nos permita conocer la densidad de usuarios en el área urbana de Guayaquil. Por lo que es necesario hacer estimaciones en base a los valores publicados.

El Municipio de Guayaquil ha publicado información sobre la población y superficie de la ciudad Guayaquil, los cuales se muestran en la Tabla 21.

Población	Superficie Km ²
2 560 505	342

Tabla 21: Población y superficie de la ciudad de Guayaquil [17].

Definamos la densidad de usuarios LTE por operador a través de la ecuación 3.2:

$$Densidad\ de\ Usuario\ LTE = \frac{Cantidad\ de\ usuarios\ LTE\ del\ Operador}{Total\ de\ la\ Población\ Nacional} \quad (3.2)$$

Para el operador Conecel S.A. es de 5,59%; en otras palabras, el 5,59% de la población tiene una línea activa LTE con el operador Conecel.

También definamos la densidad de población urbana a través de la ecuación 3.3:

$$Densidad\ de\ Población = \frac{Habitantes\ del\ área}{Superficie\ del\ área} \quad (3.3)$$

Para la ciudad de Guayaquil, la densidad poblacional es de 7487 habitantes/Km². Al tener solo estadísticas nacionales sobre la distribución de las líneas, se hará una estimación de la cantidad de líneas activas LTE en la población de Guayaquil usando la ecuación 3.3:

$$Densidad\ de\ Usuario\ LTE\ por\ Ciudad = Densidad\ de\ Usuario\ LTE\ del\ Operador * Densidad\ de\ Población \quad (3.3)$$

Por lo que se estima en 419 usuarios LTE/Km² en la ciudad Guayaquil, siguiendo esta metodología.

3.2.3 Frecuencias.

El operador Conecel tiene asignado 40 MHz de espectro para LTE en la banda AWS [9], la banda ASW corresponde la banda 4 de LTE[18]. Para facilidad del cálculo y que los modelos de propagación puedan ser reutilizados con los otros operadores para futuros estudios, se define como frecuencia de Uplink 1700 MHz y frecuencia de Downlink a 2100 MHz. Adicionalmente se asume un factor de reutilización de frecuencia igual a 1. Se considera una sola portadora la cual es compartida para las dos capas: macrocelda y femtoceldas, además que las femtoceldas se encuentran en configuración de acceso abierta (sin CSG).

CAPÍTULO 4

4. PROPAGACIÓN E INTERFERENCIA CO-TIER Y CROS-TIER.

En este capítulo se revisarán los modelos de propagación y se escogerán los más adecuados para las condiciones definidas en el Capítulo 3. Se revisará el impacto de variantes tales como: ambiente interior o exterior, pérdidas de penetración debido al material, distribución de las femtoceldas en un solo nivel de cota o en varios. Para al final proponer métodos abreviados que nos permitan estimar la interferencia Co-Tier y Cross-Tier para el ambiente urbano de la ciudad de Guayaquil en la banda AWS.

4.1 Modelos de propagación en interiores y exteriores para la banda AWS.

La Tabla 22 muestra varios modelos de propagación existentes, los cuales fueron analizados para seleccionar los modelos a utilizar en el presente trabajo. En esta tabla, se lista los escenarios en los que los modelos han sido utilizados y la limitación por la cual no fue considerado para el modelamiento de la interferencia.

Modelo	Rango de Frecuencia	Escenario	Limitación
Stanford University Interim	> 1900 MHz	urbano, suburbano y rural	No cubre por completo el rango de frecuencias de AWS
Okumura	150 MHz - 1920 MHz	urbano, suburbano y rural	Distancias de 1Km a 100 Km, no es útil para distancias pequeñas y tampoco cubre el rango de frecuencias de AWS
Cost 231 - Hata	1500 MHz - 2000 MHz	urbano	No cubre por completo el rango de frecuencias de AWS
Cost – 231 Walfisch – Ikegami	800 MHz - 2000 MHz	urbano	No cubre por completo el rango de frecuencias de AWS
ITU-R P.1238	300 MHz - 100 GHz	Interiores: residencial, comercial, oficinas	Aplica en el escenario para indoor
3GPP TR 36.942	900 MHz - 2000 MHz	urbano, rural	No cubre por completo el rango de frecuencias de 2100 de AWS

Tabla 22: Modelos de propagación [5], [6], [19], [20].

Del listado mostrado, se usaron los modelos ITU-R P.1238 y 3GPP TR 36.942 para la propagación en interiores y exteriores.

Pérdidas en Interiores

La ITU propone el siguiente modelo de propagación para el cálculo de las pérdidas de trayectoria en interiores [20]:

$$L_{TOTAL} = L(d_0) + N \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + L_f(n) \text{ [dB]} \quad (4.1)$$

Donde:

- N: coeficiente de pérdida de potencia a distancia.
 - d: distancia de separación entre la estación base y el terminal móvil en metros, debe ser mayor a 1 metro.
 - d_0 : distancia de referencia,
 - $L(d_0)$: pérdidas de trayectoria a la distancia de referencia. Se define a través de la ecuación 4.2:

$$L(d_0) = 20 \log_{10} f - 28 \quad (4.2)$$

- f: frecuencia de la portadora en MHz.
- L_f : factor de pérdida de penetración del piso.
- n: número de pisos entre la estación base y el terminal móvil, n debe ser mayor o igual a cero. $L_f = 0$ dB cuando $n=0$.

Si empezamos a trabajar la ecuación 4.1 con 4.2 se obtiene:

$$L_{TOTAL} = 20 \log_{10} f - 28 + N \log_{10} d + L_f(n) \quad (4.3)$$

La ITU define el valor de $N=20$ para 2.1 GHz y $N=22$ para 1.7 GHz en una zona comercial [20], se seleccionan estos valores con la proyección de que este modelo pensando se podría aplicar en el casco comercial de Guayaquil.

Se adapta la ecuación 4.3 para definir las pérdidas de trayectoria tanto para Downlink a 2.1 GHz y Uplink a 1.7 GHz

Downlink en interiores:

$$L_{DL} = 20 \log_{10}(2100) - 28 + 20 \log_{10} d + L_f(n)$$

$$L_{DL} = 38.44 + 20 \log_{10} d + L_f(n) \quad (4.4)$$

Uplink en interiores:

$$L_{UL} = 20 \log_{10}(1700) - 28 + 22 \log_{10} d + L_f(n)$$

$$L_{UL} = 36.6 + 20 \log_{10} d + L_f(n) \quad (4.5)$$

Cuando los el emisor y receptor se localizan en el mismo nivel o piso:

$$L_f(n)=0 \quad (4.6)$$

En caso de encontrarse en diferentes pisos se utiliza el valor de:

$$L_f(n) = 6 + 3(n - 1) \quad (4.7)$$

La ecuación 4.6 es la más adecuada para el rango de frecuencias de AWS en la configuración comercial [20].

En base a las ecuaciones 4.4 a 4.7 se definen las pérdidas de trayectorias en los siguientes escenarios:

Downlink en interiores a un mismo nivel o piso:

$$L_{DL} = 38.44 + 20 \log_{10} d \quad (4.6)$$

Downlink en interiores en diferente nivel o piso:

$$L_{DL} = 31.44 + 20 \log_{10} d + 3n \quad (4.7)$$

Uplink en interiores a un mismo nivel o piso:

$$L_{UL} = 36.6 + 22 \log_{10} d \quad (4.8)$$

Uplink en interiores en diferente nivel o piso:

$$L_{UL} = 39.6 + 22 \log_{10} d + 3n \quad (4.9)$$

La organización 3GPP propone la ecuación 4.10 para el cálculo de las pérdidas por trayectoria en interiores [21]:

$$L = 20 \log_{10} \frac{4\pi f}{c} + 20 \log_{10} d + q_{in} W_{in} + q_{ex} W_{ex} + F n^{((n+2)/(n+1)-0.46)} \quad (4.10)$$

Donde:

- f : es la frecuencia de la portadora en Hz.
- c : velocidad de la luz en m/s.
- d : distancia entre el transmisor y el receptor en metros.
- W_{in} : pérdidas de las paredes internas.
- q_{in} : número total de paredes internas entre el transmisor y el receptor.
- W_{ex} : pérdidas de las paredes externas.
- q_{ex} : número total de paredes externas entre el transmisor y el receptor.
- F : pérdida del piso.
- n : número de pisos que separan al transmisor y receptor.

Cambiando la escala de la frecuencia de Hz a MHz, la ecuación 4.10 se transforma en 4.11:

$$L = 20 \log_{10} f - 28 + 20 \log_{10} d + q_{in}W_{in} + q_{ex}W_{ex} + Fn^{((n+2)/(n+1)-0.46)} \quad (4.11)$$

La diferencia entre las ecuaciones 4.11 y 4.3 son los factores $q_{in}W_{in}$, $q_{ex}W_{ex}$ y $Fn^{((n+2)/(n+1)-0.46)}$. El último factor es una estimación de las pérdidas de penetración del piso, en donde [21] propone una forma diferente de realizar la estimación. El modelo propuesto a través de la ecuación 4.3 no considera las pérdidas de paredes internas ni externas; sin embargo, la ecuación 4.11 está adaptada para una frecuencia de portadoras de 2 GHz y no para la banda AWS. El presente trabajo propone completar los modelos representados a través de las ecuaciones 4.6 a 4.9 adaptadas a la frecuencia de AWS adicionando las pérdidas por paredes.

En [13] se propone representar las pérdidas de paredes internas con un valor lineal logarítmico de 0.7 dB/m. Las pérdidas por paredes externas dependerán del material que se considere para el análisis, en la Tabla 23 se indican los valores típicos de acuerdo al material.

Frecuencia	1.8 a 2.6	GHz
Pared de concreto	15 a 30	dB
Pared de ladrillo	10	dB
Piso de madera	5	dB
Pared de vidrio grueso	3 a 5	dB
Pared de vidrio delgada	1 a 3	dB
Puerta de ascensor	10 a 30	dB

Tabla 23: Pérdidas de penetración de edificios por tipo de material [22].

Considerando que la distancia a la que se quiere calcular la pérdida de propagación puede estar fuera del departamento, se denomina r al espacio recorrido al interior del departamento donde hay pérdidas de las paredes internas y d a la distancia al punto de observación. La pérdida por pared externa se representa con L_{OW} y se lo representa a través de una sumatoria, en caso de que el punto de observación sea el interior de otro edificio. En base a estas consideraciones se adaptan las ecuaciones 4.6 a 4.9 en 4.12 a 4.15 respectivamente:

Downlink en interiores a un mismo nivel o piso:

$$L_{DL} = 38.44 + 20 \log_{10} d + 0.7r + \sum L_{OW} \quad (4.12)$$

Downlink en interiores en diferente nivel o piso:

$$L_{DL} = 31.44 + 20 \log_{10} d + 3n + 0.7r + \sum L_{OW} \quad (4.13)$$

Uplink en interiores a un mismo nivel o piso:

$$L_{UL} = 36.6 + 22 \log_{10} d + 0.7r + \sum L_{OW} \quad (4.14)$$

Uplink en interiores en diferente nivel o piso:

$$L_{UL} = 39.6 + 22 \log_{10} d + 3n + 0.7r + \sum L_{OW} \quad (4.15)$$

Se toma el escenario básico: una femtocelda y un femtousuario dentro de un departamento, tal como se muestra en la Figura 4.1:

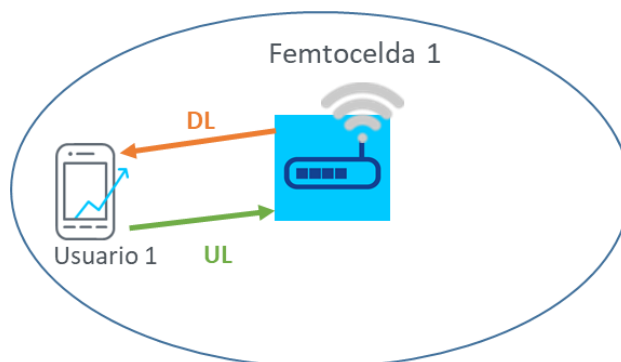


Figura 4.1: Escenario Femto BTS – Femto UE dentro del mismo departamento.

Se emplean las ecuaciones 4.12 y 4.14 para obtener:

$$L_{DL} = 38.44 + 20 \log_{10} d + 0.7d \quad (4.16)$$

$$L_{UL} = 36.6 + 22 \log_{10} d + 0.7d \quad (4.17)$$

Tomando en cuenta que el radio de cobertura de la femto celda es de 6 metros, se obtiene la siguiente figura con las pérdidas de trayectoria

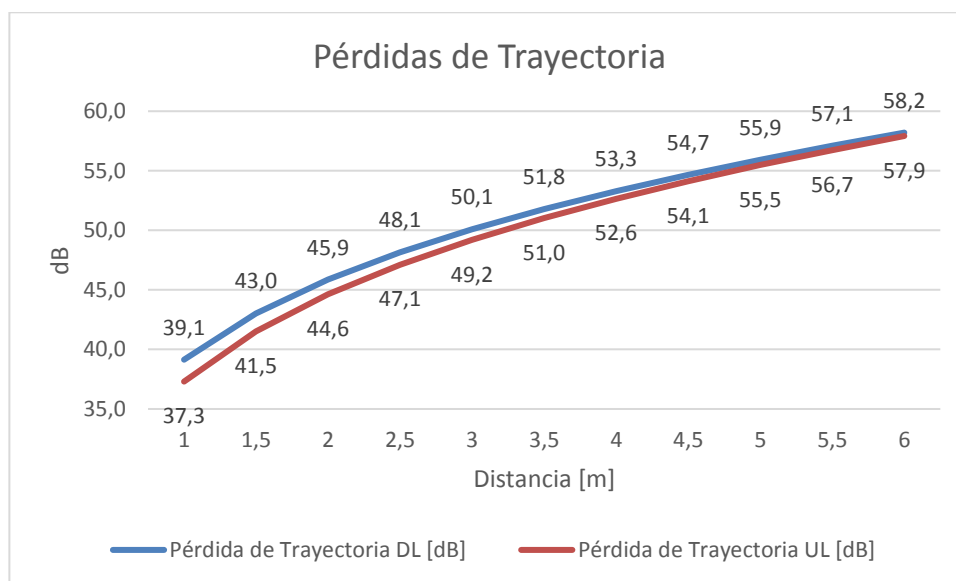


Figura 4.2: Pérdidas de trayectoria Femto BTS – Femto UE dentro del mismo departamento.

Pérdidas en Exteriores

El Instituto de Estándares de Telecomunicaciones Europeo (ETSI) en [19] propone el siguiente modelo de pérdidas de trayectoria en exteriores de ambientes urbanos:

$$L = 40(1 - 4 \times 10^{-3} D_{hb}) \log_{10}(R) - 18 \log_{10}(D_{hb}) + 21 \log_{10}(f) + 80 \text{ [dB]} \quad (4.18)$$

Donde:

- R: distancia entre el emisor y receptor en kilómetros.
- f: frecuencia de la portadora en MHz.
- D_{hb} : es la altura de la antena de la estación base en metros, medida desde el nivel promedio de la terraza.

Este modelo de pérdida de trayectoria tiene como limitantes:

- D_{hb} puede ser de 0 a 50 metros.
- Este modelo está diseñado para distancias de cientos de metros hasta kilómetros, no es muy preciso para distancias pequeñas.

Se asigna un valor de 15 metros a D_{hb} , se cambia la escala de R a metros y se emplean las frecuencias de AWS para obtener las ecuaciones:

$$L_{DL} = 15.8 + 37.6 \log_{10} R \quad (4.19)$$

$$L_{UL} = 13.9 + 37.6 \log_{10} R \quad (4.20)$$

En las ecuaciones 4.19 y 4.20 no se consideran las pérdidas de penetración del edificio en caso de que el UE se encuentre dentro de una casa, por lo que se modifican dichas ecuaciones considerando las pérdidas de paredes externas:

$$L_{DL} = 15.8 + 37.6 \log_{10}(R) + L_{OW} \quad (4.21)$$

$$L_{UL} = 13.9 + 37.6 \log_{10} R + L_{OW} \quad (4.22)$$

Consideremos el escenario más simple: una macro BTS y un UE fuera, tal como se muestra en la Figura 4.3:

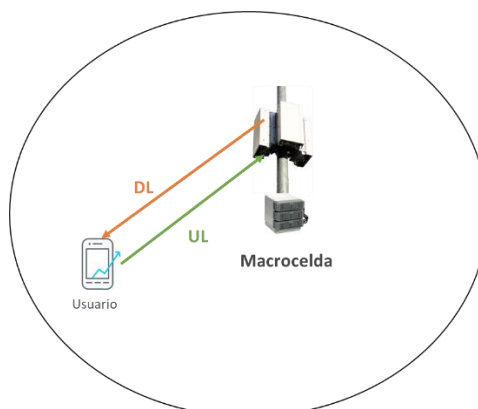


Figura 4.3: Escenario Macro BTS – Macro UE.

Empleando las ecuaciones 4.19 y 4.20 con limitación de cobertura de 1km para la macrocelda se obtienen las pérdidas de trayectoria del escenario descrito, las cuales se muestran en la Figura 4.4.

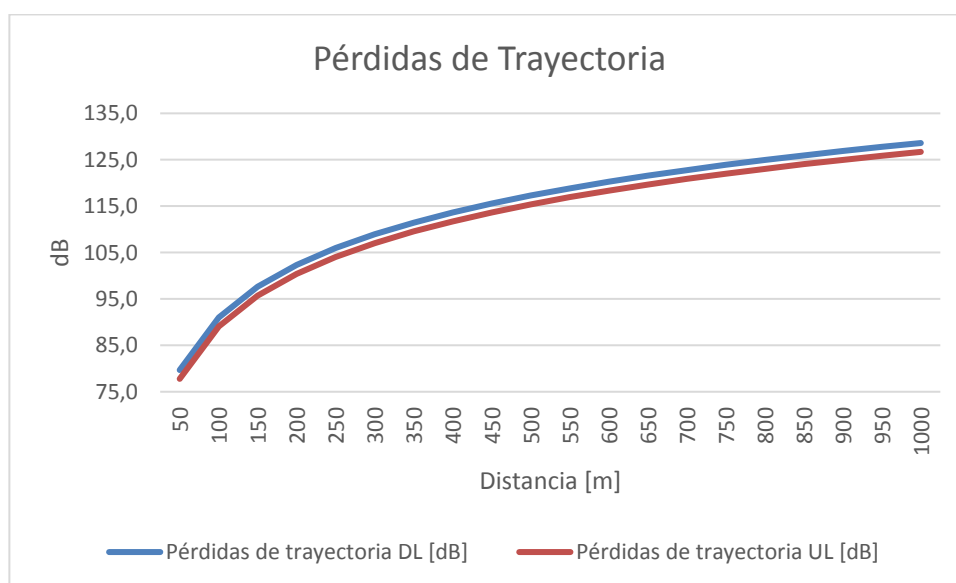


Figura 4.4: Pérdidas de trayectoria Macro BTS – Macro UE.

Si el punto de medición de la pérdida de trayectoria no es dentro del departamento donde está la femto BTS; sino que está en la proximidad afuera, se usa el modelo en interiores a pesar de que el receptor esté en el exterior modificado a los siguientes enfoques: Se han encontrado dos enfoques ante esta situación, el primero en [13] y el segundo en [23]:

- Modelo 1 de estimación de la propagación para interiores: $L = \text{Max}(L_{\text{indoor}}, L_{\text{outdoor}}) + 0.7r + \sum L_{\text{OW}}$ (4.23)
- Modelo 2 de estimación de la propagación para interiores: $L = L_{\text{indoor}} + L_{\text{outdoor}} + \sum L_{\text{OW}}$ (4.24)

4.2 Cálculo de la interferencia Co-Tier.

En la sección 1.1 se indicó que la interferencia Co-Tier se da entre elementos que pertenecen a una misma capa. En la definición del escenario en la sección 3.1 y 3.2 se limitó la configuración a una macro BTS y varias femto BTS; por lo que el análisis Co-Tier se enfoca en la interacción entre femtoceldas y femtousuarios.

Para determinar la interferencia que produce un elemento de red debemos saber cuál es la potencia que irradia y cuánto de esa potencia llega realmente al punto de medición (cuánto se pierde en la trayectoria). En la sección 4.1 se plantearon modelos para la determinación de las pérdidas de trayectoria; pero aún no se ha determinado a qué potencia se debe irradiar.

En la Tabla 14 se determinó que el máximo EIRP que puede transmitir una femtocelda es 14 dBm, el mínimo EIRP es -6dBm y el RSSR requerido en DL es de -106 dBm. Para limitar la cobertura a un radio de 6 metros se usa el modelo de propagación de la ecuación 4.16 para obtener la Tabla 24. En ella se observa que se debería irradiar a -47,8 dBm.

d [m]	Pérdida de Trayectoria DL [dB]	Max EIRP FBTS [dBm]	Max Rx Power [dB] = Max FBTS EIRP - Pérdida de Trayectoria	RSSR	Min Tx Power para llegar RSSR = RSSR + Pérdida de Trayectoria
6	58,2	14,0	-44,2	-106,0	-47,8

Tabla 24: Potencia DL en cobertura al interior de un departamento.

Sin embargo, el menor EIRP transmitido que se puede usar en la Femto BTS es -6 dBm, ver Tabla 25:

d [m]	Pérdida de Trayectoria DL [dB]	Tx EIRP [dBm]	Rx Power = Tx EIRP - Pérdida de trayectoria [dBm]
6	58,2	-6,0	-64,2

Tabla 25: Potencia que transmite la FBTS y que percibe el FUE a una distancia de 6 metros.

En resumen, todas las femtoceldas transmitirán -6 dBm en el enlace DL para cada uno de los usuarios, mientras que al usuario al máximo de la cobertura de la femtocelda le llega un nivel de señal de -64,2 dBm.

En la Tabla 15 se determinó que el máximo EIRP que puede transmitir un UE es 23 dBm, el mínimo EIRP -40 dBm y el RSSR requerido en UL hacia la femto BTS es -101,9 dBm. Se analiza el escenario en el caso extremo: cuando el UE está al borde de la cobertura de la FBTS: a 6 metros; y haciendo uso de la ecuación 4.17 se obtiene la Tabla 26:

d [m]	Pérdida de trayectoria UL [dB]	Max EIRP FUE [dBm]	Max Rx Power [dB] = Max UE EIRP - Pérdida de Trayectoria	RSSR	Min Tx Power para llegar RSSR = RSSR + Pérdida de Trayectoria
6	57,9	23,0	-34,9	-101,9	-44,0

Tabla 26: Potencia UL en cobertura al interior de un departamento.

Sin embargo, el menor EIRP transmitido que se puede usar el Femto UE es -40 dBm. Considerando que los macro usuarios pueden ser una fuente de interferencia en el análisis cross-tier se selecciona el valor de 0 dBm, ver Tabla 27.

d [m]	Pérdida de Trayectoria UL [dB]	Tx EIRP [dBm]	Rx Power = Tx EIRP - Pérdida de trayectoria [dBm]
6	57,9	0,0	-57,9

Tabla 27: Potencia que transmite el FUE y que percibe la FBTS a una distancia de 6 metros.

En resumen, para facilidad de análisis se asume que los femtousuarios están al borde de la cobertura en la máxima, cada uno de los femtousuarios transmitirán 0 dBm en el enlace UL, mientras que la femtocelda le llega un nivel de señal de -57,9 dBm.

En la Tabla 28 se recopilan las potencias de transmisión de los femto elementos y los niveles de potencia esperados en los receptores:

FBTS Tx EIRP	-6	dBm
FUE Tx EIRP	0	dBm
Nivel de la señal UL en el receptor	-64,2	dBm
Nivel de la señal DL en el receptor	-57,9	dBm

Tabla 28: Niveles de potencia para los femto elementos.

De manera general se define a la interferencia como:

$$I = Tx\ EIRP - L(d) \quad (4.25)$$

Donde el Tx EIRP en DL es Tx EIRP de la femto BTS interferente y en UL será el Tx EIRP del femto usuario interferente, valores fijos determinados en la Tabla 28. La parte variable es la pérdida de trayectoria debido a la distancia L(d).

4.2.1 Edificaciones a un solo nivel.

En la Figura 4.5 se muestra la interacción entre los femto elementos y la generación de interferencia Co-Tier en Downlink y Uplink. La línea verde representa el enlace de la señal que provee el servicio de acceso en DL o UL, mientras que la línea discontinua roja representa la interferencia co-tier.

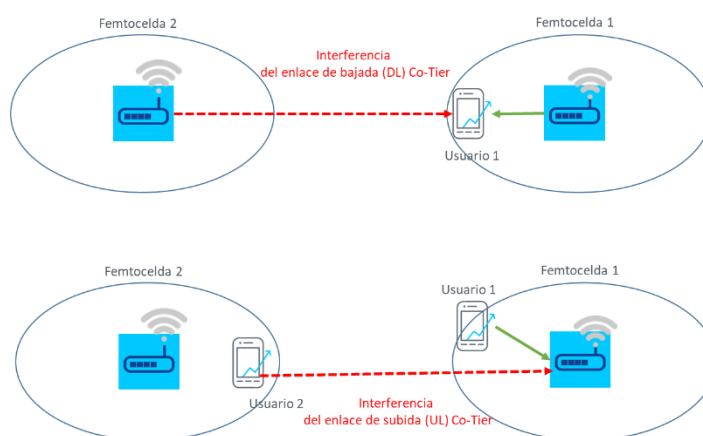


Figura 4.5: Interferencia Co-Tier al mismo nivel de cota.

Para la estimación de la interferencia Co-tier se usarán los modelos de propagación en interiores 1 y 2 de las ecuaciones 4.23 y 4.24 en conjunto

con los modelos de propagación de las ecuaciones 4.12 y 4.14. Se obtiene:

- Co-Tier Downlink Modelo 1:

$$L = \max(38.44 + 20 \log d ; 15.8 + 37.6 \log d) + 0.7 r + \text{Low1} + \text{Low2}$$

- Co-Tier Downlink Modelo 2:

$$L = 38,44 + 20 \log d + 0,7d + \text{Low1} + \text{Low2}, \text{ para } d \leq r.$$

$$L = 38,44 + 20 \log r + 15,8 + 37,6 \log (d-r) + 0,7r + \text{Low1} + \text{Low2},$$

para $d > r$

- Co-Tier Uplink Modelo 1:

$$L = \max(36.6 + 22 \log d ; 13.9 + 37.6 \log d) + 0.7 r + \text{Low1} + \text{Low2}$$

- Co-Tier Uplink Modelo 2:

$$L = 36.6 + 22 \log d + 0.7 d + \text{Low1} + \text{Low2}, \text{ para } d \leq r.$$

$$L = 36.6 + 22 \log r + 13.9 + 37.6 \log (d-r) + 0.7 r + \text{Low1} + \text{Low2},$$

para $d > r$.

Se asume una pérdida de 10 dB en cada pared externa, la presencia de un elemento femtousuario o femtocelda, lo que permite obtener las interferencias mostradas en las Figuras 4.6 y 4.7

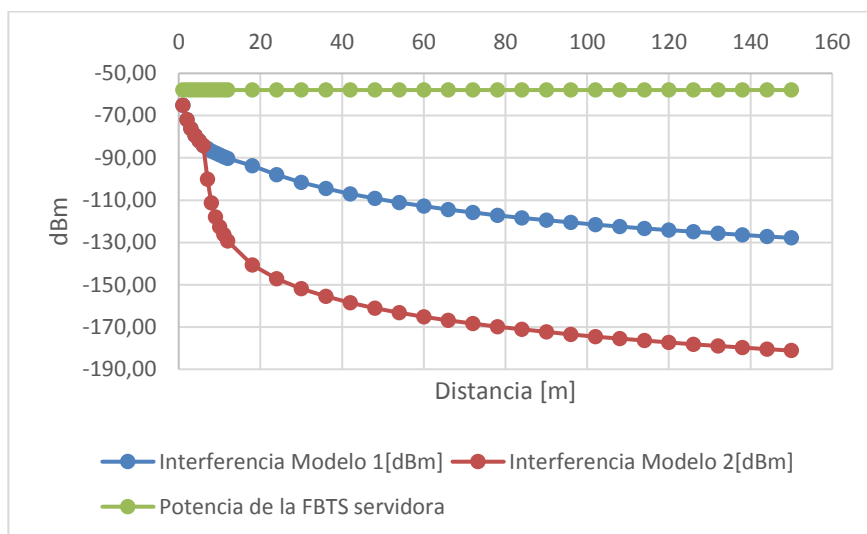


Figura 4.6: Interferencia Downlink Co-Tier a un mismo nivel de cota.

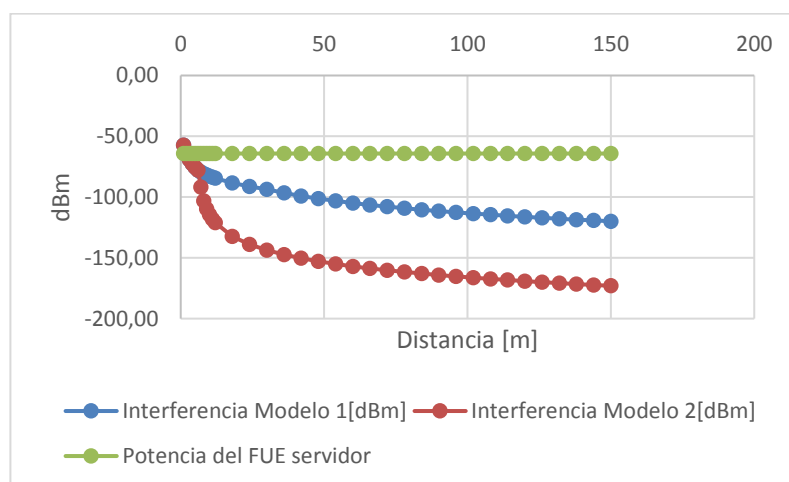


Figura 4.7: Interferencia Uplink Co-Tier a un mismo nivel de cota.

La interferencia UL Co-Tier siguiendo el modelo 2 prevalece sobre la señal servidora a distancias cortas y genera inconvenientes, mientras que en DL Co-Tier no sobrepasa el valor de la señal servidora; pero es muy cercano. Se consideró la presencia solo elemento y que se trabaja con un solo tipo de pérdida de penetración del edificio, en la sección 4.4 se analizarán diferentes materiales a fin de determinar la cantidad de elementos necesarios para generar inconvenientes a diferentes distancias.

4.2.2 Edificaciones con varios niveles.

Para el análisis de la interferencia dentro de un edificio se consideran dos escenarios: cuando el punto de medición de la interferencia está en un extremo del edificio como la planta baja o cuando se encuentra en la mitad del edificio. Además, se asume que la altura de cada piso es de 3 metros.

Primero se analiza cuando el punto de observación está en la planta baja, tal como se muestra en la Figura 4.8.

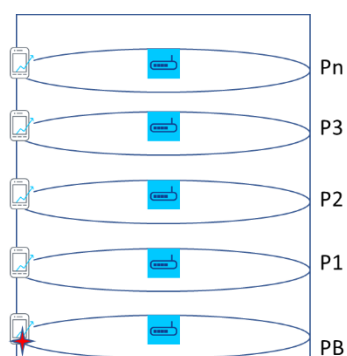


Figura 4.8: Análisis de edificio con punto de observación en planta baja.

Utilizando las ecuaciones 4.7 y 4.9 y asumiendo una femto BTS y femto UE por piso, se obtienen los resultados mostrados en las Figuras 4.9 y 4.10.

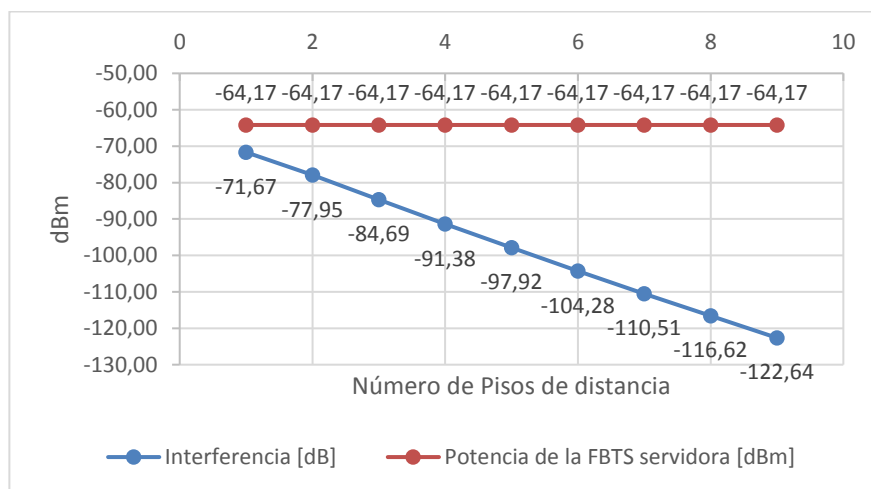


Figura 4.9: Interferencia Co-Tier Downlink Indoor en el mismo Edificio y punto de observación en la planta baja.

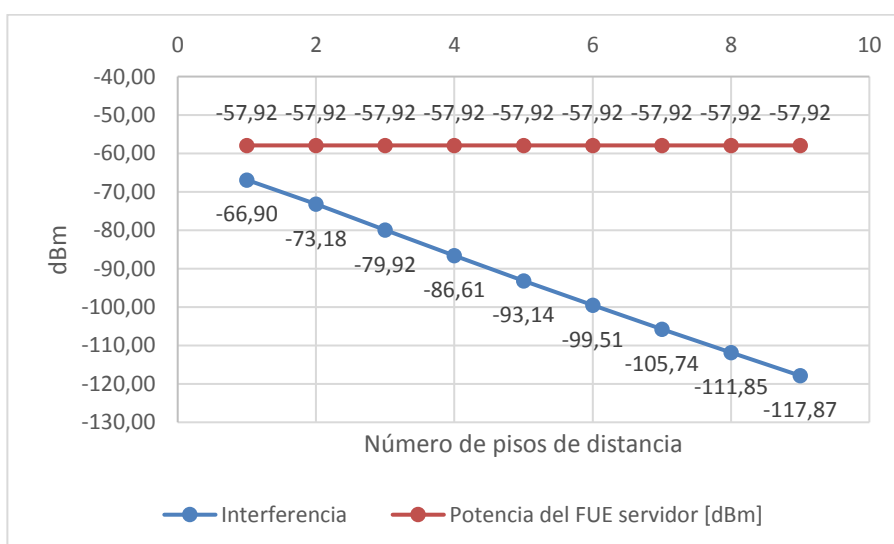


Figura 4.10: Interferencia Co-Tier Uplink Indoor en el mismo Edificio y punto de observación en la planta baja.

Con una femto BTS y un femto UE por piso el nivel de interferencia no representa inconvenientes, como se observa en las figuras previas. Pero es necesario determinar la cantidad de elementos que se necesitaría para generar interferencia, lo cual se logra a través de la ecuación 4.26:

$$n = \frac{\text{Nivel de Potencia de la señal servidora}}{\text{Interferencia unitaria}} \quad (4.26)$$

El nivel de potencia de la señal servidora tanto en DL como UL fue determinado en la Tabla 28 y la interferencia unitaria fue determinada en las Figuras 4.9 y 4.10. A través de estos valores se determinan los valores de las Figuras 4.11 y 4.12.

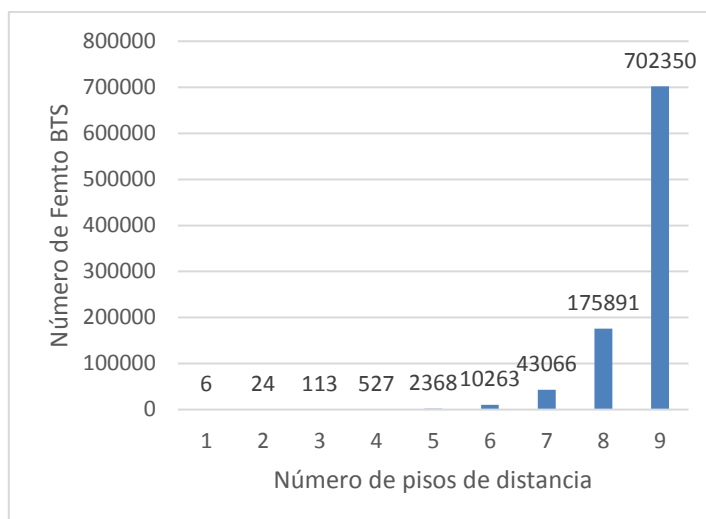


Figura 4.11: Cantidad de elementos para producir Interferencia Downlink Co-Tier y punto de observación en la planta baja.

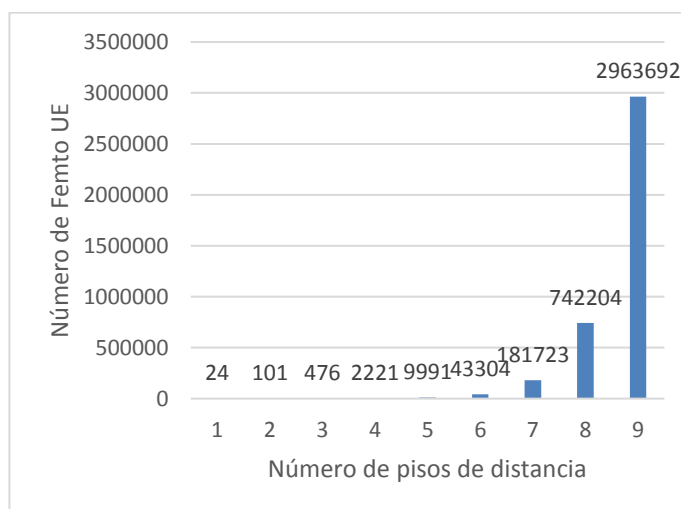


Figura 4.12: Cantidad de elementos para producir Interferencia Uplink Co-Tier y punto de observación en la planta baja.

A continuación, se analiza el escenario con el punto de observación en la mitad del edificio, tal como se muestra en la Figura 4.13.

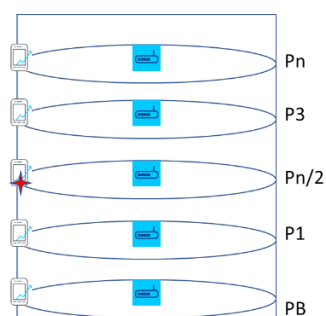


Figura 4.13: Análisis de edificios con punto de observación en la mitad del edificio.

De igual manera se obtienen los resultados mostrados en las Figuras 4.14 a 4.17:

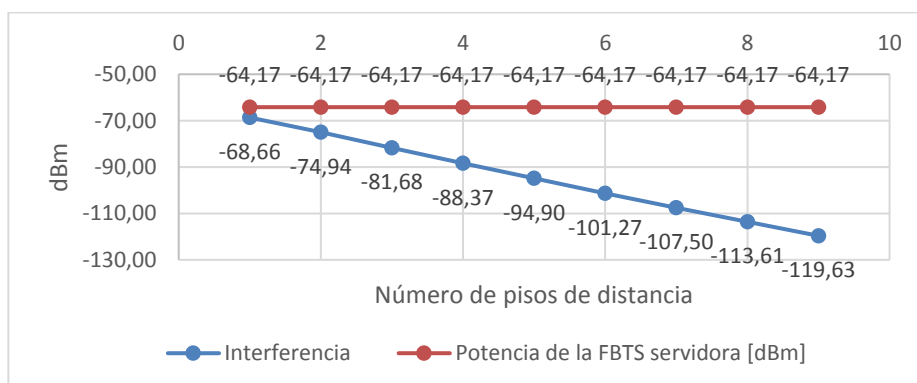


Figura 4.14: Interferencia Co-Tier Downlink Indoor en el mismo Edificio y punto de observación en la mitad del edificio.

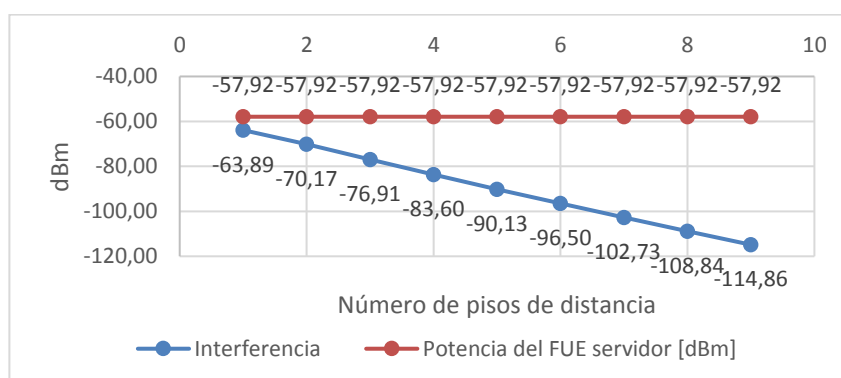


Figura 4.15: Interferencia Co-Tier Uplink Indoor en el mismo Edificio y punto de observación en la mitad del edificio.

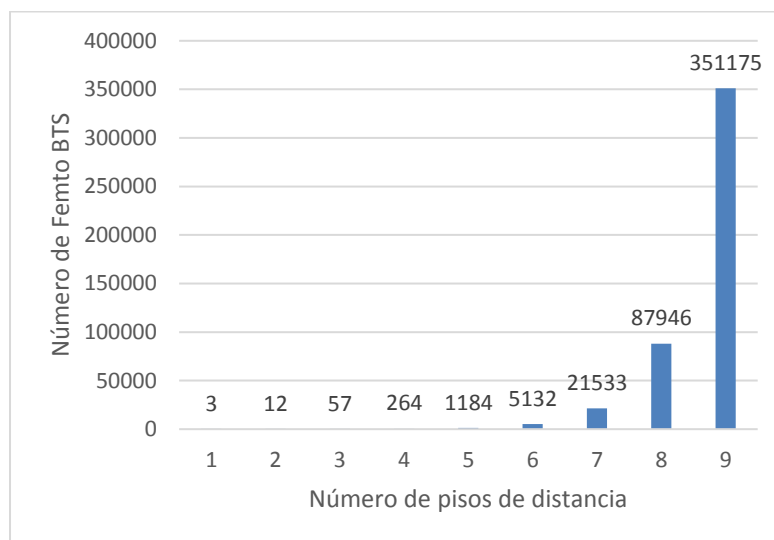


Figura 4.16: Cantidad de elementos para producir Interferencia Downlink Co-Tier y punto de observación en la mitad del edificio.

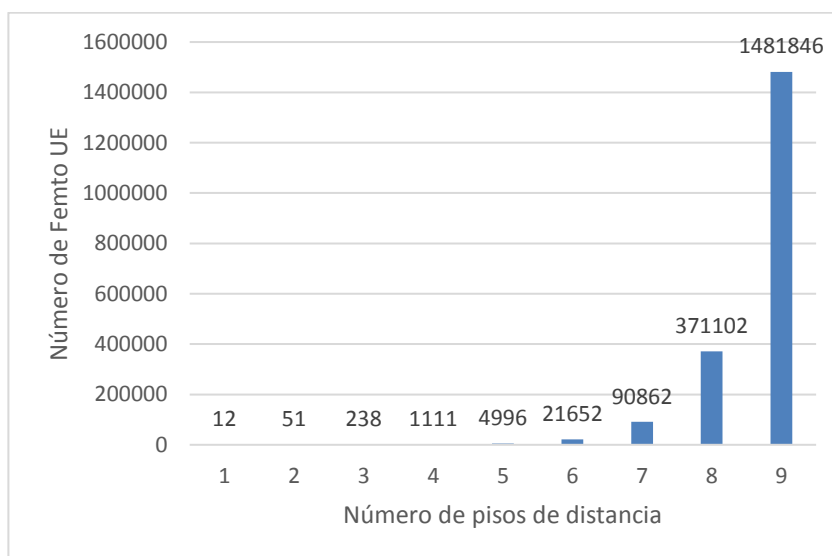


Figura 4.17: Cantidad de elementos para producir Interferencia Uplink Co-Tier y punto de observación en la mitad del edificio.

En ambos escenarios se llega a la conclusión de que se debería considerar únicamente los elementos hasta dos pisos de distancia, pues las cantidades requeridas para los demás pisos no son factibles de conseguir.

4.3 Cálculo de la interferencia Cross-Tier.

En la Tabla 12 se determinó que el máximo EIRP que puede transmitir una macrocelda es 51 dBm y el RSSR requerido en DL es de -106 dBm. Para limitar la cobertura a un radio de 1 kilómetro se usa el modelo de propagación de la ecuación 4.19 para obtener la Tabla 29. En ella se observa que se debería irradiar a 22,6 dBm, el cual es un valor válido.

d [m]	Pérdida de Trayectoria DL [dB]	Max EIRP MBTS [dBm]	Max Rx Power = Max MBTS EIRP - Pérdida de Trayectoria [dBm]	RSSR [dBm]	Min Tx Power para llegar RSSR = RSSR + Pérdida de Trayectoria
1000	128,6	51,0	-77,6	-106,0	22,6

Tabla 29: Potencia DL para una macro BTS.

En la Tabla 15 se determinó que el máximo EIRP que puede transmitir un UE es 23 dBm, el mínimo EIRP -40 dBm y el RSSR requerido en UL hacia la macro BTS es -104,9 dBm. Se analiza el escenario en el caso extremo: cuando el UE está al borde de la cobertura de la macro BTS: a 1 Km; y haciendo uso de la ecuación 4.20 se obtiene la Tabla 30:

d [m]	Pérdida de Trayectoria UL [dB]	Max EIRP MUE [dBm]	Max Rx Power [dB] = Max MUE EIRP - Pérdida de Trayectoria	RSSR	Min Tx Power para llegar RSSR = RSSR + Pérdida de Trayectoria
1000	126,7	23,0	-103,7	-104,9	21,8

Tabla 30: Potencia UL para un macro UE.

En la Tabla 31 se recopilan las potencias de transmisión de los macro elementos y los niveles de potencia esperados en los receptores:

MBTS Tx EIRP	22,61	dBm
MUE Tx EIRP	21,81	dBm

Tabla 31: Niveles de Potencia para los macro elementos.

En la Figura 4.18 se muestra la interacción entre los macro y femto elementos, la generación de interferencia Cross-Tier en Downlink y Uplink. La línea verde representa el enlace de la señal que provee el servicio de acceso en DL o UL, mientras que la línea discontinua roja representa la interferencia cross-tier.

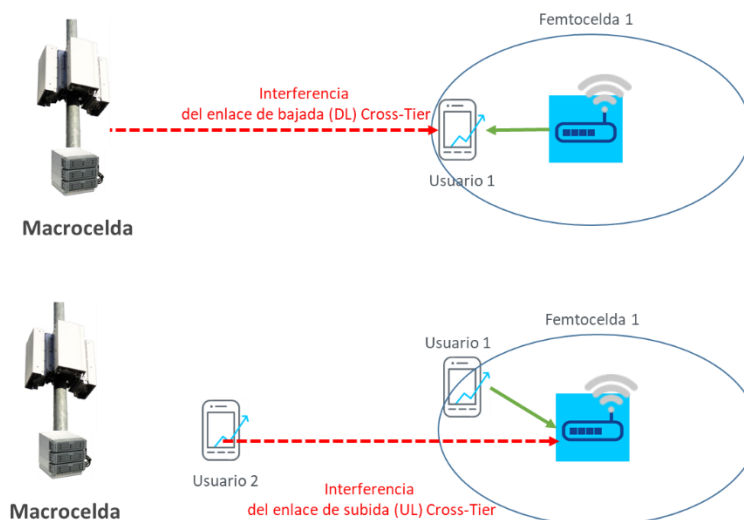


Figura 4.18: Interferencia Cross-Tier.

Empleando los modelos de las ecuaciones 4.21 y 4.22, considerando una pérdida de pared del edificio de 10 dB; se obtiene las Figuras 4.19 y 4.20 con la interferencia cross-tier:

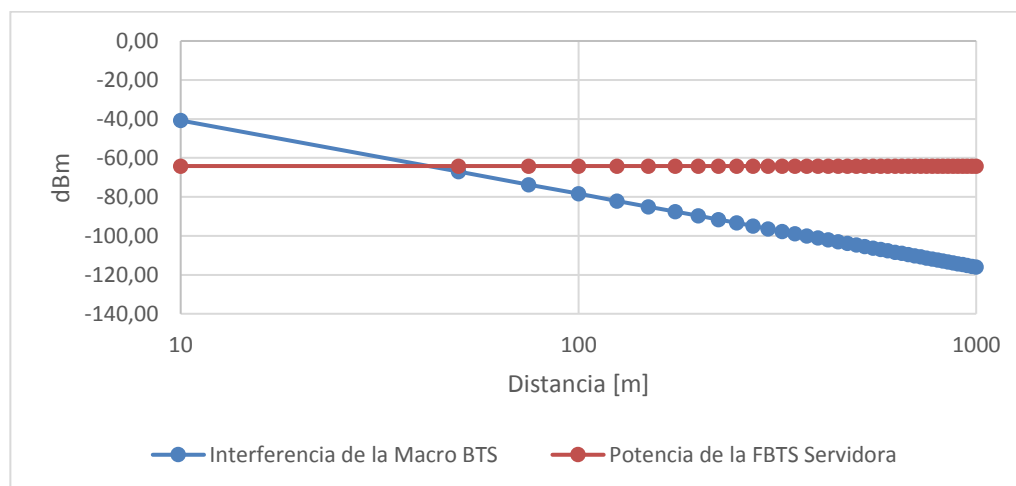


Figura 4.19: Interferencia Downlink Cross-Tier.

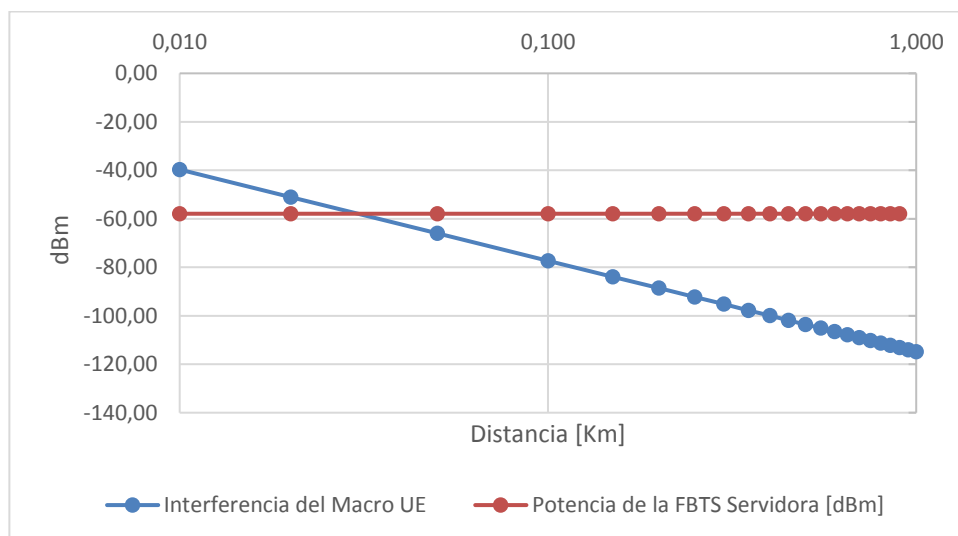


Figura 4.20: Interferencia Downlink Cross-Tier

La presencia de la macrocelda genera una zona donde la utilidad de una femtocelda sería en vano, debido a que la potencia de la macrocelda es mayor. El tamaño de la zona dependerá de las pérdidas de penetración de los edificios, este análisis se llevará a cabo en la sección 4.5.

4.4 Análisis e impacto de materiales de edificios en el cálculo de la interferencia Co-Tier.

En los modelos de propagación para interiores definidos en las ecuaciones 4.23 y 4.24, se definió un factor que representaba las pérdidas de propagación debido a la penetración del edificio, en esta sección se revisará el impacto de los materiales en la propagación de la señal y en la intensidad de la interferencia.

4.4.1 Edificaciones a un solo nivel.

En el escenario de dos femtoceldas a un mismo nivel de cota, se establecen las siguientes condiciones:

- Las femtoceldas están dentro de apartamentos, no hay femtoceldas en exteriores irradiando.
- Los femtousuarios están dentro de su respectivo departamento.

Estas premisas permiten reducir el factor $\sum L_{OW}$ a la suma de las pérdidas de dos paredes: $L_{OW1} + L_{OW2}$, tal como se muestra en la Figura 4.21

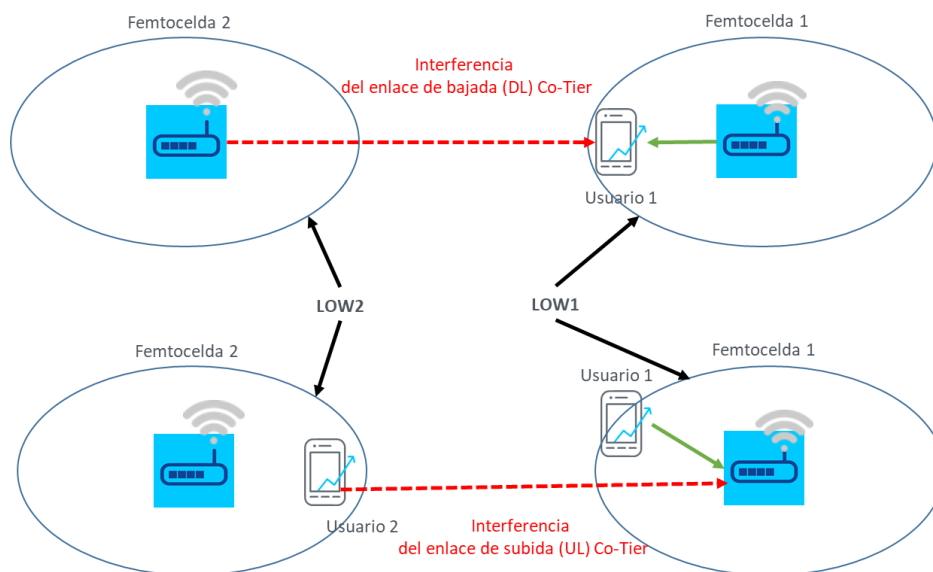


Figura 4.21: Interferencia Co-Tier y pérdidas por paredes al mismo nivel de cota.

Las combinaciones posibles de materiales mostrados en la Tabla 23 harían complicado el análisis, el enfoque que se dará es revisar la variación de la suma de ambas pérdidas. Se establecen los siguientes valores de análisis:

- 20 dB, caso extremo superior cuando ambas paredes son de ladrillo [22].
- 15 dB.
- 10 dB.
- 8 dB.
- 6 dB.
- 4 dB.
- 2 dB, caso extremo inferior, cuando ambas paredes son de vidrio delgado [22].

Se harán las variaciones para obtener el número de elementos necesarios para generar interferencia a diferentes distancias. Los resultados completos para el modelo 1 de la ecuación 4.23 se incluyen en el Anexo A, mientras que en la Tabla 32 se muestran las cantidades de femtoceldas necesarias para producir interferencia a 12 metros:

Pérdidas de paredes [dB]	Distancia [m]	Número de Femto BTS	Número de Femto UE
20	12	400	460
15	12	127	146
10	12	40	46
8	12	26	29
6	12	16	19
4	12	11	12
2	12	7	8

Tabla 32: Cantidades de elementos necesarias para producir interferencia a 12 m con el modelo 1.

Se observa que hay valores que son factibles y otros que no lo son. Por ejemplo: tener 400 femto BTS a 12 m de distancia cuando las pérdidas de paredes son de 20 dB, no es factible; pero tener 7 femto BTS a 12 metros de distancia cuando las pérdidas de paredes son de 2 dB, sí es factible.

Este análisis nos permite deducir que, a cierta distancia no importa la presencia de femtoceldas o femtousuarios; pues se requiere una cantidad excesivamente grande para poder generar un nivel de interferencia que genere inconvenientes. Se establecen los umbrales definidos en la Tabla 33:

Pérdidas en Paredes [dB]	Distancia [km]	Cantidad de FBTS para generar interferencia Downlink	Densidad de FBTS/Km2	Cantidad de FUE para generar interferencia Uplink	Densidad de FUE/Km2
20	0,012	400	884194	460	1016823
15	0,012	127	280732	146	322731
10	0,024	235	129866	212	117156
8	0,024	148	81788	134	74051
6	0,03	216	76394	149	52698
4	0,03	137	48454	94	33246
2	0,036	171	41999	118	28982

Tabla 33: Umbrales de distancia en el modelo 1.

Las densidades de femtousuarios requeridos para la generación de interferencia son superiores a los 419 Usuarios LTE/Km² que determinó

en la sección 3.2.2, lo que nos permite aseverar que los umbrales establecidos son apropiados para el escenario urbano de la ciudad de Guayaquil.

Los resultados para el modelo 2 de la ecuación 4.24 se muestran en el Anexo B, mientras que en la Tabla 34 se muestran las cantidades de femtoceldas necesarias para producir interferencia a 12 metros:

Pérdidas de paredes [dB]	Distancia [m]	Número de Femto BTS	Número de Femto UE
20	12	3205153	2069421
15	12	1013559	654409
10	12	320516	206943
8	12	202232	130572
6	12	127600	82386
4	12	80510	51928
2	12	50799	32799

Tabla 34: Cantidades de elementos necesarias para producir interferencia a 12 m con el modelo 1.

Al igual que con el modelo 1, en el modelo 2 se observa que hay distancias donde la cantidad de elementos requeridos para la generación de interferencia no es factible. A diferencia del modelo 1 que los umbrales de distancia variaban a valores factibles, en el modelo 2 se puede decir que luego de 7 metros no importa la presencia de femtoceldas o femtousuarios.

4.4.2 Edificaciones con varios niveles.

En las Figuras 4.22 y 4.23 se muestran la interferencia entre departamentos de diferentes edificios.

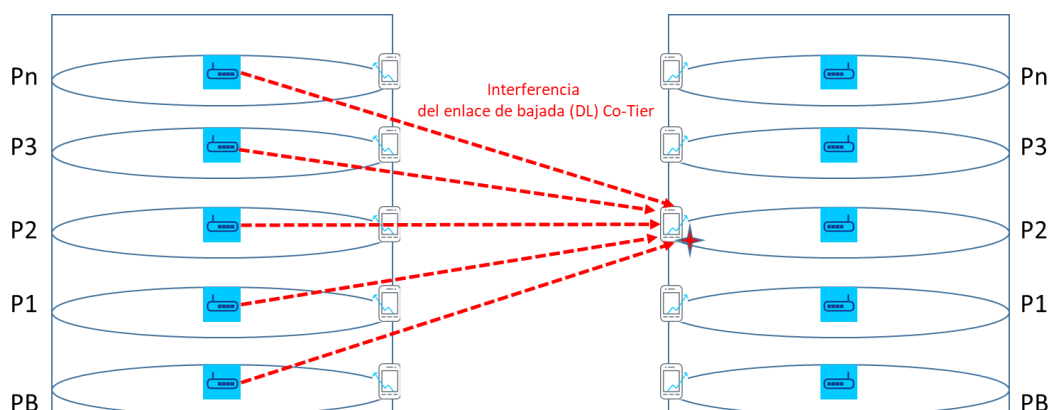


Figura 4.22: Interferencia Downlink entre edificios.

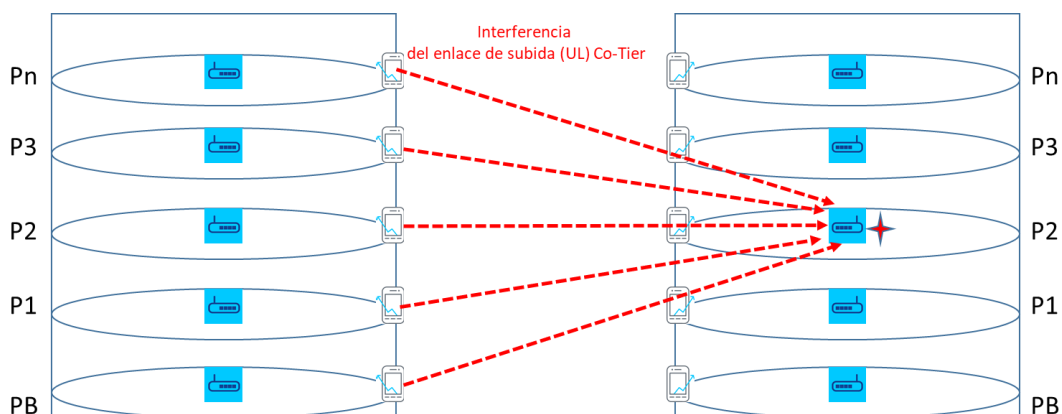


Figura 4.23: Interferencia Uplink entre edificios.

Las pérdidas de penetración de concreto son del rango de 15 a 30 dB, superior a la pérdida de una pared de ladrillos de 10 dB. Por lo que al analizar la interferencia entre edificios la señal interferente con menor pérdida es la que se propaga atravesando las paredes y no los pisos de los edificios. Esta consideración permite decidir que la propagación entre departamentos de diferentes edificios se estime como si se tratara de apartamentos al mismo nivel, teniendo en cuenta la distancia adecuada debido a la diferencia de altura.

4.5 Análisis e impacto de materiales de edificios en el cálculo de la interferencia Cross-Tier.

Al igual que en el escenario co-tier, en el de interferencia cross-tier se especifican las siguientes condiciones:

- Las femtoceldas están dentro de apartamentos, no hay femtoceldas en exteriores irradiando.
- Los femtousuarios están dentro de su respectivo departamento.

Estas premisas permiten reducir el factor $\sum L_{OW}$ a la pérdida de una sola pared: L_{OW1} , tal como se muestra en la Figura 4.24:

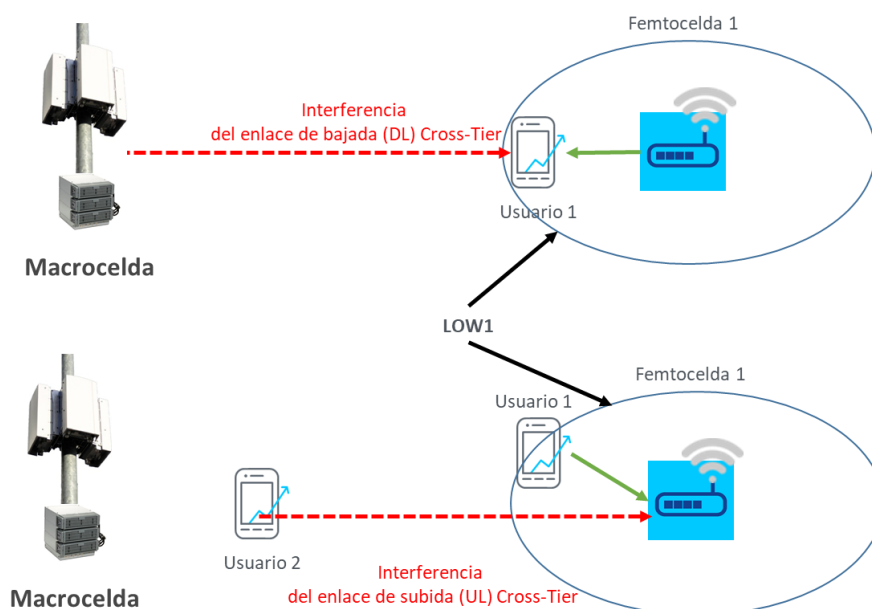


Figura 4.24: Interferencia Cross-Tier y pérdidas por paredes.

Se harán variaciones del material para determinar las zonas en las cuales las femtoceldas no podrían funcionar, debido a que la potencia de la macrocelda lo impediría. En la Figura 4.25 se observa la relación entre la pérdida de penetración y la distancia donde no funcionarían las femtoceldas.

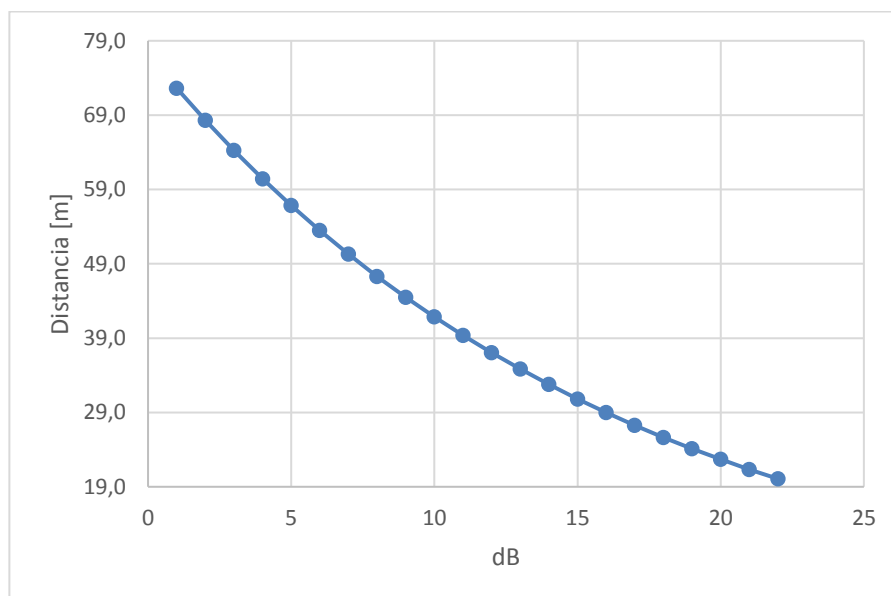


Figura 4.25: Distancia de interferencia Cross-Tier Downlink de acuerdo a las pérdidas de pared del edificio.

Con una pérdida de penetración de pared de 2 dB (pared de vidrio delgado), una femtocelda debería estar a una distancia mayor a 73 m para poder funcionar efectivamente. Mientras que para una pared de ladrillos (pérdida de 10 dB), a partir de 42 metros los femto elementos funcionan adecuadamente. En estas condiciones se puede establecer que las femtoceldas deben ubicarse a distancias superiores a los 73 metros para poder operar adecuadamente.

En el análisis de la interferencia cross-tier uplink, debemos identificar cuantos macrousuarios y a qué distancia son suficientes para producir un nivel de interferencia, en las Figuras 4.26 y 4.27:

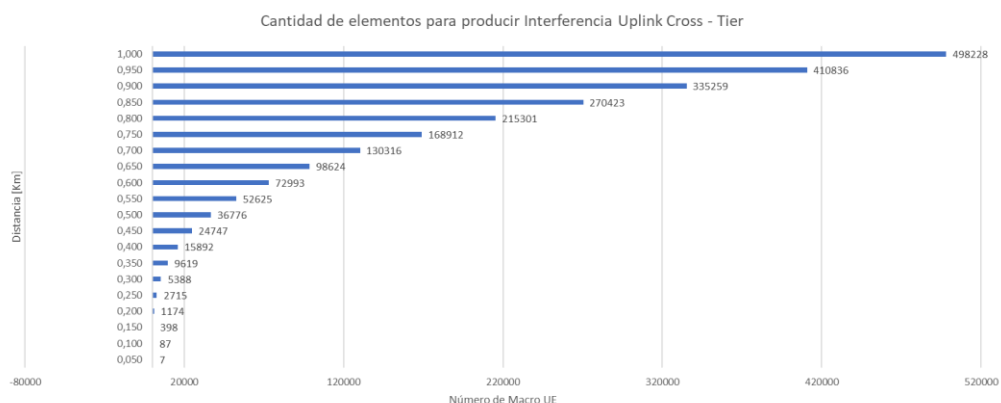


Figura 4.26: Cantidad de elementos para generar interferencia Cross-Tier Uplink con pérdida de pared de 10 dB.

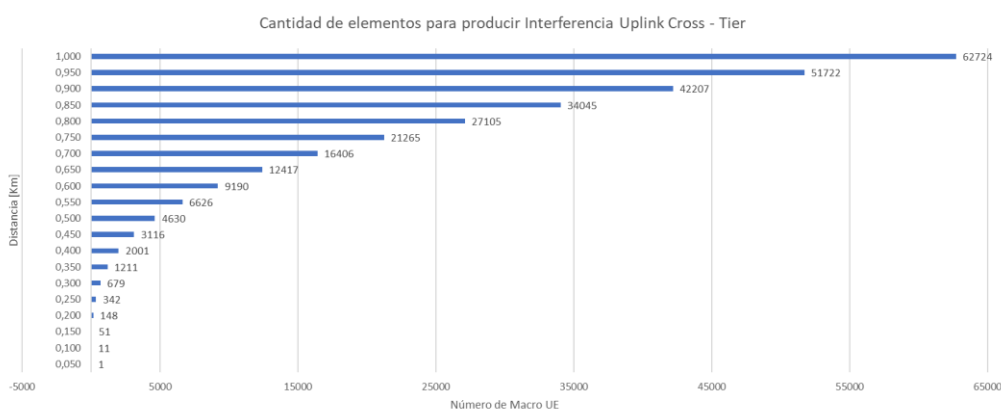


Figura 4.27: Cantidad de elementos para generar interferencia Cross-Tier Uplink con pérdida de pared de 1 dB.

No se puede identificar o determinar un umbral para descartar elementos a cierta distancia en la interferencia cross-tier.

4.6 Métodos abreviados para la estimación de interferencia Co-Tier.

En los análisis realizados en la sección 4.4 se concluyó que a partir de ciertas distancias la presencia de elementos no es relevante para la generación de interferencia. En esta sección vamos a proponer tres métodos que nos permitan estimar la interferencia de manera efectiva, sin tener que considerar la totalidad de elementos presentes.

La interferencia co-tier para los dos modelos de propagación en interiores se describe en las siguientes ecuaciones:

Cálculo de interferencia usando el modelo 1 de propagación para interiores:

$$I_{CO_{UL}} = \begin{cases} FUE Tx EIRP - \max(36.6 + 22 \log_{10} d; 13.9 + 37.6 \log_{10} d) - 0.7d - L_{ow1} - L_{ow2}, & 1 < d \leq 6 \\ FUE Tx EIRP - \max(36.6 + 22 \log_{10} d; 13.9 + 37.6 \log_{10} d) - 4.2 - L_{ow1} - L_{ow2}, & d > 6 \end{cases} \quad (4.27)$$

$$I_{CO_{DL}} = \begin{cases} FBTS Tx EIRP - \max(38.44 + 20 \log_{10} d; 15.8 + 37.6 \log_{10} d) - 0.7d - L_{ow1} - L_{ow2}, & 1 < d \leq 6 \\ FBTS Tx EIRP - \max(38.44 + 20 \log_{10} d; 15.8 + 37.6 \log_{10} d) - 4.2 - L_{ow1} - L_{ow2}, & d > 6 \end{cases} \quad (4.28)$$

Cálculo de interferencia usando el modelo 2 de propagación para interiores:

$$I_{CO_{UL}} = \begin{cases} FUE Tx EIRP - 36.6 - 22 \log_{10} d - 0.7d - L_{ow1} - L_{ow2}, & 1 < d \leq 6 \\ FUE Tx EIRP - 36.6 - 22 \log_{10} d - 13.9 - 37.6 \log_{10}(d - 6) - 4.2 - L_{ow1} - L_{ow2}, & d > 6 \end{cases} \quad (4.29)$$

$$I_{CO_{DL}} = \begin{cases} FBTS Tx EIRP - 38.44 - 20 \log_{10} d - 0.7d - L_{ow1} - L_{ow2}, & 1 < d \leq 6 \\ FBTS Tx EIRP - 38.44 - 20 - 15.8 - 37.6 \log_{10}(d - 6) - 4.2 - L_{ow1} - L_{ow2}, & d > 6 \end{cases} \quad (4.30)$$

Donde:

- FUE Tx EIRP: la potencia isotrópica que irradia el femto UE.
- FBTS Tx EIRP: la potencia isotrópica que irradia la femto BTS
- d: distancia entre el emisor y el receptor en metros, debe ser mayor a 1 metro.
- Low1: pérdidas de penetración de la pared del primer edificio.
- Low2: pérdidas de penetración de la pared del segundo edificio.

Los tres métodos de estimación que se describirán a continuación se basan el uso de un umbral de distancia. El umbral de distancia se define en la Tabla 35 para el método de estimación 1; mientras que para el método de estimación 2 se

establece en 7 metros. Los elementos más allá del umbral de distancia irradian se consideran como si irradian al mismo nivel del piso de interferencia.

Pérdidas en Paredes [dB]	Umbral de distancia [m]
20	12
15	12
10	24
8	24
6	30
4	30
2	36

Tabla 35: Umbral de distancia a considerar para el modelo de propagación en interiores 1.

4.6.1 Estimación basada en umbral de distancia para las femtoceldas o femtousuarios.

La estimación consiste en tomar en cuenta los elementos que se encuentren dentro de una distancia de umbral, lo que esté más allá del umbral no se considera. La selección del umbral para el escenario de edificaciones a un mismo nivel de cota se mostró al inicio de la sección 4.6. Mientras que para apartamentos dentro de un mismo edificio se indicó en la sección 4.2.2.

4.6.2 Aproximación basada en distancia promedio de las femtoceldas o femtousuarios vecinos.

La estimación consiste en:

- Considerar los elementos dentro del umbral de distancia.
- Calcular la distancia promedio a la que se ubican los elementos.
- Calcular la interferencia a la distancia promedio.
- Multiplicar la interferencia a la distancia promedio por la cantidad de elementos dentro del umbral.

4.6.3 Ponderación de la femtocelda o femtousuario más cercano.

La estimación consiste en:

- Considerar solo a los elementos dentro del umbral de distancia.
- Identificar el elemento más cercano y calcular la interferencia, si hay varios elementos cercanos a la misma distancia, multiplicar la interferencia por la cantidad de elementos cercanos.
- Calcular la distancia promedio para el resto de elementos dentro del umbral de distancia.
- Estimar la interferencia a la distancia promedio, multiplicarla por la cantidad de elementos dentro del umbral sin considerar al elemento más cercano.
- Sumar la interferencia de los elementos a la distancia mínima más la estimación del resto de elementos a la distancia promedio.

4.7 Simulación y análisis de resultados.

Las simulaciones que realizarán en la presente sección utilizarán los valores ya determinados en las secciones previas y que se resumen nuevamente en la Tabla 36:

MBTS Tx EIRP	22,61	dBm
FBTS Tx EIRP	-6	dBm
MUE Tx EIRP	21,81	dBm
FUE Tx EIRP	0	dBm
Señal servidora UL	-64,2	dBm
Señal servidora DL	-57,9	dBm

Tabla 36: Niveles de Potencia para la simulación

Los valores de la Tabla 36 están configurados para generar una cobertura de 1 Km de radio para la macro celda y 6 m de radio para las femtoceldas.

4.7.1 Bidimensional: departamentos distribuidos en un solo nivel de cota.

Se define el umbral de distancia para el análisis a 12 metros. La femtocelda en donde se estimará la interferencia, tiene en su cercanía a los elementos de la capa femto definidos en la Tabla 37.

Femto		
	Distancia [m]	No. de FUE
FBTS1	4	2
FBTS2	4,5	3
FBTS3	6	1
FBTS4	7	2
FBTS5	8	2
FBTS6	10	3
FBTS7	6,6	1
FBTS8	7,8	1
FBTS9	20	2
FBTS10	30	2

Tabla 37: Distribución de los elementos en la capa Femto.

En la Tabla 38 se muestra la distribución de los macro elementos, es decir la distancia a la que se encuentran los macrousuarios y la macro BTS

Macro	
	Distancia [m]
MUE1	4
MUE2	10
MUE3	12
MUE4	20
MUE5	22
MUE6	30
MUE7	32
MUE8	39
MUE9	50
MUE10	200
MBTS	100

Tabla 38: Distribución de los elementos en la capa Macro.

Se itera el escenario original, donde se utilizan las distancias originales, pero se incrementa el número de elementos en factores de: 2, 3, 4, 5, 6 y 20. Es decir, que en lugar de tener una femto BTS a 4 m de distancia, se tendrán 2, luego 3 y así.

Los resultados de aplicar los métodos de estimación abreviados para determinar la interferencia Co/Tier se muestran en las Figuras 4.28 a 4.33, se usaron diferentes valores de pérdidas de penetración de edificios:

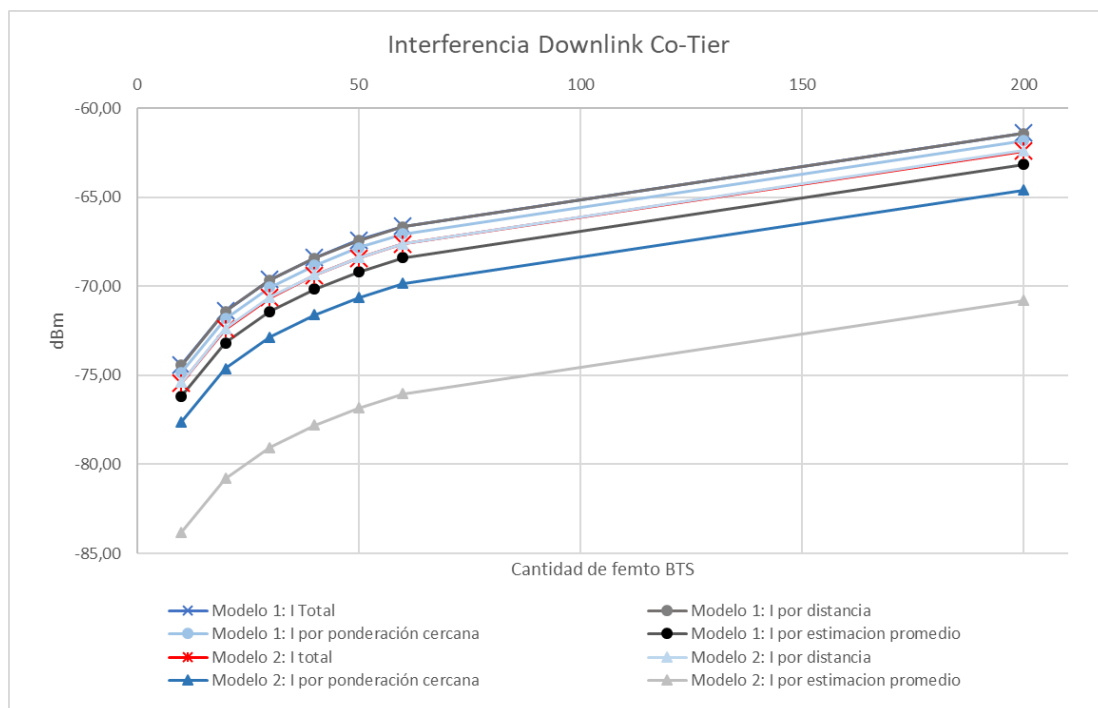


Figura 4.28: Comparación de las estimaciones abreviadas DL a 20 dB de pérdidas en paredes para el escenario de femtoceldas distribuidas al mismo nivel de cota.

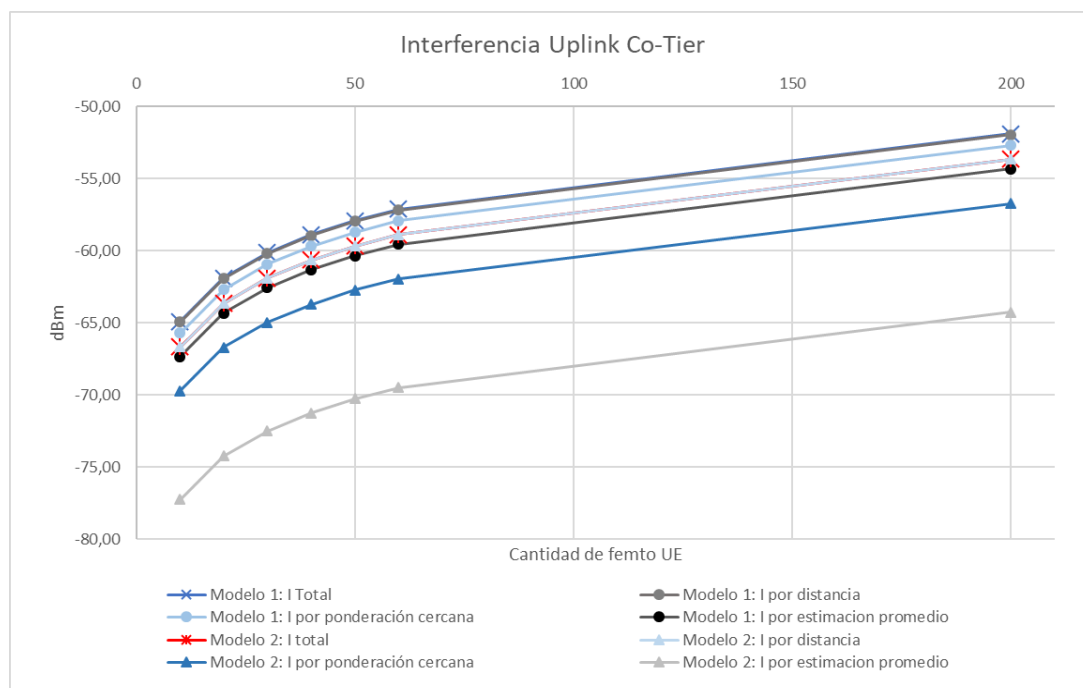


Figura 4.29: Comparación de las estimaciones abreviadas UL a 20 dB de pérdidas en paredes para el escenarios de femtoceldas distribuidas al mismo nivel de cota.

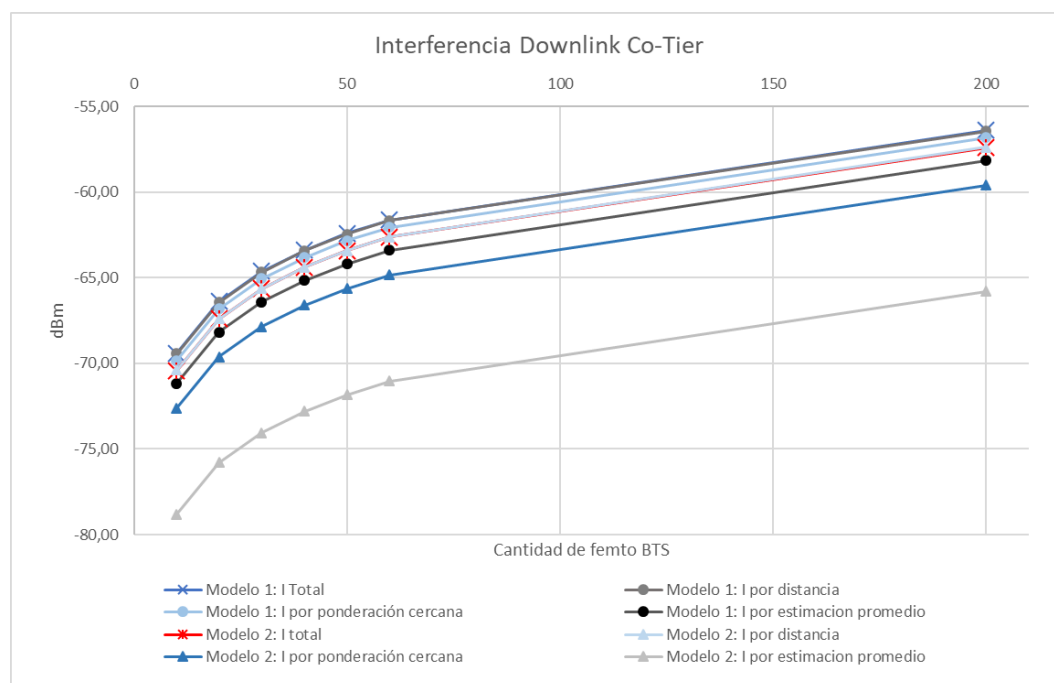


Figura 4.30: Comparación de las estimaciones abreviadas DL a 15 dB de pérdidas en paredes para el escenario de femtoceldas distribuidas a un mismo nivel de cota.

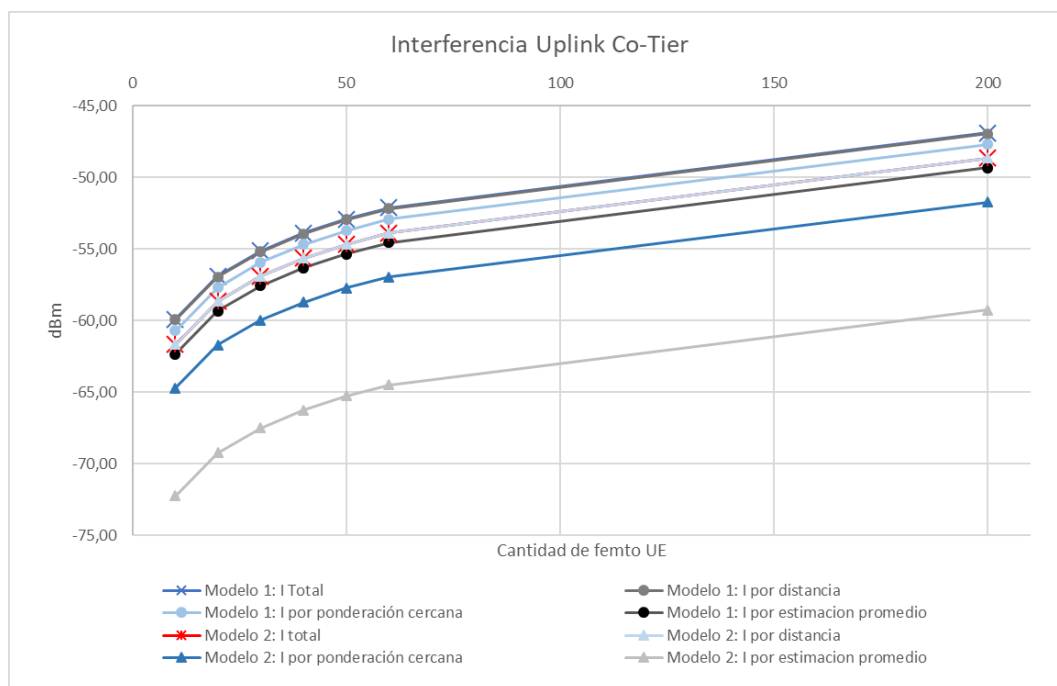


Figura 4.31: Comparación de las estimaciones abreviadas UL a 15 dB de pérdidas para el escenario de femtoceldas distribuidas a un mismo nivel de cota.

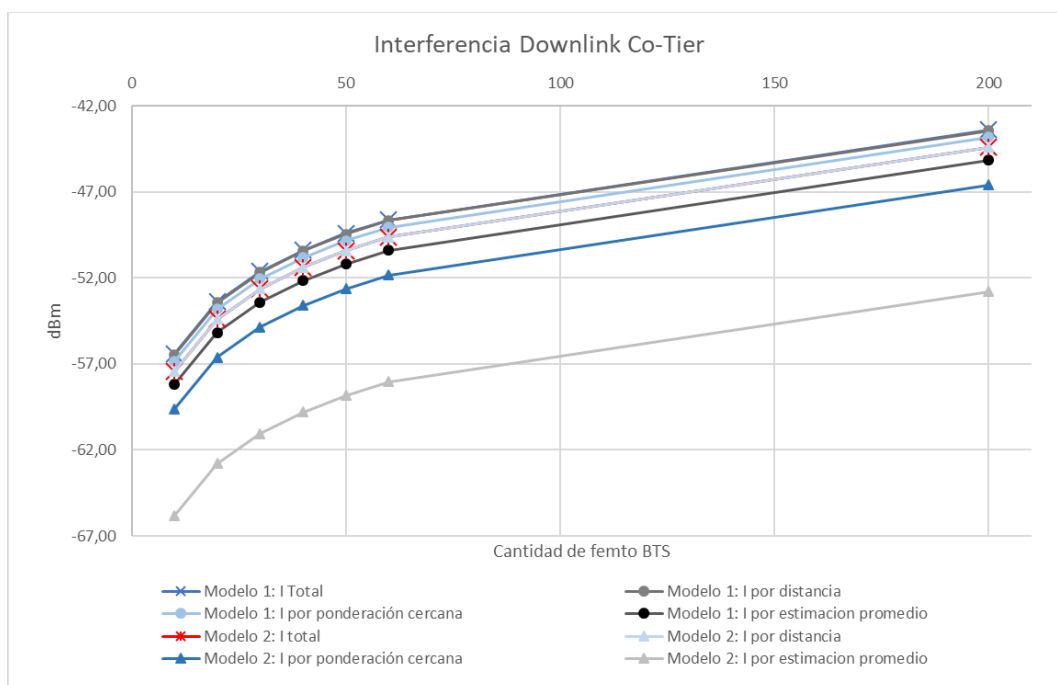


Figura 4.32: Comparación de las estimaciones abreviadas DL a 2 dB de pérdidas en paredes para escenario de femtoceldas distribuidas a un mismo nivel de cota.

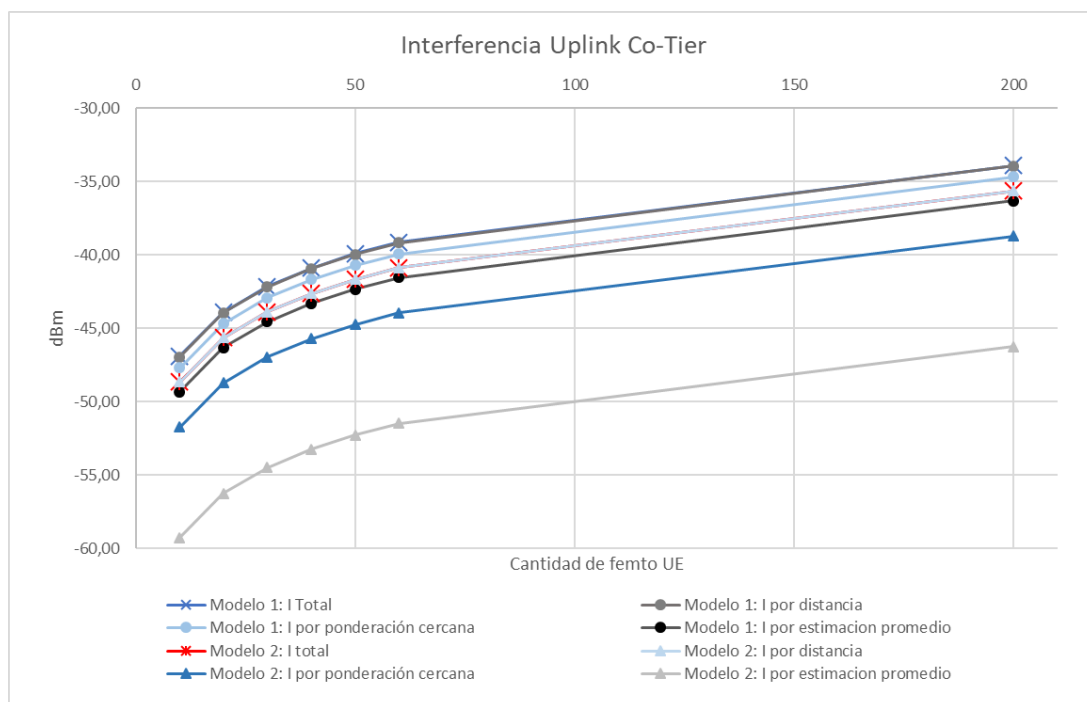


Figura 4.33: Comparación de las estimaciones abreviadas UL a 2 dB de pérdidas en paredes para escenario de femtoceldas distribuidas a un mismo nivel de cota.

En las Figuras 4.28 a 4.33 no se observa la interferencia que considera a todos los elementos presentes en el escenario, I total e I por distancia son muy cercanos que se traslapan.

Las gráficas nos permiten concluir que en una distribución de elementos tan cercanos como en el escenario, la estimación abreviada por distancia y la estimación por ponderación del elemento más cercano son las más apropiadas. Mientras que la estimación a la distancia promedio tiene un desempeño menor.

Para el análisis Cross-Tier no se establecieron métodos abreviados, por lo que el cálculo se realiza a través de las ecuaciones 4.21 y 4.22.

Los resultados de variar las pérdidas de penetración de los edificios se muestran en las Figuras 4.34 y 4.35:

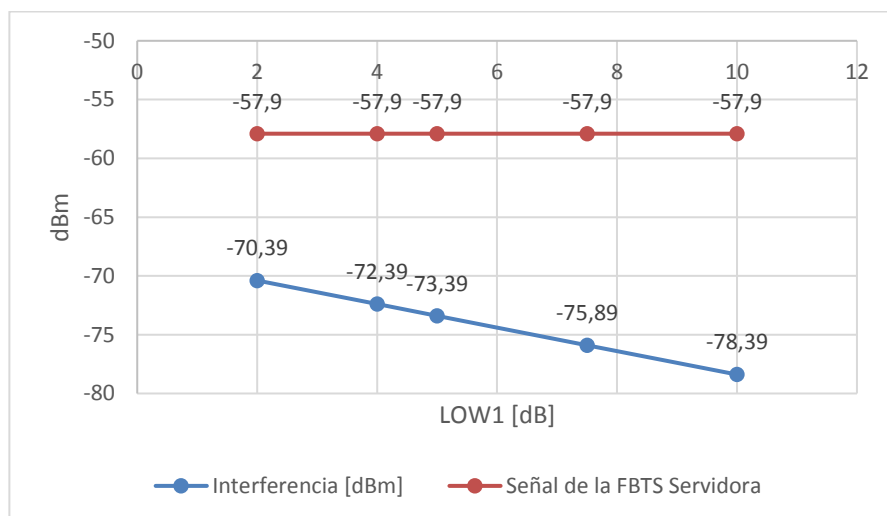


Figura 4.34: Interferencia Cross-Tier Downlink con diferentes valores de pérdidas de penetración.

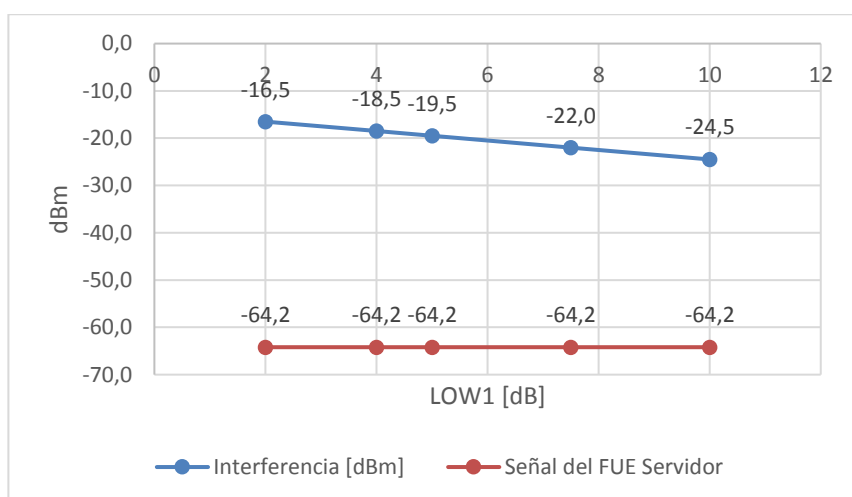


Figura 4.35: Interferencia Cross-Tier Uplink con diferentes valores de pérdidas de penetración.

En el resultado de la interferencia Cross-Tier DL, la señal de la FBTS es más fuerte que la señal de la macro BTS; cumpliéndose el criterio de que la FBTS debe estar a una distancia superior a 72 metros para poder operar. Para la parte Cross-Tier UL, la interferencia se debe a la presencia de macrouusuarios muy próximos.

4.7.2 Tridimensional: edificio con varios departamentos.

En este escenario se tiene las siguientes asunciones:

La altura de los pisos de los edificios es uniforme, y la femtocelda en donde se realizará la estimación se encuentra dentro de un edificio. En la Tabla 39 se definen dichos valores para el escenario de simulación.

Piso en el que se ubica dentro del edificio	3
Altura de cada piso [m]	3

Tabla 39: Definición de la femtocelda de observación

En el mismo edificio donde se encuentra la femtocelda a medir la interferencia se encuentra la distribución de elementos descrita en la Tabla 40:

Pisos de diferencia	No. de FUE
2	3
3	2
1	4
4	2
1	3

Tabla 40: Distribución de elementos dentro del mismo edificio.

En la cercanía se encuentra otro edificio con la distribución de elementos descrita en la Tabla 41:

Pisos de diferencia	Distancia [m]	No. de FUE
2	5	3
3	5	2
4	5	4
1	5	3

Tabla 41: Distribución de elementos en edificio vecino

La estimación de la interferencia se hace en dos partes: con los elementos que pertenecen al mismo edificio y con los elementos fuera del edificio.

Análisis dentro del mismo edificio: se itera el escenario original, donde se utilizan las distancias originales, pero se incrementa el número de

elementos en factores de: 2, 3, 4, 5, 6 y 20. Es decir, que en lugar de tener una femto BTS a 1 piso de distancia, se tendrán 2, luego 3 y así.

Se obtienen los resultados mostrados en las Figuras 4.36 y 4.37:

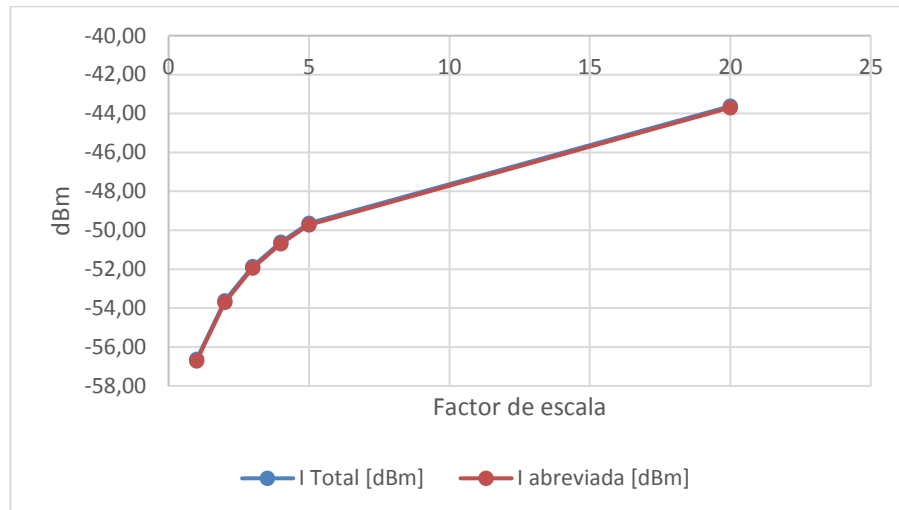


Figura 4.36: Interferencia Co-Tier DL dentro de un mismo edificio.

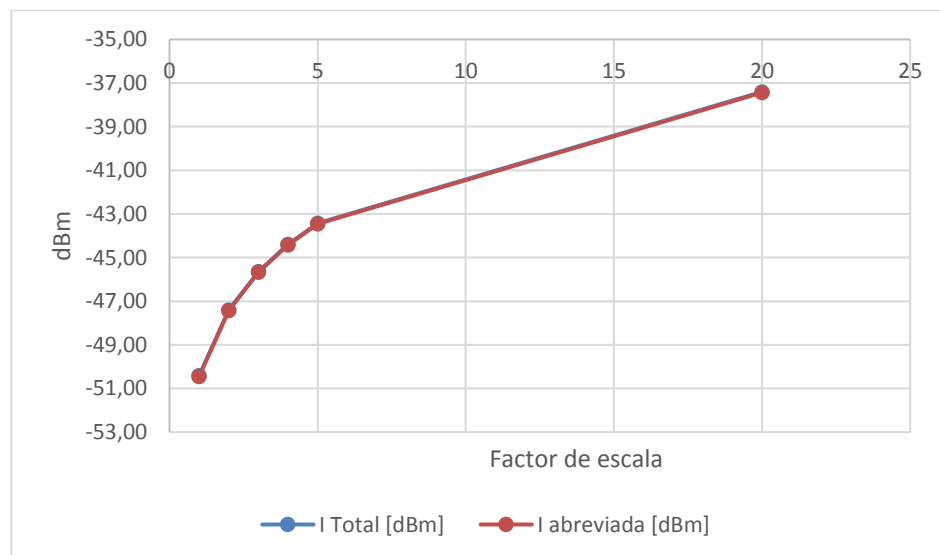


Figura 4.37: Interferencia Co-Tier UL dentro de un mismo edificio.

Como se puede observar a través de las Figuras 4.36 y 4.37, la estimación abreviada de la interferencia en interiores de edificios considerando solo

los elementos a 2 pisos de separación tiene poca diferencia con la estimación considerando todos los elementos.

El análisis de la presencia del segundo edificio usa la misma metodología de femtoceldas a un mismo nivel de cota. Lo que se debe hacer previamente es sacar la distancia real de separación, tal como se muestra en la Tabla 42:

Elemento	Pisos de distancia	Distancia del Edificio [m]	NoFUE	Distancia real de separación [m]
FBTS6	2	5	3	6,4
FBTS7	3	5	2	9,3
FBTS8	4	5	4	12,2
FBTS9	1	5	2	3,7

Tabla 42: Distribución de elementos y sus distancias considerando la altura de los edificios.

El resto del proceso de estimación de la interferencia es similar al análisis bidimensional de la sección anterior tanto para los elementos en otros edificios como para los elementos de la capa macro.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El objetivo principal del trabajo es determinar una fórmula abreviada que permita la estimación de la interferencia cross-tier y co-tier, los resultados obtenidos en las simulaciones nos permiten concluir que:

Es factible poder hacer estimaciones rápidas para la interferencia co-tier, debido a que a partir de cierta distancia la presencia de femtoceldas es irrelevante en el cálculo de la interferencia, pues se necesitaría una cantidad de elementos exorbitante que supera la realidad nacional de densidad de usuarios y radio bases LTE. Esto permitió poder plantear tres métodos abreviados de estimación:

1. Estimación basada en umbral de distancia para las femtoceldas o femtousuarios: para conocer la interferencia en un punto, solo se considera los elementos que se encuentran a una distancia definida y se calcula la interferencia de cada uno de los elementos.
2. Aproximación basada en distancia promedio de las femtoceldas o femtousuarios vecinos: al igual que el método anterior, solo se considera los elementos que se encuentran a una distancia definida. Se determina la distancia promedio a la que se encuentran los elementos; pero en lugar de calcular la interferencia producida por cada elemento, se determina la interferencia a la distancia promedio y se la escala por la cantidad de elementos presentes dentro del umbral.
3. Ponderación de la femtocelda o femtousuario más cercano: se establece un umbral de distancia, se determina el elemento más cercano y se estima la interferencia de ese elemento. De los elementos restantes, se determina la distancia promedio, se calcula la interferencia a esa distancia promedio y se escala por la cantidad de elementos. Se suman ambos resultados para obtener la estimación de interferencia.

La estimación abreviada por umbral de distancia presenta un mejor desempeño que la estimación abreviada por ponderación al más cercano en el cálculo de la interferencia co-tier. Esto se debe a que la ponderación al más cercano funciona

mejor cuando los elementos se encuentran distribuidos sobre el área de análisis y no concentrados alrededor de un punto. La estimación abreviada a la distancia promedio presenta resultados aceptables para el cálculo de la interferencia co-tier si los elementos interferentes se encuentran distribuidos en el área de análisis y no tan cercanos entre sí.

Se estableció 12 metros como umbral de distancia para el análisis de los escenarios propuestos, los resultados de las secciones 4.7.1 y 4.7.2 demuestran así que las fórmulas de estimación abreviada por umbral de distancia y ponderación al elemento más cercano presentan resultados aceptables en los casos analizados y que el umbral de distancia es adecuado.

Para el ambiente urbano de la ciudad de Guayaquil, no resulta efectivo colocar una femtocelda a una distancia menor a 73 metros de la macro radio base.

Se recomienda analizar la interferencia en el caso de femtoceldas móviles y adaptar los modelos de propagación para la banda 12 de 700 MHz asignada al operador Corporación Nacional de Telecomunicaciones E.P.

También se recomienda realizar mediciones en campo para corroborar y colocar factores de corrección de la estimación de interferencia cross-tier y co-tier.

Finalmente, los valores de pérdidas de materiales son valores genéricos tomados de referencias de otros estudios. Pero hay materiales de construcción locales (como la caña guadua, los techos de zinc, eternit, paredes de adobe) o incluso la constitución de materiales utilizados en la fabricación (el ladrillo, el bloque de piedra pómez, la constitución del concreto) dejan en duda si los valores de pérdida por los materiales son los adecuados para la realidad nacional. Por lo cual se sugiere realizar mediciones propias de las pérdidas de materiales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] V. Chandrasekhar, J. G. Andrews, and A. Gatherer, "Femtocell networks: a survey," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, no. 9, pp. 59–67, Sep. 2008.
- [2] C. Johnson, *Long Term Evolution IN BULLETS*, 2nd Edition, Second edition. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012.
- [3] F. Mhiri, K. Sethom, and R. Bouallegue, "A survey on interference management techniques in femtocell self-organizing networks," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 36, no. 1, pp. 58–65, Jan. 2013.
- [4] J. Gallardo and L. Alados, "Empirical Modeling of Femtocell Path Loss in a Femto-to-Macro Indoor-to-Outdoor Interference Scenario," University of Aalborg, Denmark, 2011.
- [5] P. Kumar, B. Patil, and S. Ram, "Selection of Radio Propagation Model for Long Term Evolution (LTE) Network," *Int. J. Eng. Res. Gen. Sci.*, vol. 3, no. 1, pp. 373–379, 2015.
- [6] N. Shabbir, M. T. Sadiq, H. Kashif, and R. Ullah, "Comparison of Radio Propagation Models for Long Term Evolution (LTE) Network," *ArXiv11101519 Cs Math*, Oct. 2011.
- [7] T. ETSI, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 36.104 version 14.3.0 release 14)," ETSI Online, Mar. 2017.
- [8] T. ETSI, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (3GPP TS 36.101 version 14.3.0 Release 14)," ETSI Online, Mar. 2017.
- [9] El Universo (2015, febrero 26). Con más espacios en las bandas para 4G [Online]. Disponible en: <http://www.eluniverso.com/noticias/2015/02/26/nota/4592656/mas-espacios-bandas-4g>.
- [10] Qualcomm. Technology | Small Cells | Qualcomm [Online]. Disponible en: <https://www.qualcomm.com/products/small-cells/technology>.

- [11] H. Holma and A. Toskala, Eds., LTE Advanced: 3GPP Solution for IMT-Advanced, 1 edition. Chichester, West Sussex, U.K. ; Hoboken, N.J: Wiley, 2012.
- [12] CONATEL (2010, febrero 19). Resolución 047-03-CONATEL-2010. Disponible en: http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/047_03_conatel_2010.pdf.
- [13] G. RAN, "Simulation assumptions and parameters for FDD HENB RF requirements," R4-092042.
- [14] M.I. Municipio de Guayaquil. Municipalidad de Guayaquil Mi Lote II [Online]. Disponible en: <http://guayaquil.gob.ec/mi-lote-ii>.
- [15] INEC (2010), Instituto Nacional de Estadística y Censos » Información Censal [Online]. Disponible en: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/informacion-censal-cantonal/>.
- [16] ARCOTEL (2017, mayo), Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones | Ecuador » Servicio Móvil Avanzado (SMA) [Online]. Disponible en: <http://www.arcotel.gob.ec/servicio-movil-avanzado-sma/>.
- [17] M.I. Municipio de Guayaquil. Datos Generales | Bienvenidos a Guayaquil. Sitio web oficial turístico de la ciudad [Online]. Disponible en: <http://www.guayaquilesmidestino.com/es/descubre-guayaquil/generalidades/datos-generales>.
- [18] CONATEL (2012, diciembre 12), Resolución TEL-804-29-CONATEL-2012 [Online]. Disponible en <http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/11/0804-TEL-29-CONATEL-2012.pdf>.
- [19] T. ETSI, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios (3GPP TR 36.942 version 13.0.0 Release 13)," European Telecommunications Standards Institute, Technical Report TR 136 942, Jan. 2016.
- [20] R. S. ITU, "Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz," Recomm. ITU-R, pp. 1238–8, Jul. 2015.

[21] Q. Europe, “HNB and HNB-Macro Propagation Models,” 3GPP R4–071617, Oct. 2007.

[22] Teletopix. Penetration loss in LTE | TELETOPIX.ORG [Online]. Disponible en: <http://www.teletopix.org/4g-lte/penetration-loss-in-lte/>.

[23] Y. Miura, Y. Oda, and T. Taga, “Outdoor-to-indoor propagation modelling with the identification of path passing through wall openings,” in *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2002. The 13th IEEE International Symposium on, 2002*, vol. 1, pp. 130–134.

ANEXOS

ANEXO A

Las figuras de este anexo se obtienen al aplicar las ecuaciones:

$$L = \max(38.44 + 20 \log d ; 15.8 + 37.6 \log d) + 0.7 r + \text{Low1} + \text{Low2} \text{ para Downlink.}$$

$$L = \max(36.6 + 22 \log d ; 13.9 + 37.6 \log d) + 0.7 r + \text{Low1} + \text{Low2} \text{ para Uplink.}$$

Donde:

d es la distancia al punto de observación.

r es el espacio recorrido al interior del departamento.

Low1 + Low2, representan las pérdidas de penetración en las paredes de los edificios o departamentos.

Dichos de las pérdidas de penetración de paredes se han variado de acuerdo a las opciones de la Tabla 23. De esta manera se obtienen las Figuras A.1 a A.7, las cuales muestran la cantidad de elementos necesarios para producir interferencia Co-Tier con diferentes valores de pérdida de paredes.

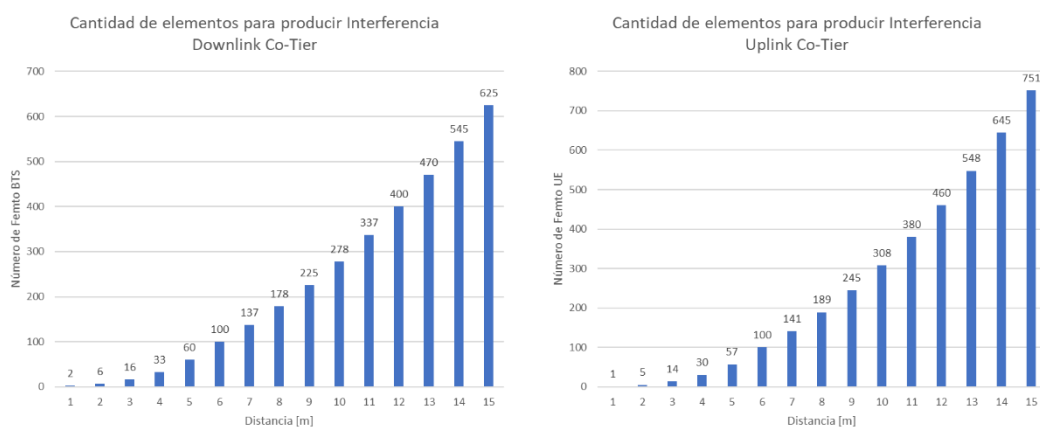


Figura A.1: Modelo 1 con pérdida de paredes de 20 dB.

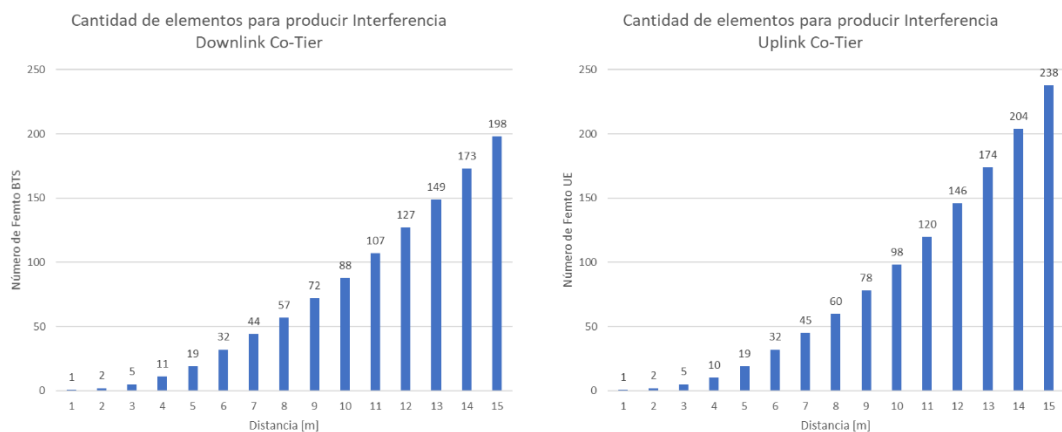


Figura A.2: Modelo 1 con pérdida de paredes de 15 dB.

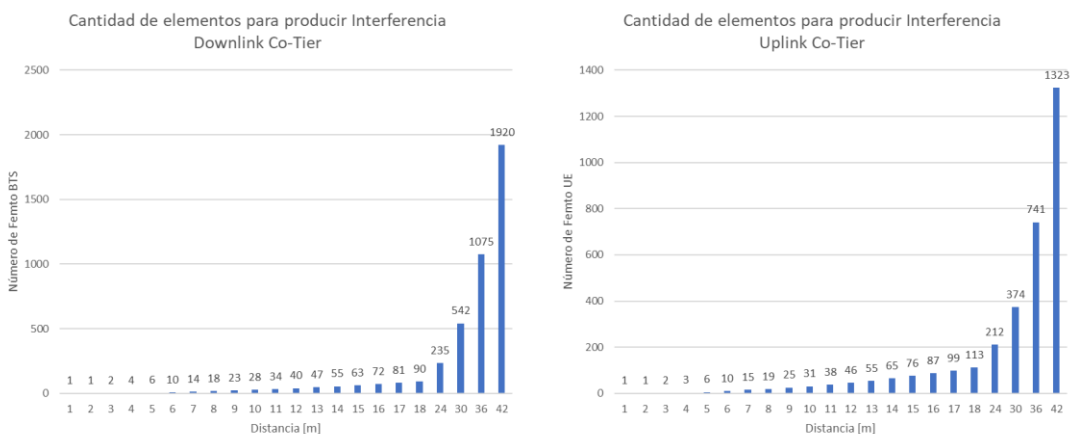


Figura A.3: Modelo 1 con pérdida de paredes de 10 dB.

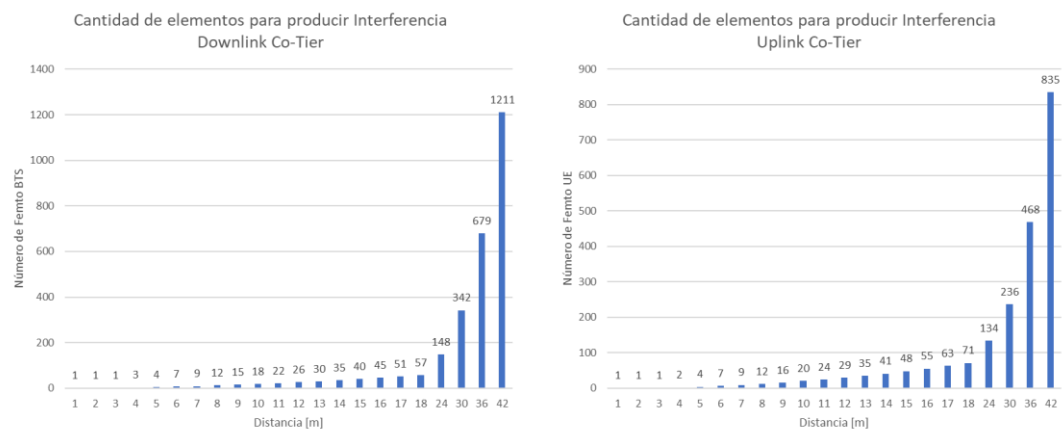


Figura A.4: Modelo 1 con pérdida de paredes de 8 dB.

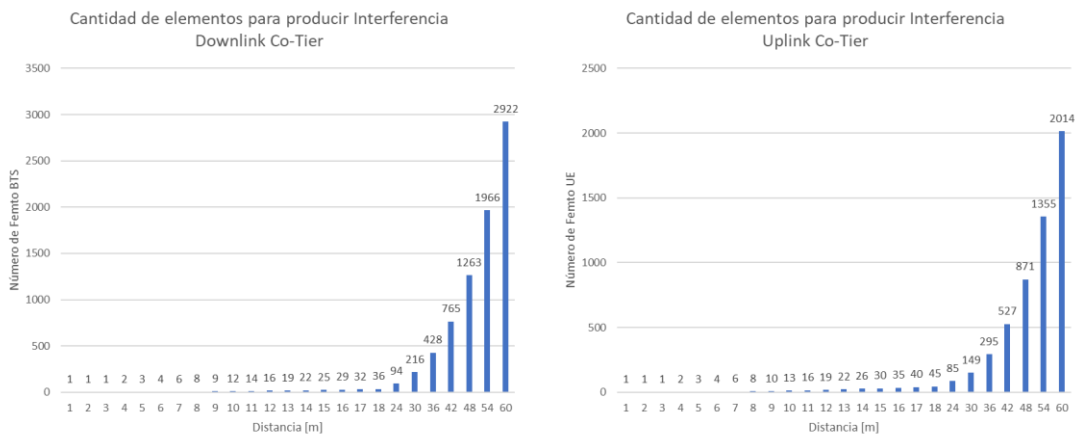


Figura A.5: Modelo 1 con pérdida de paredes de 6 dB.

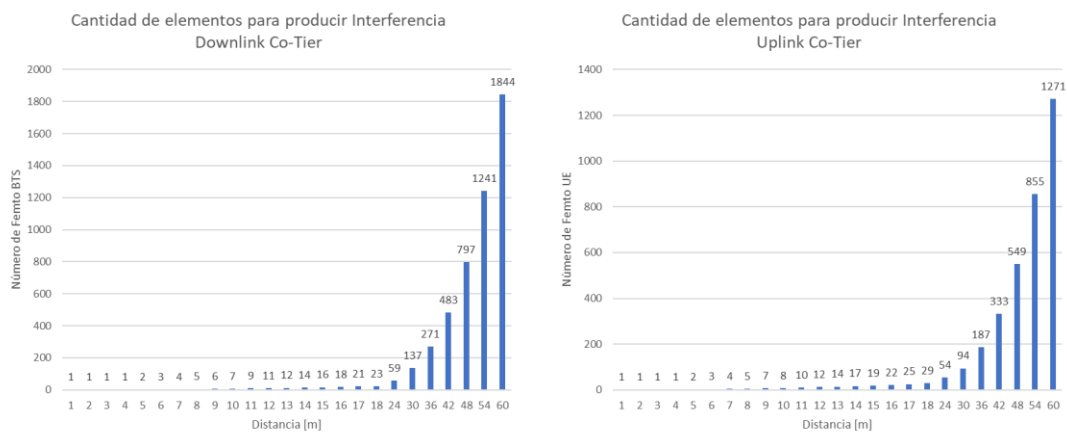


Figura A.6: Modelo 1 con pérdida de paredes de 4 dB.

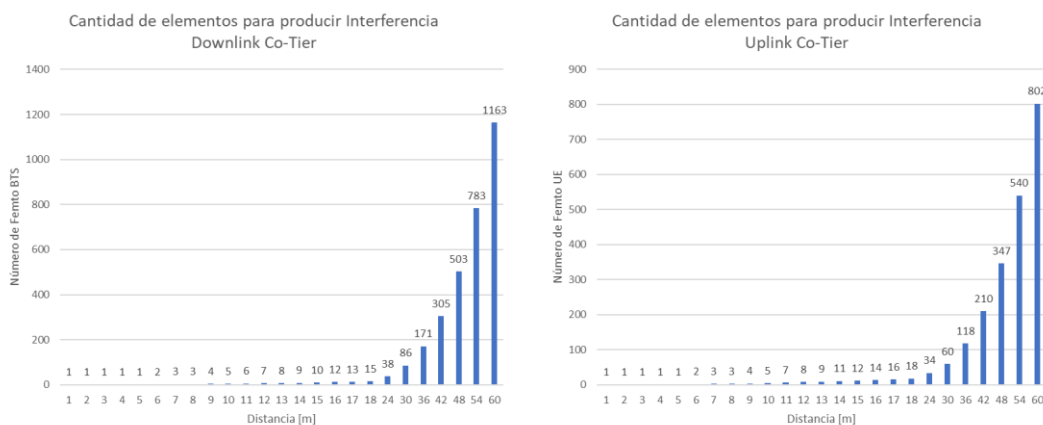


Figura A.7: Modelo 1 con pérdida de paredes de 2 dB.

ANEXO B

Las figuras de este anexo se obtienen al aplicar las ecuaciones:

Downlink:

$$L = 38,44 + 20 \log d + 0,7d + \text{Low1} + \text{Low2}, \text{ para } d \leq r.$$

$$L = 38,44 + 20 \log r + 15,8 + 37,6 \log (d-r) + 0,7r + \text{Low1} + \text{Low2}, \text{ para } d > r.$$

Uplink:

$$L = 36.6 + 22 \log d + 0.7 d + \text{Low1} + \text{Low2}, \text{ para } d \leq r.$$

$$L = 36.6 + 22 \log r + 13.9 + 37.6 \log (d-r) + 0.7 r + \text{Low1} + \text{Low2}, \text{ para } d > r.$$

Donde:

d es la distancia al punto de observación.

r es el espacio recorrido al interior del departamento.

Low1 + Low2, representan las pérdidas de penetración en las paredes de los edificios o departamentos. Dichos de las pérdidas de penetración de paredes se han variado de acuerdo a las opciones de la Tabla 23. De esta manera se obtienen las Figuras B.1 a B.7, las cuales muestran la cantidad de elementos necesarios para producir interferencia Co-Tier con diferentes valores de pérdida de paredes.

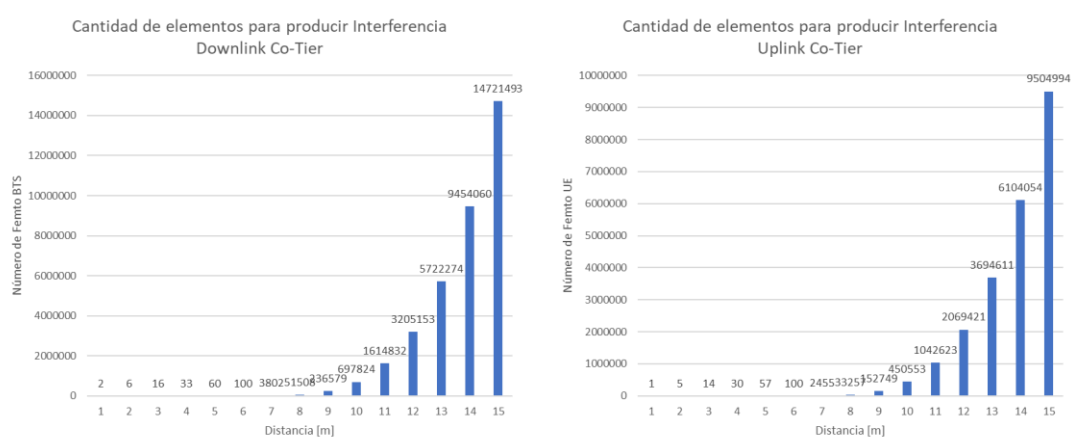


Figura B.1: Modelo 2 con pérdida de paredes de 20 dB.

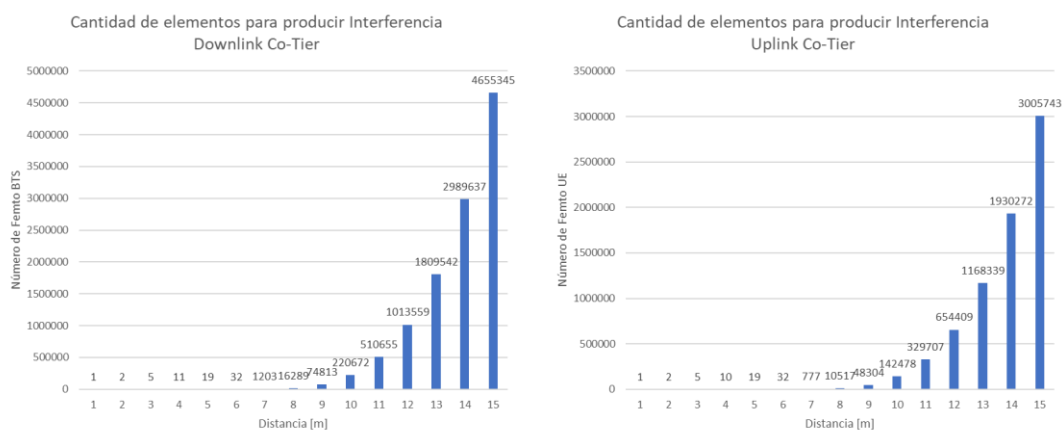


Figura B.2: Modelo 2 con pérdida de paredes de 15 dB.

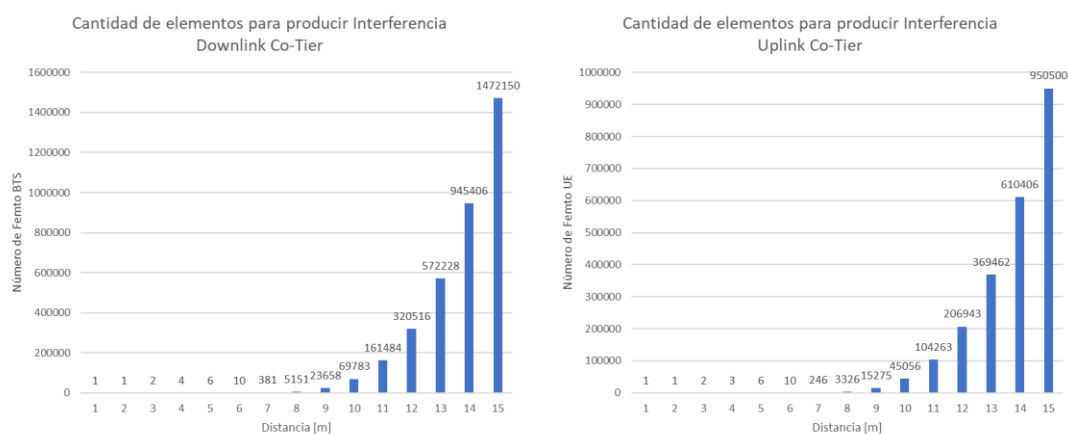


Figura B.3: Modelo 2 con pérdida de paredes de 10 dB.

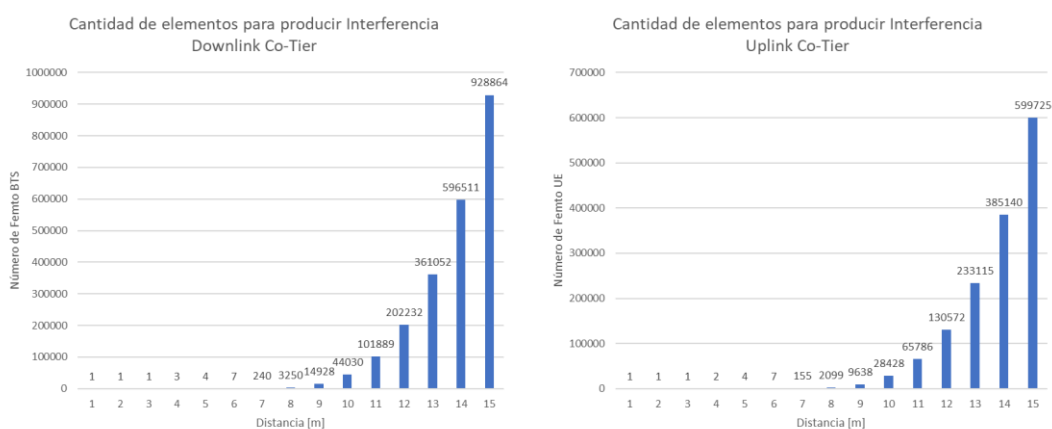


Figura B.4: Modelo 2 con pérdida de paredes de 8 dB.

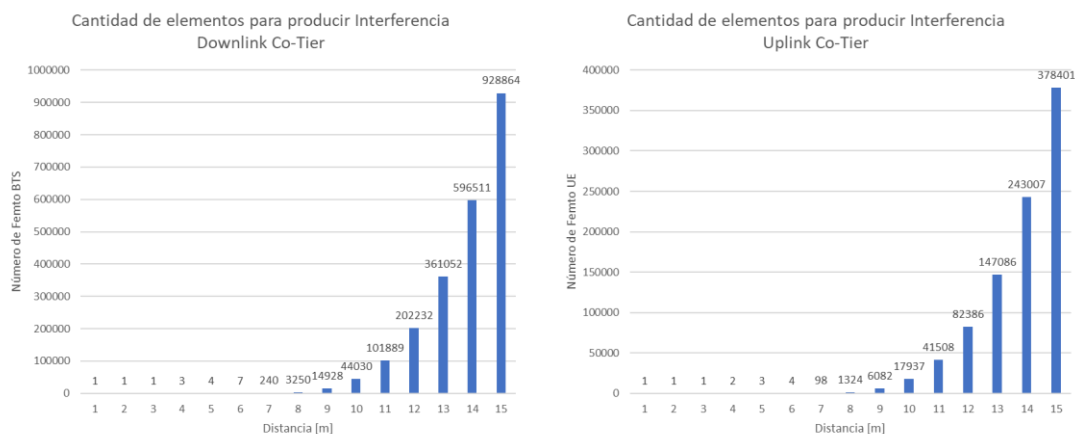


Figura B.5: Modelo 2 con pérdida de paredes de 6 dB.

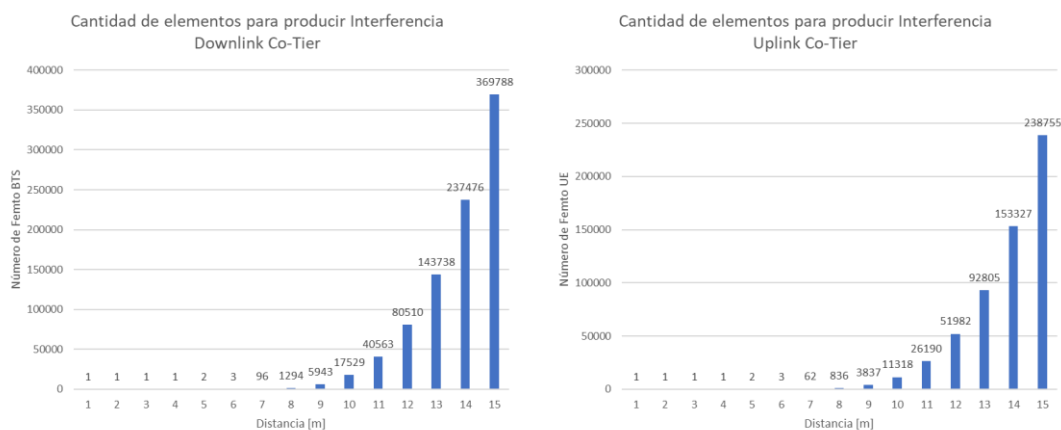


Figura B.6: Modelo 2 con pérdida de paredes de 4 dB.

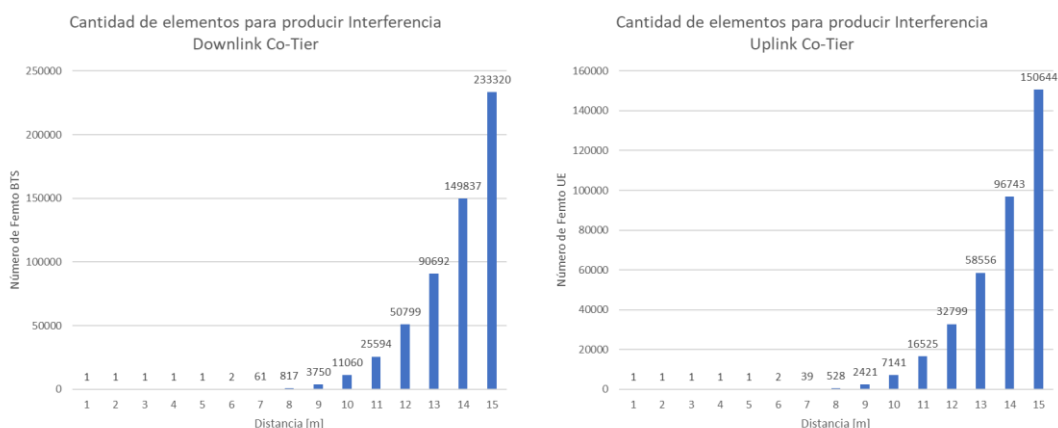


Figura B.7: Modelo 2 con pérdida de paredes de 2 dB.

ANEXO C: BREVIATURAS

3GPP	3rd Generation Partnership Project
ADSL	Asymmetric digital subscriber line
AMPS	Advanced Mobile Phone System
ARCOTEL	Agencia de Regulación y Control de la Telecomunicaciones
AWS	Advanced Wireless Services
BSC	Base Station Controller
CDMA	Code Division Multiple Access
CSG	Closed subscriber groups
DL	Downlink
DwPTS	Downlink Pilot Time Slot
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power
eNode B	evolved Node B
EPC	Evolved Packet Core
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
E-UTRAN	Evolved UMTS Radio Access Network
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FTTH	Fiber to the home
GSM	Global System for Mobile communication
GW	Gateway
INEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos
LTE	Long-Term Evolution
MME	Mobility Management Entity
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PDN	Packet Data Network
PDN-GW	Packet Data Network Gateway

PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
RB	Resource Block
RE	Resource Element
RF	Radio Frequency
RNC	Radio Network controller
RSSR	Received Signal Strength Requirement
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SFN	System Frame Number
S-GW	Serving Gateway
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
UE	User Equipment
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
UL	Uplink
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UpPTS	Uplink Pilot Time Slot
VoLTE	Voice over LTE
LOW	Pérdidas de pared externa