



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Caracterización y Modelado de
Redes de Telefonía Celular para la
prevención de inundaciones**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero en Telecomunicaciones

P R E S E N T A

Chavez Saishio Andrea Kiomi

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Víctor Rangel Licea



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

JURADO ASIGANDO:

Presidente: Ing. Jesús Reyes García.
Secretario: M.I. Juventino Cuéllar González.
Vocal: Dr. Víctor Rangel Licea.
1^{er} Suplente: Dr. Luis Francisco García Jiménez.
2^{do} Suplente: Dr. José Jaime Camacho Escoto.

Lugar donde se realizó la tesis:

México D.F, Facultad de Ingeniería, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Víctor Rangel Licea

FIRMA

DEDICATORIA

A mis padres...

...por siempre brindarme su apoyo y nunca dejarme sola. A mi mamá por siempre recordarme que lo más importante en esta vida es la familia y enseñarme amarla incondicionalmente. A mi papá por enseñarme a dar todo para que tu familia salga adelante y siempre protegerla.

A mis hermanos...

...porque sé que nunca estaré sola y contare siempre con ustedes. A Yumiko porque sin su alegría y su carisma mis días no estarían completos. A Yoshi porque siempre encuentra la manera para que pasemos momentos inolvidables como hermanos.

A mis abuelos...

...por ser los pilares de mi vida. A mi mamá Marcela porque siempre me ha demostrado su gran amor y ha confiado en mí. A mi mamá Bárbara † porque sin ella no existiría la maravillosa familia que siempre me ha apoyado. A mi papá Quique por ser un gran ejemplo a seguir y enseñarme a que puedo lograr todo lo que me proponga. A mi papá Francisco porque a pesar de la distancia siempre ha visto por mí y mi familia y siempre me ha apoyado en todas las etapas de mi vida. A cada uno de ustedes le estoy eternamente agradecida.

A mis tías...

...por ser mi ejemplo a seguir. A Sachi por tener un enorme corazón, ser una maravillosa persona, demostrarme que nunca debemos dejar de aprender y enseñarme a ver siempre por los demás. A Tomi porque sin ella no habría conocido esta maravillosa carrera, porque desde pequeña siempre quise ser como ella ya que tiene mi admiración. A Nayeli por todos los momentos inolvidables y por qué cada vez que la veo son de los mejores días de mi vida. Sin ustedes no lo habría logrado.

A mis tíos...

...por siempre cuidarme. A mi tío Martín porque siempre me da los mejores consejos y por el gran cariño que siempre me ha demostrado algo que es muy importante en mi vida. A mi tío Roberto porque a pesar del poco tiempo, siempre ha visto por mí y me ha cuidado. A mi Nino por los hermosos recuerdos que dejó en mi infancia, por llevarme a viajar y siempre cuidarme.

A mis primos...

...por ser mis hermanos. A Naomi y Noboru por ser mis mejores compañeros de risas y travesuras en verdad los quiero mucho. A Narumi y Hideki por ser los pequeños de la familia y siempre los vamos a cuidar. A Aarón por ser mi compañero de grandes aventuras y por el gran cariño que le tengo.

A mi novio Alan...

...por ser una maravillosa persona, por ser un gran apoyo a lo largo de mi carrera y mi vida personal, por preocuparse por mí, por hacerme muy feliz y por todos los maravillosos momentos que hemos vivido juntos.

A mis Amigos...

...por siempre apoyarme y ser mi soporte emocional. En especial a mi amiga de toda la vida Maribel, hemos crecido juntas y siempre contarás conmigo. A mi amiga Monse la cual es mi cómplice y siempre llevo en mi corazón. A Brayán por los momentos compartidos y apoyo que me brindó. A mis compañeros de la facultad, Raziél con quien compartí un sinfín de momentos, estudios, series e incluso exámenes, Mando con quien tuve momentos y pláticas increíbles, Piñeiro con quien compartí risas y siempre me demostró su apoyo y Charly mi amigo desde la prepa que durante toda la carrera nos apoyamos y ahora nos encontramos terminando esta importante etapa de nuestras vidas.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor...

...Dr. Víctor Rangel por todos los conocimientos que me ha brindado, por su tiempo y dedicación los cuales son parte fundamental de mi formación profesional. Por ser una gran persona comprometida con su trabajo y motivarme a concluir este trabajo. Por sus valiosos consejos y apoyo para seguir creciendo profesionalmente. Por darme la oportunidad de participar en este proyecto.

A mi Universidad...

...por ser mi segunda casa. Tengo tanto que agradecerle a mi Universidad, desde mi formación profesional, por las oportunidades que me brindó y las maravillosas personas que conocí en ella.

Al proyecto...

...EWIN "Emergency Water Information Network", Ref. EP/P029221/1-1J15413/15, UNAM: 49547-2363-12-IX-17. Por permitirme aprender durante mi participación en este mismo y así complementar mi desarrollo profesional.

RESUMEN

La Ciudad de Colima se ha visto rodeada de múltiples sucesos naturales que provocan grandes afectaciones a la población por ello en este trabajo de tesis se realizará un estudio de cobertura de las redes de telefonía celular. También este trabajo es parte del proyecto EWIN en el que participan los países México y Reino Unido. En este proyecto se está desarrollando un sistema de alerta en tiempo real para prevenir a las personas que se encuentran alrededor de los ríos cuando los niveles de estos sean alarmantes. Esto se realizará colocando sensores debajo de los puentes vehiculares que atraviesan los ríos y estarán monitoreando el nivel del agua. Al momento de detectar un nivel alto, se enviará un mensaje de alerta por medio de un canal de telefonía celular. Por lo tanto en las zonas donde serán colocados estos sensores se debe de contar con cobertura así como también de una intensidad de señal adecuada.

Lo que se verá en este trabajo es un panorama de la situación del estado de Colima en cuanto a los ríos presentes en esta ciudad, lo que mostrará la cantidad de personas que pueden verse afectadas por las inundaciones y la importancia del proyecto EWIN. Posteriormente se mencionarán algunos conceptos básicos de los sistemas de telefonía celular para observar cómo han ido evolucionando. A continuación se describirá el funcionamiento de las herramientas ATOLL y G-NetTrack Pro que son de suma importancia en la realización de este tipo de estudios de cobertura. Se comprobará que la aplicación G-NetTrack Pro indica los mismos valores principalmente en la intensidad de la señal que un analizador de espectros por lo tanto ya no se tiene la necesidad de hacer uso de estos aparatos costosos para la realizar un estudio de cobertura. Por último se observará como fue realizado el estudio de cobertura, desde la recolección de datos hasta el desarrollo de la simulación y el análisis de resultados.

ÍNDICE GENERAL

Dedicatoria	I
Agradecimientos	III
Resumen	IV
Lista de figuras	VII
Lista de tablas	XI
Acrónimos y Abreviaciones	XII
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Definición del Problema.....	2
1.3 Objetivo.....	6
1.4 Contribuciones	6
1.5 Estado del Arte	7
1.6 Estructura de la tesis	10
Capítulo 2. Sistemas de telefonía celular 2G y 3G	11
2.1 Introducción	11
2.2 Evolución de las redes celulares	12
2.2.1 Primera Generación	12
2.2.2 Segunda Generación	12
2.2.2.1 Arquitectura GSM	13
2.2.3 Tercera Generación.....	18
2.2.3.1 Arquitectura UMTS	18
2.2.3.2 Lanzamientos del sistema UMTS	22
2.2.3.2.1 Release 99.....	23
2.2.3.2.2 Release 5.....	23
2.2.3.2.3 Release 6.....	29
2.2.3.2.4 Release 7, 8 y 9	30
Capítulo 3. Sistema de telefonía celular 4G	31
3.1 Introducción	31
3.2 Cuarta generación (4G)	32
3.2.1 Arquitectura LTE	33
3.2.2 Técnicas de acceso al medio.....	41
3.2.2.1 FDMA	41
3.2.2.2 TDMA	42
3.2.2.3 CDMA	44
3.2.2.4 OFDMA	45

3.2.3 Modos de transmisión	49
3.2.4 Canales de LTE.....	50
3.2.4.1 Canales lógicos.....	50
3.2.4.2 Canales de transporte	53
3.2.4.3 Canales físicos	54
3.2.5 Características de la transmisión del sistema LTE	56
3.2.5.1 Resource Grid	56
3.2.5.2 Estructura de la trama LTE.....	57
3.2.5.3 Ancho de Banda, Modulación y Codificación en el sistema LTE.....	60
3.2.5.4 Canal físico de control en el enlace ascendente (PUCCH)	62
3.2.5.5 Canal físico de indicador del formato de control (PCFICH).....	64
3.2.5.6 Canal físico de indicador híbrido ARQ (PHICH)	64
3.2.5.7 Búsqueda y asignación de celdas	67
3.2.5.8 Antenas LTE-configuración MIMO	69
Capítulo 4. Herramientas de simulación y aplicación	71
4.1 Introducción	71
4.2 Simulador y Aplicación	71
4.2.1 Aplicación G-NetTrack Pro.....	72
4.2.1.1 Estructura de la aplicación.....	72
4.2.1.2 Comparación de los resultados	77
4.2.2 Simulador ATOLL	78
Capítulo 5. Desarrollo de la simulación y recopilación de datos	81
5.1 Introducción	81
5.2 Recopilación de datos.....	81
5.2.1 Recopilación de datos teóricos.....	81
5.2.2 Modelos de propagación	83
5.2.3 Recopilación de datos experimentales.....	85
5.3 Desarrollo de la Simulación	89
Capítulo 6. Resultados	93
6.1 Introducción	93
6.2 Resultados de la simulación	93
Conclusiones	121
Referencias	123

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representación de la cantidad de personas que habitan en la ciudad de Colima [2].....	3
Figura 2. Representación de la cantidad de personas que habitan en la ciudad de Colima, así como también, la presencia de microcuencas y el peligro de inundación de dicha localidad [2].....	4
Figura 3. Peligro y riesgo a los que se expone la población que habita a los alrededores de los ríos presentes en dicha ciudad [2].....	5
Figura 4. Monitoreo realizado del río Eye [5].....	8
Figura 5. Niveles que ha presentado el río Eye [5].....	9
Figura 6. Arquitectura GSM [8].....	17
Figura 7. Arquitectura UMTS [8].....	19
Figura 8. Arquitectura UMTS. Red de Acceso de Radio Terrestre UTRAN [8].....	20
Figura 9. Sistemas ARQ y HARQ en HSDPA [16].....	25
Figura 10. A) Modulación BPSK B) Diagrama de constelación modulación BPSK [21].....	27
Figura 11. Constelación de la modulación QPSK [22].....	27
Figura 12. Constelación de la modulación 16-QAM [23].....	28
Figura 13. Número IMSI e IMEI [25].....	34
Figura 14. Elementos que conforman al número GUTI [25].....	35
Figura 15. Pila de protocolos correspondientes a la interfaz Uu [24].....	37
Figura 16. Asignación de identificadores para los mensajes de control S1AP entre las eNB y los MME [28].....	38
Figura 17. Pila de protocolos tanto del plano de usuario como el plano de control correspondientes a las interfaces X2 y S1 [28].....	38
Figura 18. Pila de protocolos de las interfaces: A) S11, B) S5/S8 y C) SGI [27].....	40
Figura 19. Arquitectura LTE [8].....	40
Figura 20. Transmisión de símbolos utilizando FDMA [30].....	41
Figura 21. Estructura de una trama GSM [29].....	43
Figura 22. Asignación de frecuencias utilizando las técnicas de acceso al medio FDMA/TDMA en GSM [29].....	43
Figura 23. Comparación de la manera en la que realizan la asignación de recursos las diferentes técnicas de acceso al medio [30].....	44
Figura 24. Espectro de una señal OFDM donde podemos observar 6 portadoras [32].....	45
Figura 25. Efecto PAPR en la señal OFDM [33].....	47
Figura 26. Sistema OFDM [34].....	48
Figura 27. Modos de transmisión FDD y TDD [35].....	49
Figura 28. Estructura de los canales utilizados en LTE [24].....	50
Figura 29. Conexión de los canales lógicos con los canales de transporte [8].....	52
Figura 30. Pila de protocolos de control que pertenecen al AS y los pertenecientes al NAS [36].....	52
Figura 31. Canales utilizados para el flujo de información en el sistema LTE. A. Enlaces UL B. Enlaces DL [8].....	56

Figura 32. Bloque de recursos utilizado en el sistema LTE [24].....	57
Figura 33. Estructura de una trama LTE [24].....	58
Figura 34. Estructura de una trama en el dominio del tiempo usada en el modo de transmisión FDD [24].....	58
Figura 35. Estructura de una trama en el dominio del tiempo utilizada en el modo de transmisión TDD [37].....	59
Figura 36. Configuraciones de las tramas utilizadas en el modo de transmisión TDD [37].....	60
Figura 37. Asignación de recursos de los formatos PUCCH en el sistema LTE [35].....	63
Figura 38. Codificación realizada por el canal PHICH en el sistema LTE [27].....	65
Figura 39. Serie resultante que será enviada a los UE.....	66
Figura 40. El UE recibe de manera correcta el mensaje por lo que se envía un mensaje ACK	66
Figura 41. Posición en donde son transmitidas las señales de sincronización en las trama LTE ya sea TDD o FDD [37].....	67
Figura 42. Posición de las señales de referencia de cada uno de los puertos de una antena [24].....	68
Figura 43. Asignación de recursos [24].....	69
Figura 44. Pestaña Cell.....	73
Figura 45. Pestaña Nei.....	74
Figura 46. Pestaña Map.....	75
Figura 47. Pestaña Info.....	76
Figura 48. Pestaña Drive.....	77
Figura 49. Resultados en el analizador de espectros.....	77
Figura 50. Resultados en la aplicación.....	78
Figura 51. Simulación realizada en ATOLL.....	79
Figura 52. Parámetros utilizados para los transmisores utilizados en los sistemas de telefonía celular 3G [45].....	83
Figura 53. Parámetros utilizados para los transmisores utilizados en los sistemas de telefonía celular 4G [45].....	83
Figura 54. Las mediciones obtenidas con nuestra aplicación G-NetTrack Pro.....	87
Figura 55. Esta imagen representa las mediciones realizadas en el estado de Colima (Operadora-AT&T).....	87
Figura 56. Datos obtenidos de la aplicación los cuales también son visibles en Google Earth.....	88
Figura 57. Estos datos corresponden a las mediciones realizadas con el operador TELCEL.....	88
Figura 58. Radiobases colocadas en el simulador ATOLL.....	89
Figura 59. A) Distribución de las antenas receptoras y emisoras en una radiobase. B) Se observa el patrón de radiación de las antenas emisoras.....	89
Figura 60. Posición de los transmisores. A) Transmisores 3G. B) Transmisores 4G.....	90
Figura 61. Configuración realizada en cada una de los transmisores (3G).....	91
Figura 62. Configuración realizada en cada una de los transmisores (4G).....	92
Figura 63. Simulación de la cobertura del sistema de telefonía celular 3G en la Ciudad de Colima realizada en ATOLL.....	94
Figura 64. Simulación de la cobertura del sistema de telefonía celular 4G en la Ciudad de Colima realizada en ATOLL.....	95

Figura 65. Comparación de los resultados experimentales obtenidos del operador AT&T en el sistema de telefonía celular 4G y los obtenidos teóricamente.....	96
Figura 66. Comparación de ambos resultados obtenidos mediante la simulación ATOLL y la aplicación G-NetTrack Pro.....	97
Figura 67. Radiobase que no se había considerado anteriormente.....	98
Figura 68. Comparación de los resultados obtenidos, considerando la radiobase faltante.	99
Figura 69. Comparación de los resultados obtenidos mediante la simulación ATOLL y la aplicación G-NetTrack Pro, en coso con el operador TELCEL.....	100
Figura 70. Ubicación de cada uno de los sensores así como también los ríos que se encuentran presentes en la Ciudad de Colima.....	101
Figura 71. Señales emitidas por las radiobases 2 y 22.....	101
Figura 72. En esta figura se puede observar que el sensor no cuenta con línea de vista con el transmisor debido a la geografía presente en esta ciudad.....	102
Figura 73. En esta figura se puede observar que el sensor no cuenta con línea de vista con el transmisor debido a la geografía presente en esta ciudad.....	102
Figura 74. Señales emitidas por las radiobases, que pueden ser identificadas por el sensor.....	103
Figura 75. Características de las señales recibidas que son enviadas por las diferentes radiobases.....	103
Figura 76. Señales emitidas por las radiobase 2 transmisor (2) y radiobase 22 transmisores (1 y 2) que pueden ser identificadas por el sensor.....	103
Figura 77. En esta figura se puede observar que el sensor número dos no presenta línea de vista con el radiobase 22 transmisor (1) y con el transmisor (2) si se presenta línea de vista.....	104
Figura 78. En esta figura se puede observar que el sensor número dos no presenta línea de vista con la radiobase 2 transmisor (2).....	105
Figura 79. Señales emitidas por las radiobases que pueden ser identificadas por el sensor.....	105
Figura 80. Características de las señales recibidas que son enviadas por las diferentes radiobases.	105
Figura 81. Señales emitidas por las radiobases que pueden ser identificadas por el sensor.....	106
Figura 82. En esta figura se puede que el sensor número tres presenta línea de vista con la radiobase transmisor (3).....	106
Figura 83. En esta figura se puede observar que el sensor número tres presenta línea de vista con la radiobase 15 transmisor (3).....	107
Figura 84. En esta figura se puede observar que el sensor número tres presenta línea de vista con la radiobase 35 transmisor (3). Pero la zona de fresnel se ve afectada por la geografía presente en esta ciudad.	107
Figura 85. En esta figura se puede observar que el sensor número tres no presenta línea de vista con la radiobase 8 transmisor (1) al igual que la zona de fresnel se ve afectada por la geografía presente en esta ciudad.....	108
Figura 86. En esta figura se puede observar que el sensor número tres no presenta línea de vista con la radiobase 17 transmisor (2) al igual que la zona de fresnel se ve afectada por la geografía presente en esta ciudad.....	108
Figura 87. Señales emitidas por las radiobases que pueden ser identificadas por el sensor.....	109
Figura 88. Características de las señales recibidas que son enviadas por las diferentes radiobases.....	109
Figura 89. Señales emitidas por las radiobases que pueden ser identificadas por el sensor.....	110

Figura 90. En esta figura se puede que el sensor número cuatro presenta línea de vista con la radiobase 5 transmisor (2) y transmisor (3).....	111
Figura 91. En esta figura se puede observar que el sensor número cuatro presenta línea de vista con la radiobase 7 transmisor (3). Pero se debe de considerar que la zona de fresnel se ve afectada por la geografía de la zona.....	111
Figura 92. En esta figura se puede observar que el sensor número cuatro no presenta línea de vista con la radiobase 9 transmisor (3).....	112
Figura 93. En esta figura se puede observar que el sensor número cuatro presenta línea de vista con la radiobase 4 transmisor (3).....	112
Figura 94. Señales emitidas por las radiobases que pueden ser identificadas por el sensor.....	113
Figura 95. Características de las señales recibidas que son enviadas por las diferentes radiobases.....	113
Figura 96. Señales emitidas por las radiobases que pueden ser identificadas por el sensor.....	114
Figura 97. En esta figura se puede observar que el sensor número cinco presenta línea de vista con la radiobase 10 transmisor (1).....	114
Figura 98. En esta figura se puede observar que el sensor número cinco presenta línea de vista con la radiobase 26 transmisor (1).....	115
Figura 99. En esta figura se puede observar que el sensor número cinco presenta línea de vista con la radiobase 28 transmisor (2).....	115
Figura 100. Señales emitidas por las radiobases que pueden ser identificadas por el sensor.....	116
Figura 101. Características de las señales recibidas que son enviadas por las diferentes radiobases.....	116
Figura 102. Señales emitidas por las radiobases que pueden ser identificadas por el sensor.....	117
Figura 103. En esta figura se puede observar que el sensor número seis presenta línea de vista con la radiobase 38 transmisor (2). Aunque también se observa que se ve afectada nuestra zona de fresnel por la geografía de esta ciudad.....	118
Figura 104. En esta figura se puede observar que el sensor número seis no presenta línea de vista con la radiobase 16 transmisor (1).....	118
Figura 105. Señales emitidas por las radiobases que pueden ser identificadas por el sensor.....	119
Figura 106. Características de las señales recibidas que son enviadas por las diferentes radiobases.....	119
Figura 107. Señales emitidas por las radiobases que pueden ser identificadas por nuestro sensor.....	119
Figura 108. En esta figura se puede observar que el sensor número siete no presenta línea de vista con la radiobase 21 transmisor (3).....	120
Figura 109. Señales emitidas por las radiobases que pueden ser identificadas por el sensor.....	120
Figura 110. Características de las señales recibidas que son enviadas por las diferentes radiobases.....	120

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características de los diferentes sistemas GSM [8].....	13
Tabla 2. Interfaces en GSM [8].....	16
Tabla 3. Interfaces en GPRS [8].....	17
Tabla 4. Clasificación de los equipos de usuario en HSDPA [8].....	23
Tabla 5. Clasificación de los equipos de usuario en HSUPA [8].....	29
Tabla 6. Características de los diferentes lanzamientos de la generación 3G y 4G [8].....	32
Tabla 7. Características de las diferentes categorías en las que se dividen los UE en el sistema LTE [24].....	33
Tabla 8. Características de los diferentes canales del sistema LTE [24].....	60
Tabla 9. Modulación, tasa de codificación y eficiencia utilizada en la transmisión dependiendo del valor de CQI enviado por UE [27].....	61
Tabla 10. Formatos de canal físico PUCCH en LTE [27].....	63
Tabla 11. Valores de PCFICH dependiendo el ancho de banda del canal LTE [27].....	64
Tabla 12. Secuencias de Walsh [27].....	65
Tabla 13. Resultado del ejemplo planteado en el anterior párrafo.....	66
Tabla 14. Frecuencias que poseen los diversos operadores para ofrecer sus servicios de telefonía celular [44].....	82
Tabla 15. Coordenadas de la ubicación de las radiobases en el estado de Colima.....	88
Tabla 16. Coordenadas de la ubicación de los sensores en el estado de Colima.....	101

ACRÓNIMOS Y ABREVIACIONES

1G	Primera generación de telefonía celular
2G	Segunda generación de telefonía celular
3G	Tercera Generación
3GPP	Third Generation Partnership Project
ACK	Acknowledgement
AMPS	Advanced Mobile Phone System
ARQ	Automatic Repeat Request
AS	Access Stratum
AuC	Authentication Center
AuC	Authentication Center
BCCH	Broadcast Control Channel
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
BS	Base Station
BSC	Base Station Controller
BSS	Base Station Subsystem
BTS	Base Transceiver Station
CC	Country Code or Call Control
CCCH	Common Control Channel
CDMA	Code Division Multiple Access
CFI	Channel Format Indicator
CQI	Channel Quality Indicator
CRNC	Controlling RNC
CSI	Channel State Information
DCI	Downlink Control Information
DL	Downlink
DL-SCH	Downlink Shared Channel
DRB	Data radio bearer
DRNC	Distribution RNC
DRX	Discontinuous Reception
DwPTS	Downlink Pilot Time Slot

EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
eNB	Evolved Node B
EPC	Evolved Packet Core
EWIN	Emergency Water Information Network
FDD	Frequency División Duplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FFT	Fast Fourier transform
GERAN	GSM EDGE Radio Access Network
GP	Guard Period
GPRS	General Packet Radio Services
GSM	Global System for Mobile
GSN	Gateway Support Node
GTP	GPRS Tunneling Protocol
GUMMEI	Globally Unique MME Identifier
GUTI	Globaly Unique Tempory Identity
HLR	Home Location Register
HLR	Home Location Register
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSS	Home Subscriber Service
HSUPA	High-Speed Uplink Packet Access
IFFT	Inverse Fast Fourier transform
IFT	Instituto Federal de Telecomunicaciones
IMEI	International Mobile Equipment Identity
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
IMT-2000	International Mobile Telecommunications-200
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Service
MCC	Mobile Country Code
MCCH	Multicast control Channel
MCH	Multicast Channel
MIB	Master Information Block
MIMO	Multiple-input Multiple-output

MISO Multiple-input Single-output
MME Mobility Management Entity
MMEC MME Code
MMEGI MME Group ID
MNC Mobile Network Code
MS Mobile Station
MSC Mobile Switching Center
MSIN Mobile Subscription Identification Number
MSISDN Mobile Station Integrated Services Digital
MSN Multiple Subscriber Number
MTCH Multicast Traffic Channel
M-TMSI MME Temporary Subscriber Identity
MU-MIMO Multi-User MIMO
NAK Negative Acknowledgement
NAS Non-Access Stratum
NDC National Destination Code
NSS Network Switching Subsystem
NTM Nordic Mobile Telephone
OFDMA Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
OMC Operation Maintenance Center
OSS Operation support systems
PAPR Peak to Average Power Ratio
PBCH Physical Broadcast Channel
PCCH Paging Control Channel
PCH Paging Channel
PCI Physical Cell Identity
PCRF Policy and Charging Rules Function
PDCCH Physical Downlink Control Channel
PDCP Packet data convergence protocol
PDN Packet Data Network
PDSCH Physical Downlink Shared Channel
P-GW Packet data network Gateway
PHICH Physical Hybrid ARQ Indicator Channel

PLMN	Public Land Mobile Network
PLMN ID	Public Land Mobile Network Identifier
PMCH	Physical Multicast Channel
PMI	Pre-coding Matrix Indicator
PMIP	Proxy Mobile IP
PRACH	Physical Random Access Channel
PSK	Phase-Shift Keying
PSS	Primary Synchronization Signal
PSTN	Public Switched Telephone Network
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RACH	Random-Access Channel
RB	Resource Blocks
RE	Resource Element
RI	Rank Indicator
RLC	Radio Link Control
RNC	Radio Network Controller
RRC	Radio Resource Control
RRM	Management of Radioelectric Resources
RSRP	Reference Signal Received Power
RSRQ	Reference Signal Received Quality
S1AP	S1 Application Protocol
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SCTP	Stream Control Transmission Protocol
S-GW	Serving-Gateway
SIMO	Single-input Multiple-output
SISO	Single-input Single-output
SN	Subscriber Number
SR	Scheduling Request
SRB	Signalling Radio Bearers

SRNC	Server RNC
SSS	Secondary Synchronization Signal
SUI	Stanford University Interim
SU-MIMO	Single-User MIMO
TACS	Total Access Communications System
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
UCOL	Universidad de Colima
UDP	User Datagram Protocol
UE	User equipment
UL	Uplink
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
USIM	Universal Subscriber Identity Module
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
UpPTS	Uplink Pilot Time Slot
VLR	Visitors Location Register
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
Wi-fi	Wireless Fidelity

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

La ciudad de Colima se ha visto rodeada de una importante cantidad de sucesos naturales que han provocado afectaciones y desastres a las comunidades que habitan en dicha zona. Uno de estos problemas son los ríos que se encuentran entre y en los alrededores de las comunidades, así como también cerca de las carreteras principales, etc. Un ejemplo importante obtenido del *Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Colima 2014* [1], sobre los desastres que se han presentado en un pasado debido a las inundaciones en esta ciudad son los siguientes:

- El día jueves 31 de agosto de 2001 a consecuencia de una fuerte tormenta que tuvo una duración de hora y media, provocó el desbordamiento del arroyo Pereyra y del Río Colima, trayendo como efecto 4 personas muertas, daños materiales que van desde vehículos atrapados hasta daños en edificios como cines donde fueron rescatadas varias personas. También se produjo el colapso de un puente, provocando afectaciones vehiculares. En la capital del estado de Colima se presentaron fuertes afectaciones a consecuencia del desbordamiento del Río Colima dejando un total de 30 viviendas dañadas en su totalidad y 139 casas con daños parciales, un registro indico que un total de 82 familias perdieron todas sus pertenencias y otras 37 con afectaciones debido a la gran cantidad de lodo que se encontraba en la zona.
- El día 12 de octubre de 2011 llegó a las costas de Colima el huracán Java, provocando fuertes lluvias en la ciudad, trayendo como consecuencia el desbordamiento de los ríos cercanos a esta misma. Haciendo colapsar un total de cinco puentes e inundaciones en varias calles.
- El 15 de septiembre de 2013 se generaron fuertes lluvias en la ciudad debido a la tormenta tropical Manuel, provocando de la misma manera que en otras ocasiones afectaciones a inmuebles debido a los desbordamientos e inundaciones de los ríos presentes en esta ciudad.

Con todo lo mencionado anteriormente, nos podemos dar cuenta que esta ciudad se ha visto afectada en varios momentos por las inundaciones provocadas por diversos fenómenos naturales.

Por otra parte, en este trabajo solo se mencionan los fenómenos más relevantes en la última década. Sin embargo, esta ciudad se encuentra con este tipo de problemas año con año debido a las inundaciones que provocan problemas vehiculares y ponen en riesgo constante la vida de las personas que habitan a los alrededores de los ríos presentes en la Ciudad de Colima.

1.2 Definición del problema

En el estado de Colima, se tiene un grave problema que es consecuencia de las fuertes lluvias. Este problema se ve agravado debido a que en la ciudad se encuentran presentes una importante cantidad de ríos. Las siguientes imágenes fueron extraídas del visor “Atlas de peligros y riesgos del estado de Colima” [2].

La figura 1 muestra la distribución de personas que habitan en el estado de Colima, siguiendo la lista de los colores que se encuentran a la izquierda del mapa se representa el número de habitantes. La figura 2 muestra la cantidad de microcuencas localizadas en la ciudad, así como también la parte de color azul claro indica el peligro de inundaciones en un periodo de retorno de 2 años. Esto quiere decir que en cada año se tiene una probabilidad del 50% de que el nivel de los ríos sea mayor a los registrados normalmente, por lo tanto se habla de un 50% más de probabilidad de que se presenten inundaciones en esta zona. La figura 3 muestra la cantidad de peligro y riesgo a los que se expone la población que habita a los alrededores de los ríos en esta ciudad. Esto se representa por diversos colores que son una escala que va desde muy bajo hasta muy alto. Con esto se demuestra la magnitud del problema al que nos estamos enfrentando debido a la concurrencia tanto de inundaciones como de precipitaciones en la zona.

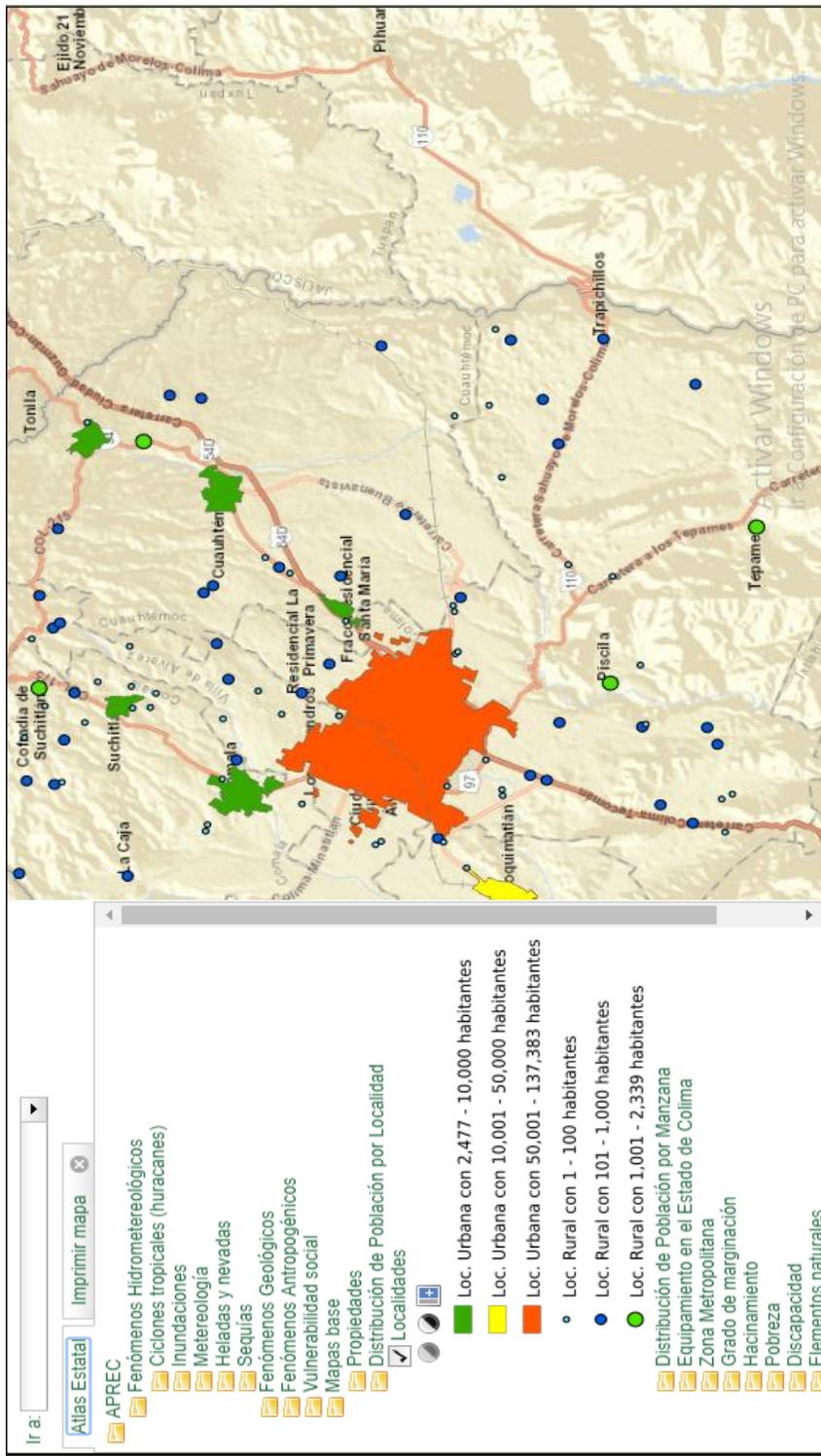


Figura 1. Representación de la cantidad de personas que habitan en la ciudad de Colima [2].

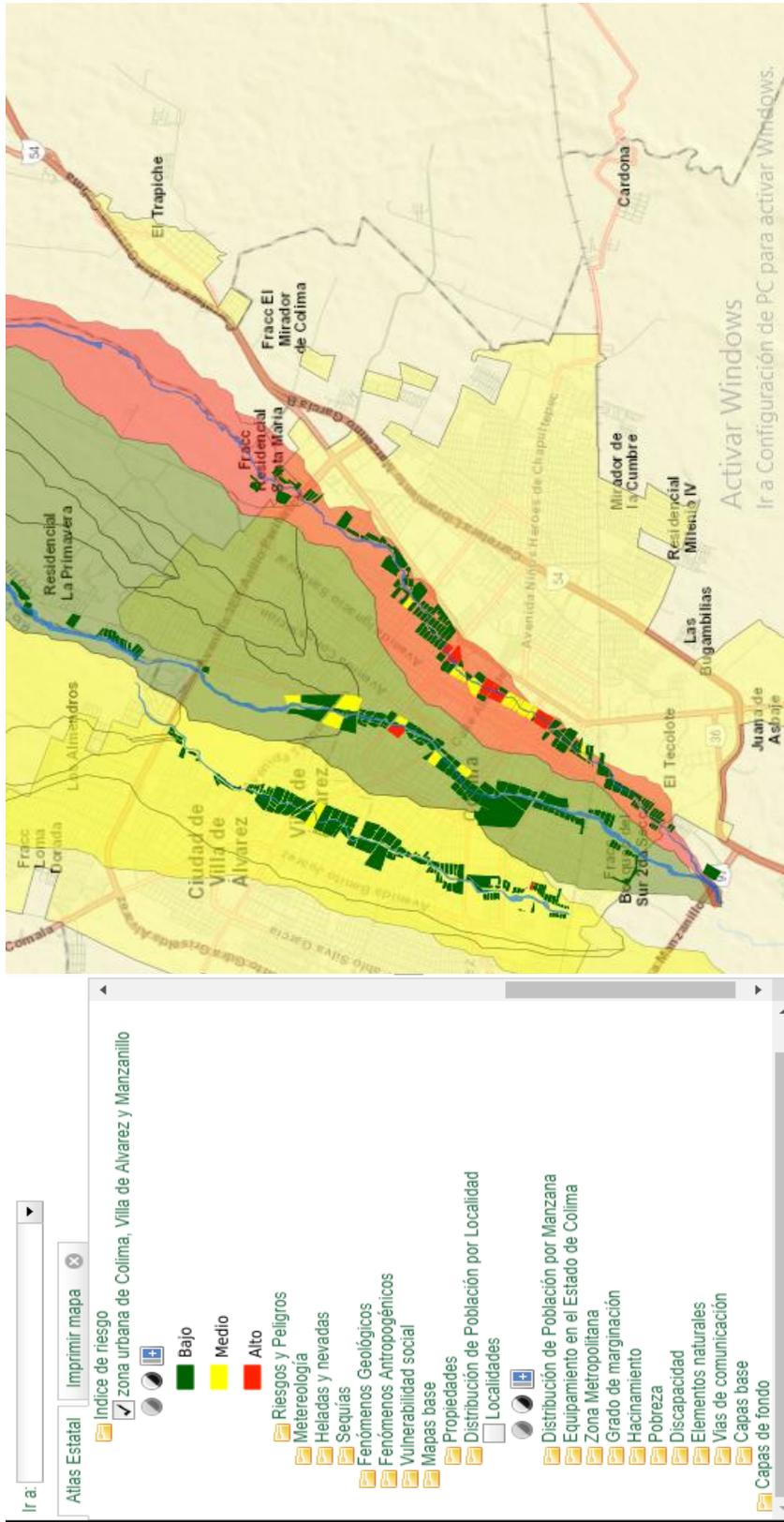


Figura 3. Peligro y riesgo a los que se expone la población que habita a los alrededores de los ríos presentes en dicha ciudad [2].

La solución a este problema es colocar sensores debajo de los puentes vehiculares, que estén monitoreando los niveles de los ríos y al momento en el que se registren niveles alarmantes, se envíe un mensaje de alerta por medio de un canal de telefonía celular a los habitantes de la zona.

En este trabajo se enfocará a un problema en particular el cual es el siguiente; como medio de comunicación entre nuestros sensores y usuarios como se mencionó anteriormente se utilizará un canal de telefonía celular. Por lo tanto se realizará un estudio de cobertura de redes de telefonía celular en diversas tecnologías, que son WCDMA (2G), UMTS (3G) y LTE (4G) cuya señal es emitida por diversas radiobases ubicadas en esta localidad y son pertenecientes a diferentes operadores que son: Telcel, Movistar y AT&T. Esto servirá para saber el nivel de intensidad de señal ya que debe de encontrarse en un rango adecuado principalmente en los lugares donde serán colocados nuestros sensores. Esta señal se verá afectada debido a que el estado de Colima presenta un geografía que incluye diversos elementos que afectarán la intensidad de la señal y dichos elementos deben de ser ubicados y analizados para poder dar una solución al problema.

1.3 Objetivo

Realizar un estudio de la cobertura de las radiobases localizadas en el estado de Colima con las tecnologías GSM (2G), UMTS (3G) y LTE (4G). Esto se va a realizar con ayuda del simulador ATOLL, colocando los parámetros adecuados como son la localización de las radiobases que se tienen registradas, potencia de transmisión de cada una de las diferentes tecnologías, modulación, entre otros. Con esto se logrará saber cuál es la intensidad de señal que emiten las radiobases en diferentes zonas. Y de esta manera poder contar con un aproximado de la localización de los lugares en los que se deberán de implementar diversas soluciones para obtener el rango de intensidad de señal necesaria en la ubicación de nuestros sensores.

1.4 Contribuciones

Este trabajo de tesis surge en apoyo al proyecto EWIN (Emergency Water Information Network). El proyecto EWIN está conformado por investigadores pertenecientes a 3 universidades las cuales son: la Universidad de Colima (UCOL), la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la Universidad de Loughborough esta última ubicada en Reino Unido [3] [4]. El principal objetivo del proyecto es realizar un modelo con el que se

pueda monitorear, predecir y alertar a la población que se encuentre expuesta al peligro ocasionado por las inundaciones mediante el uso de las redes de telefonía celular y el sistema Wireless Fidelity (Wi-fi) en tiempo real. Contando con una gran infraestructura conformada por un conjunto de pequeñas infraestructuras que cumplan con ser económicas, temporales y con una alta movilidad. Las primeras pruebas se realizarán en el Río Eye al noreste de Melton Mowbray en Reino Unido y en los ríos/lagunas al oeste y suroeste de la Ciudad de Colima ubicada en el centro oeste de México.

La principal contribución de este trabajo hacia el proyecto EWIN es realizar un aproximado de la cobertura de telefonía celular que se tiene en el estado de Colima. Esto servirá como referencia y dará un apoyo para poder prever en qué zona se tendrán que emplear soluciones para tener la intensidad de señal adecuada y así poder transmitir la información proporcionada por el sensor a través de los canales.

Otra contribución de este trabajo es servir como apoyo a quienes comiencen un estudio sobre las redes de telefonía celular y puedan observar cómo han ido evolucionando estas; ya que se expondrán temas básicos de los sistemas de telefonía celular. También se mencionarán dos herramientas (simulador ATOLL y la aplicación G-NetTrack PRO) que son importantes para poder realizar un estudio de cobertura en donde se explicará su funcionamiento y características. Esta información puede ser utilizada para realizar estudios de cobertura en otras regiones para trabajos posteriores.

1.5 Estado del arte

Anteriormente se mencionó que este trabajo se originó a partir del proyecto EWIN donde participan los países México y Reino Unido [4]. En el capítulo 1.2 se presentaron figuras que fueron extraídas de una página de internet creada por la Universidad de Colima. Se pueden observar los ríos que afectan a dicha ciudad, la población que se encuentra en riesgo, la probabilidad de que se generen las inundaciones debido a las precipitaciones, etc. De igual manera la Agencia de Medio Ambiente Británica desarrolló una página en internet de Reino Unido en donde se visualiza la información acerca de los niveles de los ríos encontrados en este país.

En la figura 4 se puede observar un punto verde que corresponde al lugar donde se realiza el monitoreo del nivel del río Eye. A la izquierda de la imagen se ve el nombre de diversas ciudades donde también es realizado este monitoreo.

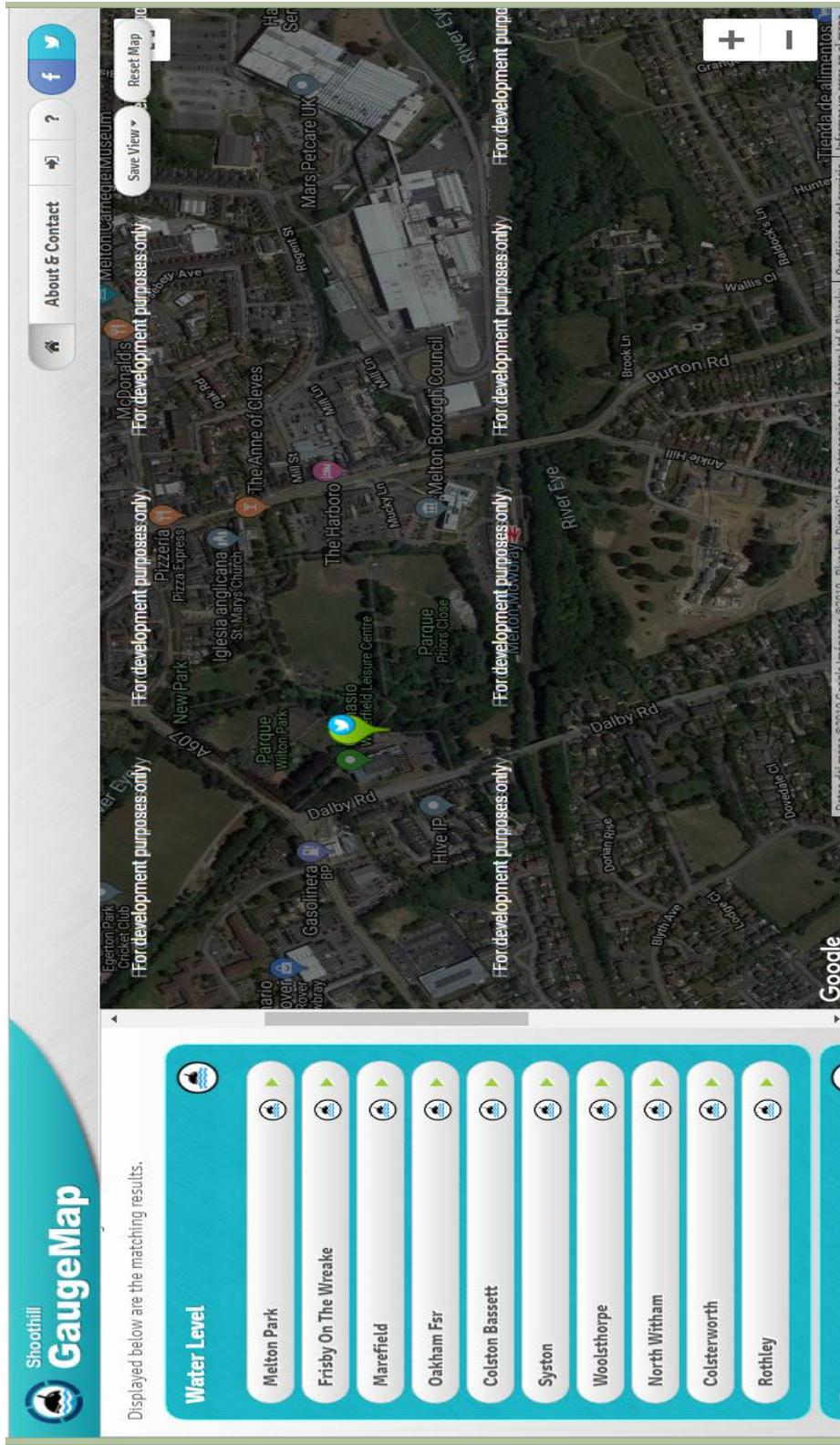


Figura 4. Monitoreo realizado del río Eye [5].

En la figura 5 se observa un recuadro que está dividido en tres secciones que indican cuando el nivel del río se encontró más bajo de lo normal, cuando estuvo en un nivel normal y donde hay una posible inundación. Esto se puede visualizar por día, mes o año. En este ejemplo se colocará por mes para poder distinguir en qué meses de año el río ha presentado niveles de agua alarmantes.



Figura 5. Niveles que ha presentado el río Eye [5].

El Reino Unido cuenta con la presencia de varios ríos en su territorio al igual que México y se ha visto con la necesidad de colocar alrededor de 1400 estaciones de medición como las que se mencionaron en las figuras 4 y 5. Cada una de estas estaciones es administrada por la Agencia Ambiental (EA).

Con esta investigación se espera que México y Reino Unido puedan desarrollar un modelo que les permita realizar un sistema sobre la prevención de inundaciones en tiempo real y no solamente un monitoreo como lo han hecho hasta este momento en Reino Unido con predicciones y estadísticas del comportamiento que ha tenido cada uno de los ríos estudiados.

1.6 Estructura de la tesis

El capítulo dos presenta información y una breve explicación de los sistemas de telefonía celular 2G y 3G donde se mostrará el funcionamiento, arquitectura y componentes de cada uno de estos sistemas, para poder visualizar como se ha dado la evolución de la telefonía celular.

El capítulo tres describe el sistema de telefonía celular 4G su funcionamiento, características de sus componentes, arquitectura, modelos de transmisión y las técnicas de acceso al medio que se utilizan, etc.

El capítulo cuatro muestra las herramientas que fueron utilizadas para el desarrollo de este trabajo que son: ATOLL y G-NetTrack PRO. El primero es el que va a permitir realizar la estimación de cobertura deseada mediante una simulación. El segundo es una aplicación de teléfono celular que realiza una lectura de datos, principalmente de intensidad de señal que ayudará a estimar la cobertura y así poder ajustar los parámetros como por ejemplo el modelo de propagación, la frecuencia de operación, etc. en caso de ser necesario.

El capítulo cinco hace la recolección de datos para poder realizar la simulación, de igual manera se llevará a cabo un análisis de los datos que proporciona la aplicación G-NetTrack PRO para poder considerarlos al momento de realizar la simulación.

El capítulo seis presenta un análisis de resultados, esto incluye una comparación de los datos experimentales obtenidos de nuestra simulación y de la aplicación G-NetTrack PRO. En caso de ser necesario se hará nuevamente un ajuste en la simulación. Se realizará un estudio de geografía del estado de Colima para poder ver la posibilidad de la existencia de algún problema que se presente. Con esto se observará si en el lugar donde se plantea colocar los sensores en caso de no tener una intensidad de señal adecuada, sea debido a la existencia de algún factor geográfico y así poder considerarlo al momento de realizar las soluciones necesarias para resolver este problema.

El capítulo siete muestra las conclusiones de nuestro trabajo y un análisis realizado.

Capítulo 2. Sistemas de telefonía celular 2G y 3G

2.1 Introducción

Los sistemas de telefonía celular han ido evolucionando a lo largo del tiempo, durante esta evolución, estos sistemas han presentado un aumento considerable en las tasas de información, mayores velocidades, asimismo son capaces de permitir el acceso y transportar la información de una mayor cantidad de usuarios que requieren comunicarse entre sí. También se han agregado más componentes que hacen que la red sea escalable. Es importante comprender el funcionamiento de estos primeros sistemas de telefonía celular porque son la base de la generación 4G.

En este capítulo se hablará un poco del primer sistema de telefonía celular. Posteriormente se mencionará a la segunda generación con la cual pasamos de la tecnología analógica a la digital, se describirá su arquitectura y se dará una breve explicación de cada uno de estos componentes así como también se mencionará la función de cada una de sus interfaces. Que se utilizan para que sus componentes puedan transmitir información entre sí. También se hablará de la tercera generación de telefonía celular, describiendo de igual manera su arquitectura y sus componentes. En esta generación se presentaron varios lanzamientos los cuales se describirán cada uno de ellos brevemente incluyendo diversos conceptos, siendo estos de relevancia ya que se verán en el siguiente capítulo.

2.2 Evolución de las redes celulares

2.2.1 Primera Generación

Las redes celulares han presentado una evolución constante desde la aparición de la primera generación de telefonía móvil mejor conocida por su abreviatura “Primera Generación (1G)” [6] en los años 80’s. Esta tecnología fue de tipo analógico y solamente proporcionaba servicios de voz. Su funcionamiento estaba basado en una Red de conmutación de circuitos (PSTN) que sirve para tener comunicaciones de voz en tiempo real. Se utilizaba una técnica de multiplexación frequency division multiple access (FDMA) y se dará una mayor explicación en el capítulo tres. Operaba en la frecuencia de los 800-900 [MHz]. En esta tecnología fueron creados varios estándares como es el caso de advanced mobile phone system (AMPS) en los Estados Unidos, desarrollado por los laboratorios Bell, utilizando una banda de 25 [MHz] con canales de 30 [KHz] de ancho de banda teniendo un total de 832 canales. En el caso de Europa se desarrolló el estándar total access communications system (TACS) utilizando una banda de 25 [MHz] con canales de 25 [kHz] de ancho de banda llegando a tener un total de 1000 canales. Otro estándar que también fue el nordic mobile telephone (NTM), que fue utilizado en Dinamarca, Finlandia, Noruega, Suecia, entre otros.

En la primera generación solo podíamos contar con un usuario por canal y se manejaba una velocidad de transmisión entre 1 [Kbps] a 2.4 [Kbps]. Algunos de los principales problemas que tuvo esta generación de telefonía móvil fue la falta de calidad en los servicios de voz, la poca movilidad que proporcionaba así como también la falta de seguridad.

2.2.2 Segunda Generación

Posteriormente aparece la segunda generación de telefonía celular “Segunda generación de telefonía celular (2G)” [7] en los años 90’s. A diferencia de la primera generación, esta tecnología ya es de tipo digital y nos proporciona diversos servicios que son [6]: voz digital, SMS, roaming internacional, conferencia, llamada en espera, retención de llamada, transferencia de llamadas, bloqueo de llamadas, número de identificación de llamadas, etc. Primeramente se menciona que la segunda generación de telefonía celular maneja el estándar que se conoce como global system for mobile (GSM). Este mismo utiliza como técnica de acceso al medio a time division multiple access (TDMA).

La segunda generación de telefonía celular opera en las bandas de frecuencia de 800 y 900 [MHz], [8] que posteriormente debido a la alta demanda de servicios que tuvo en ese tiempo y a la falta de frecuencias, se impulsó una nueva adaptación digital llamada GSM 1800 para poder operar en las bandas de frecuencias entre 1800 y 1900 [MHz]. Se maneja para el enlace de los datos de subida uplink (UL) el ancho de banda entre las frecuencias de 890-915 [MHz]. Para el caso del enlace para los datos de bajada downlink (DL) el ancho de banda entre las frecuencias de 935-960 [MHz]. Se contaba con una velocidad de transmisión de 9.6 [Kbps] en un inicio. En la tabla 1 podemos observar esta misma información en las diferentes bandas de frecuencias donde operaba dicho estándar:

	GSM 900	GSM 1800	GSM 1900
Ascendente (Uplink)	890-915 [MHz]	1.710-1.785 [MHz]	1.850-1.910 [MHz]
Descendente (Downlink)	935-960 [MHz]	1.805-1.880 [MHz]	1.930-1.990 [MHz]
Ancho de Banda	25 [MHz]	75 [MHz]	60 [MHz]
Separación de portadoras	200 [KHz]	200 [KHz]	200 [KHz]
Distancia dúplex	45 [MHz]	95 [MHz]	80 [MHz]
Número de portadoras	124	374	299
Radio típico de célula	300 m - 35 km	100 m - 35 km	100 m - 15 km
Potencia del terminal	.8 -2 [W]	.25-1 [W]	.25-1 [W]

Tabla 1. Características de los diferentes sistemas GSM [8].

2.2.2.1 Arquitectura GSM

El estándar GSM está basado en una arquitectura de red [9] dividido en cuatro partes esenciales:

1) Estación móvil (MS)

Se tienen dos elementos que son los más importantes en esta sección: el equipo del usuario y el SIM.

En el equipo de usuario se encuentran diversos elementos que sirven para poder comunicarse de forma inalámbrica y también ayuda a procesar la información. Dentro del equipo de usuario se localiza lo que se conoce como el código internacional mobile equipment identity (IMEI) [10]. Que es un código único de identificación de un equipo, no se puede cambiar y cuenta con un total de 15 dígitos. Es colocado por el fabricante y tiene diversas funciones,

como por ejemplo, ayuda a la red a saber dónde está localizado el equipo, quien lo está usando y en caso de robo se pueda generar una recuperación o bloqueo, etc.

El SIM o módulo de identidad del suscriptor [9] cuenta con la información del usuario para que pueda ser identificado dentro del sistema.

2) Subsistema de Estación Base (BSS)

Este subsistema está directamente ligado con la estación móvil, y está compuesto por dos principales elementos, que son el base transceiver station (BTS) y base station controller (BSC). Este subsistema es denominado con el nombre GSM EDGE radio access network (GERAN) que es la parte de la red de acceso de radio GSM.

- El BTS [11] es la parte del sistema que se encarga de recibir y enviar las señales de radio de los dispositivos móviles, está compuesto por diversos elementos como lo son las antenas, transmisores, receptores, etc.

Una de las funciones específicas de la BTS son [12]: la codificación y decodificación de los canales, cifrado y descifrado de los caminos de radio, realiza las medidas de intensidad de señal, la búsqueda de la estación móvil, recepción de peticiones de canal de las estaciones móviles, entre otras.

La BTS se comunica con la MS mediante lo que se conoce como interfaz de radio Um [8]. La interfaz Um de radio es la que permite, mediante diferentes mecanismos la comunicación entre los equipos móviles y las BTS.

- El BSC es un punto de conexión de varias BTS [8]. Coordina las llamadas para seguir manteniendo la continuidad y controla la potencia de transmisión para evitar las interferencias. Dicho de otra manera [12] se encarga de la gestión de los canales de radio, supervisión de las BTS, de los traspasos (handover) y de la localización de las estaciones móviles.

La interfaz de radio con la que se comunica con la BTS se llama interfaz Abis.

Una de las funciones que tiene la BSC es el realizar los handovers. Para que se realice un handover se debe de tener establecida una conexión en tiempo real entre una BTS y un equipo de usuario por lo cual habrá dos razones por las que se realice un handover [8]. La primera es cuando nuestro equipo de usuario se encuentre en movimiento, llegará un punto en el que ya no será alcanzable por la BTS inicial, por lo tanto deberá de realizarse un traspaso (handover) de la señal a otra BTS para que se pueda tener continuidad en la conexión de nuestro equipo de usuario. La segunda razón será porque la BTS en la que nos encontramos está llegando a su límite de capacidad de tráfico y es necesario realizar un handover a todos los equipos de usuarios que se encuentren en los límites de la BTS actual hacia otra BTS cercana y con capacidad de tráfico. Al momento de realizar un handover en cualquiera de los dos casos, se hace una nueva reasignación de frecuencia de tal manera que se ocupa una perteneciente a la nueva BTS dejando libre la frecuencia utilizada en la BTS inicial.

Diferentes tipos de handovers [8]:

- Traspaso intra-célula a intra-BSC: Esto ocurre cuando el traspaso o handover se realiza dentro de la misma célula, debido a interferencias y como se mencionó anteriormente esta decisión la toma la BSC que controla a la célula.
- Traspaso de una inter-célula e intra-BSC: Esto ocurre cuando el dispositivo se encuentra en movimiento y queda fuera del alcance de la célula actual, por lo que se tiene que realizar un handover hacia otra célula pero ambas están siendo gestionadas por la misma BSC.
- Traspaso inter-célula e inter-BSC: Mismo caso que el anterior pero en este la célula a la que se acaba de ingresar está siendo gestionada por otro BSC, en este caso la decisión la toma el primer BSC pero el traspaso o handover se lleva a cabo por el MSC (más adelante se dará una explicación de este elemento de la red GSM).
- Traspaso MSC: Este se realiza entre MSCs. El primer MSC se le conoce como MSC ancla y al segundo como MSC destino. El MSC ancla contacta al MSC destino y le transfiere la conexión de tráfico.

Los principios básicos para la realización de un traspaso son los siguientes [13]:

- Realizar mediciones e informar al sistema.
- La toma de decisiones, donde se consideran los criterios necesarios para realizar el traspaso.
- Y finalmente, la ejecución donde se indicará por medio de señalización, los pasos que se están siguiendo para poder realizar una correcta asignación de recursos de radio.

3) Subsistema de Redes y conmutación (NSS)

A este subsistema se le puede considerar como la parte central de la arquitectura GSM. Se encuentra conformado por varios componentes los cuales son:

- El centro de conmutación de servicios móviles (MSC) [12]: Se encarga del establecimiento, enrutamiento y control de las llamadas desde y hacia otros equipos de usuario. Está conectado con la BSS a través de la interfaz A. También se comunica con la red pública conmutada de circuitos a través del sistema de señalización SS7, esto nos sirve para que podamos realizar llamadas desde un portátil a un número fijo.
- El Registro de localización local (HLR) [12]: Dentro de la red GSM puede existir uno o más HLR, esto depende de la organización y de la capacidad de memoria de los equipos. El HLR es una base de datos donde se concentra toda la información de los usuarios como por ejemplo: información de la suscripción para poder aplicar las políticas de calidad de servicio adecuadas y el estado de actividad de dicha terminal móvil. Dicho de otra manera en estos equipos se concentra la información inicial de un equipo móvil.
- El Registro de posiciones de visitantes (VLR) [8]: Del igual manera que en el HLR, VLR es una base de datos, se encuentra virtualmente en el MSC. Su función comienza al momento en el que el equipo móvil cambia de área de origen y entra de "visitante"

a otra área, en este momento el VLR pide toda la información necesaria a HLR para realizar el establecimiento de llamadas desde y hacia el dispositivo móvil.

- El centro de autenticación (AuC) [12]: Como su nombre lo dice se encarga de autenticar al usuario al momento de que este mismo cambie de área o simplemente al momento de recibir y mandar una llamada se iniciará el proceso de autenticación, para evitar que los datos se han alterados o lleguen a usuarios equivocados.
- El registro de identificación de estaciones móviles (EIR): Se basa en el número de identificación IMEI y por medio de este se genera una base de datos de los equipos móviles que no se encuentran autorizados para acceder a la red.

Las interfaces de comunicación entre estos componentes son:

Interfaz	Equipos en comunicación	Interfaz	Equipos en comunicación
Um	Terminal móvil (MS)-BTS	E	MSC-MSC
A	BSS-MSC	F	MSC-EIR
B	MSC-VLR	G	VLR-VLR
C	MSC-HLR	H	HLR-AuC
D	VLR-HLR		

Tabla 2. Interfaces en GSM [8].

Posteriormente con la llegada de general packet radio services (GPRS), que es una mejora de GSM, se agregaron nuevos componentes a la red [8]. Estos componentes permiten la interconexión con otras redes de datos así como también la administración de la movilidad de los usuarios incluyendo su autenticación. Estos pueden estar integrados en el MSC o se pueden encontrar en otro lugar de la red. Tienen la misma función que el MSC pero en este caso estos componentes se encargan de los paquetes IP. Estos componentes que se agregaron fueron dos nodos de soporte gateway support Node (GSN) los cuales se encargan de gestionar y encaminar el tráfico:

- Nodo de soporte GPRS servidor (SGSN): Es el encargado de la movilidad de tráfico, autenticación, asignación de direccionamiento IP. En caso de que el usuario se encuentre en movilidad, sigue los pasos de este mismo por si llega a cambiar de BTS, evitando que se llegue a perder la conexión, dicho de otra manera se encarga de la gestión de movilidad.
- Nodo de soporte GPRS pasarela (GGSN): Es el encargado de la interconexión con las redes externas y del redireccionamiento.

Las interfaces con las que se comunican con otros componentes de la red GSM son las siguientes:

Interfaz	Equipos en comunicación	Interfaz	Equipos en comunicación
Gb	SGSN-BSC	Gr	SGSN-HLR
Gf	SGSN-EIR	Gc	GGSN-HLR
Gs	SGSN-MSC	Gi	GGSN-Red de paquetes
Gn	SGSN-GGSN		

Tabla 3. Interfaces en GPRS [8].

4) Subsistema de operación y soporte (OSS)

Todos los equipos de este sistema se encuentran en diferentes lugares geográficos y con ayuda de este subsistema se pueden de forma lógica centralizar. Este subsistema incluye el operation maintenance center (OMC) [8] que es el encargado de monitorear la red, encargándose de la detección de fallas y que la funcionalidad de la red sea la correcta.

En la figura 6 podemos observar la arquitectura de la red GSM:

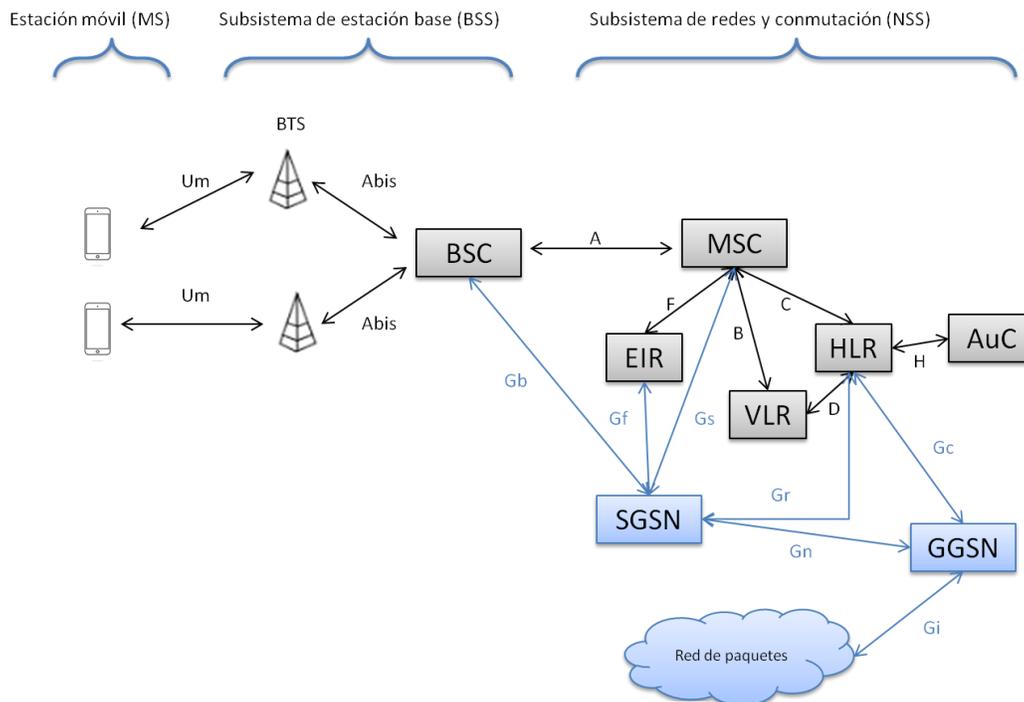


Figura 6. Arquitectura GSM [8].

Finalmente, se tuvieron diferentes mejoras del sistema GSM [8]. La primera fue GPRS, llegando a una velocidad de transmisión de datos de 115 [Kbps]. Posteriormente se llegó a una segunda mejora llamada enhanced data rates for GSM Evolution (EDGE) logrando alcanzar velocidades de transmisión de hasta 384 [Kbps] y gracias a estas mejoras se llegó a la tercera generación de telefonía celular.

2.2.3 Tercera Generación

A la tercera generación de telefonía celular no solamente se le conoce por su abreviatura “Tercera Generación (3G)” [13] sino que contiene diversos sinónimos dependiendo de la zona geográfica, por ejemplo en Europa se le conoce con el término UMTS, en Japón y en EE.UU se le conoce como international mobile telecommunications-2000 (IMT-2000).

Debido a la globalización que comenzó a verse reflejada desde GSM, se creó un grupo muy importante para realizar la estandarización de esta nueva generación de telefonía celular conocido como third generation partnership project (3GPP) conformado por Europa, Japón, Corea, China y EE.UU.

Esta nueva generación se basa en una técnica de acceso al medio wideband code division multiple access (WCDMA). El rango de frecuencias [9] que se maneja por recomendación de la UIT es de 1920-1980 [MHz] de UL y 2110-2170 [MHz] de DL con un ancho de banda de 5 [MHz] para cada canal. Este sistema llega a alcanzar una tasa de transmisión de 2.3 [Mbps].

2.2.3.1 Arquitectura UMTS

La arquitectura universal mobile telecommunications system (UMTS) se divide en tres componentes principales los cuales son:

- El núcleo de red (core network)
 - Red de acceso de radio (UTRAN)
 - Equipo de usuario (EU)
-
- El núcleo de red (core network): Es lo que permite que la red UMTS tenga comunicación con otras redes de telecomunicaciones permitiendo a los usuarios acceder a otros servicios que no sean pertenecientes a esta misma. Dentro de sus

funciones se encuentran el gestionar la movilidad, el control de los usuarios y servicios, el transporte de la información [8] encargándose de que esta información llegue a su destino correcto y de forma correcta. En otras palabras es la parte inteligente y se encarga de la parte lógica de la red UMTS. Por sus siglas en inglés este núcleo de red o red central es conocido por su abreviatura CN.

Esta red se divide en dos dominios el CS y el PS, como se muestra en la figura 7. El dominio CS es el encargado de la conmutación de circuitos logrando una velocidad hasta 64 [kbit/s] y el dominio PS es el encargado de la conmutación de paquetes IP logrando una velocidad de 2 [Mbit/s].

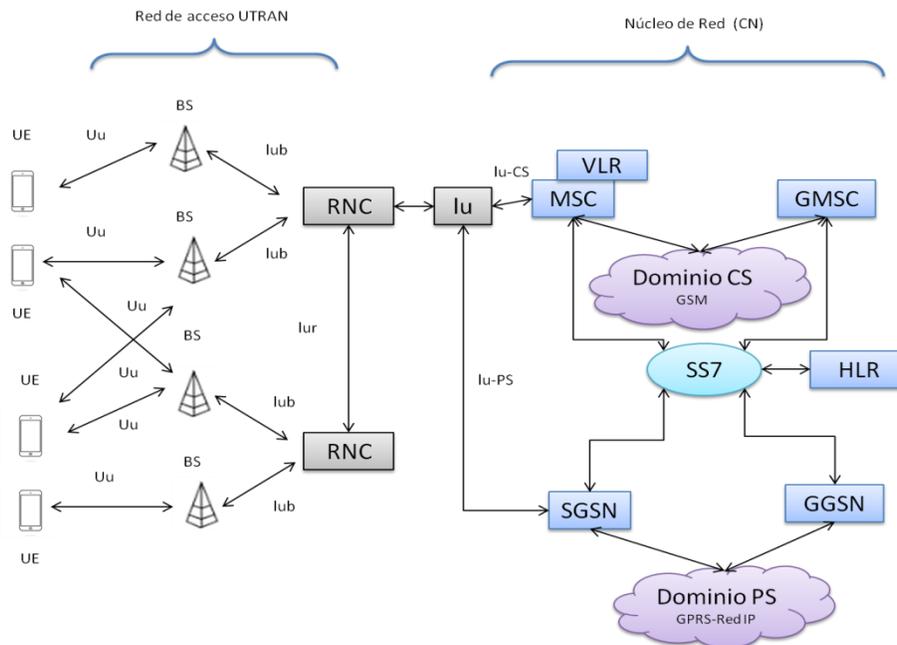


Figura 7. Arquitectura UMTS [8].

- Red de acceso de radio (UTRAN): La arquitectura de GSM utiliza la técnica de acceso al medio TDMA, por lo que se tuvieron que agregar dos elementos nuevos a la red para poder soportar una nueva técnica de acceso que se denomina con el nombre de WCDMA. Estos dos elementos son la estación base (BS) y el controlador de red de radio (RNC). Como su nombre lo indica son los que se encargan de gestionar los recursos de radio y a esta sección de la red se le denomina como red de acceso radio terrestre UMTS (UTRAN). En la figura 8 podemos observar solamente la parte de la arquitectura de la red UMTS que corresponde a la Red de Acceso UTRAN:

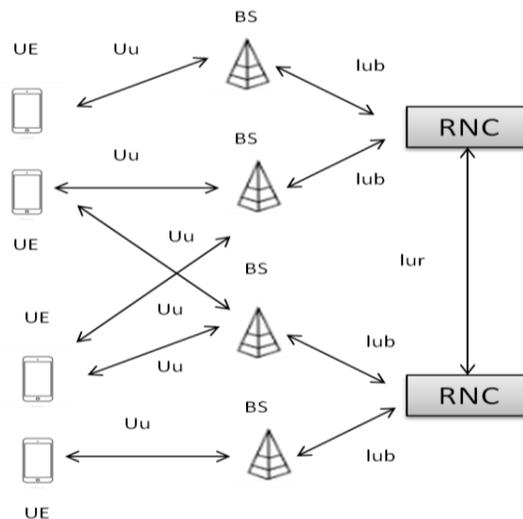


Figura 8. Arquitectura UMTS. Red de Acceso de Radio Terrestre UTRAN [8].

- 1) Estación base (BS o Nodo B) [8] [13]: Es la encargada de la transmisión y recepción de señales. Tiene múltiples funciones como son: la corrección de errores, modulación y demodulación de las señales de radio, el ajuste de las tasas de información y mide la calidad e intensidad de la señal. Una vez obtenida la intensidad de la señal se transmite la información al RNC que tomará la decisión de la realización o no de un handover.

La Nodo B se encarga también de ejecutar las indicaciones enviadas por el RNC para realizar el control de potencia y la sincronización de tiempo y frecuencia de los canales de radio.

- 2) El controlador de red de radio (RNC): Se encarga [8] de la gestión de los recursos de radio, libera y establece conexiones, toma las decisiones de realización de traspaso así como también funciones de control de potencia y movilidad de las terminales móviles. El RNC tiene la posibilidad de realizar diferentes funciones y dependiendo de cada una de estas recibe un nombre diferente:

- RNC de controlador o CRNC: Se encarga de los recursos lógicos de las Nodo B, por lo que a cada uno de estos se le será asignado un CRNC y como su nombre lo indica va a controlar y administrar la información recaudada por el Nodo B. También administra el tráfico de los canales asignados, controla la congestión y carga de tráfico de la celda por lo que también tiene el control del acceso, con lo cual distribuye y asigna códigos a los nuevos canales o enlaces de la celda.
- RNC de servidor o SRNC: A diferencia del CRNC, en este caso cada equipo móvil tiene un SRNC asignado que se encargará del mapeo de los parámetros

para realizar el enlace de radio, controlar la potencia y de tomar las decisiones de realizar un handover cuando sea necesario.

- RNC de desplazamiento (DRNC): Quién tiene el control de cada equipo móvil asociado a la red UTRAN directamente es el SRNC. Cuando el SRNC toma la decisión de realizar un handover a otro RNC y se necesita tomar recursos de este otro RNC y se trabaja en conjunto como DRNC.

La función del RNC se puede dividir en dos partes [8]: la RRM y las funciones de control de la UTRAN:

- Gestión de recursos radioeléctricos (RRM): Este se encuentra localizado en el UE, BS y RNC. Su función principal es mandar información a través del trayecto para asegurar la continuidad de la comunicación ya establecida y a su vez cumplir los requisitos de quality of service (QoS) que se hayan definido en el servicio. A esta información se le llama servicio UTRA. La información que se manda gracias al RRM sirve para que se puedan realizar las siguientes actividades:
 - Control de traspasos (handover)
 - Control de potencia
 - Gestión de códigos
- Las funciones de control en la UTRAN: Como su nombre lo indica se encarga de la parte de las funciones de control, como lo son:
 - Difusión de información del sistema
 - Funciones de seguridad
 - Gestión de movilidad a nivel UTRAN
 - Administración de la base de datos
 - Posicionamiento del UE
- Equipo de usuario (EU): Cada EU contiene diversos elementos que ayudan a la red UMTS a diferenciar a los usuarios dentro de la red. Estos elementos se dividen dependiendo sus funcionalidades y cada uno se encuentra incluido en cada EU perteneciente a la red [13]:
 - Identidad única: También es denominado como identidad internacional del abonado móvil (IMSI) que está conformado por tres componentes principales y son almacenados en la tarjeta universal subscriber identity module (USIM). Estos componentes sirven para darle un perfil al usuario y así mismo este pueda ser reconocido dentro de la red. Los tres elementos que lo conforman son los siguientes:

- Mobile country code (MCC) que corresponde al código de país (3 dígitos).
 - Mobile network code (MNC) este contiene al código de la red móvil (2 o 3 dígitos).
 - Mobile subscription identification number (MSIN) que es el número de abonado móvil (9 o 10 dígitos dependiendo de la región).
- Diferenciación de servicios: Este sirve para identificar a que servicios tiene acceso el usuario y es mejor conocido como número RDSI de abonado móvil (MSISDN), este número está conformado por tres elementos:
 - Country Code or Call Control (CC) siendo el código de país (1-3 dígitos)
 - National destination code (NDC) que corresponde al país destino
 - Subscriber number (SN) siendo el número del abonado.

2.2.3.2 Lanzamientos del sistema UMTS

Una de las principales características que tuvo el sistema UMTS es que contaba con una comunicación full dúplex y con modulación adaptativa la cual se fue ajustando conforme fueron apareciendo los diferentes lanzamientos en que se fueron mejorando las tasas de transmisión del sistema.

La comunicación full dúplex opera de dos formas diferentes [8] Time Division Duplex (TDD) y Frequency División Duplexing (FDD):

- TDD: Las transmisiones se realizan de forma bidireccional, tanto UL y DL. Sus tramas se transportan en la misma banda de frecuencias pero en intervalos de tiempos.
- FDD: A diferencia del ejemplo anterior, en este caso tanto en el UL y DL se transportan en bandas de frecuencias diferentes.

La utilización de TDD o FDD dependerá de la disponibilidad del espectro en cada región.

A lo largo de cada uno de los lanzamientos que se tuvieron en UMTS se fue re-diseñando y adaptando a la red para las comunicaciones de internet basadas en el protocolo IP.

2.2.3.2.1 Release 99

El primer lanzamiento que se obtuvo del sistema de telefonía celular 3G fue el Release 99 (lanzamiento 99) [13]. En esta versión se agregó la red de radio UTRAN, cuya función es soportar la técnica de acceso al medio mediante WCDMA, ya que la arquitectura GSM no contaba con esta capacidad.

2.2.3.2.2 Release 5

Se tuvieron varios lanzamientos del sistema UMTS, pero fue hasta el quinto cuando apareció el término high speed downlink packet access (HSDPA) [10] en el 2005. Con este lanzamiento se llegó a velocidades más altas de transmisión. Esto se logró mediante la implementación de los siguientes tres conceptos: HARQ, AMC y el Despacho rápido (fast scheduling).

Otro concepto que se comenzó a manejar en este lanzamiento es la clasificación de los equipos de usuario. Esta clasificación depende de la capacidad de cada uno de los EU para soportar las diferentes velocidades de transmisión alcanzables hasta ese momento. En la tabla 4 se pueden observar las diferentes categorías en las que fueron clasificados los EU junto con su respectiva velocidad de transmisión aceptable para cada uno de ellos:

Categoría	Velocidad [Mbit/s]
1, 2	1.2
3, 4	1.8
5, 6	3.6
7, 8	7.2
9	10.2
10	14.4

Tabla 4. Clasificación de los equipos de usuario en HSDPA [8].

- HARQ [16]: Apareció como una mejora de automatic repeat request (ARQ) el cual era usado en el release 99 y solamente se basaba en la detección de errores [17]. El sistema ARQ se encarga de detectar paquetes los cuales contienen errores y posteriormente pide la retransmisión de estos mismos.

Una detección de errores se realiza mediante el uso de códigos a los que se les denomina códigos de bloque. Los códigos de bloques son métodos utilizados para agregar bits a una palabra inicial logrando obtener una palabra con un mayor número de bits para obtener redundancia.

Un código puede funcionar por medio de la redundancia de bits con lo que se podrá deducir si se presentan o no errores en la transmisión. Un ejemplo de esto, es la detección de errores por medio de un código que aplicará una redundancia basándose en la regla de bit de paridad que es frecuentemente usada en el sistema ARQ. Esta regla funciona de la siguiente manera; supongamos que tenemos el siguiente grupo de bits a transmitir o secuencia de bits:

[110 001 110 111]

Si aplicamos una codificación que se encuentre basada en la regla de bit de paridad se hará lo siguiente; si el número de unos que hay en el grupo de bits a transmitir es par se agrega un cero y si es impar se agregará un uno. El ejemplo mencionado anteriormente quedará codificado de la siguiente manera:

110	0	[1100 0011 1100 1111]
001	1	
110	0	
111	1	

En el primer grupo o secuencia se aplicó la regla de bit de paridad par, en la segunda secuencia se aplicó la regla de bit de paridad impar, en la tercera secuencia la regla de bit de paridad par y la última secuencia la regla de bit de paridad impar.

Cabe mencionar que no solamente existe este código para la detección de errores, sino que también son utilizados diversos códigos donde cada uno de ellos cumple con su función de forma diferente.

El sistema ARQ puede funcionar de diferentes maneras [18]:

- ARQ de parada y espera: Cuando el transmisor manda la información, espera a que el receptor le envíe un mensaje de reconocimiento de vuelta llamado acknowledgement (ACK) y si este mensaje contiene errores el transmisor le enviará al receptor un mensaje de reconocimiento negative acknowledgement (NAK).
- ARQ devolución de N bloques: En este caso el transmisor seguirá mandando los bloques de mensajes hasta que reciba un NAK por parte del receptor. Este mensaje de reconocimiento le indicará al transmisor donde se encuentra el error y retransmitirá los bloques a partir de donde se produjo dicho error.

- ARQ selectivo: Este sistema es más complejo debido a la parte de almacenamiento (memoria) que se encuentra en el transmisor y receptor. En otras palabras se puede decir que el almacenamiento es inteligente, debido a que el receptor le indica al transmisor que parte del mensaje llegó de forma incorrecta de tal manera que el transmisor solo retransmitirá esta parte señalada. Al ser enviada nuevamente la información indicada al receptor, este tiene la capacidad de acomodar de forma correcta el mensaje. Este último es el funcionamiento del sistema ARQ más utilizado, aunque sea el de mayor complejidad.

Como se mencionó anteriormente HARQ es una mejora de ARQ [19], debido a que el sistema HARQ no solamente detecta los errores sino que también los corrige. En HSDPA este sistema HARQ se basa en una combinación de retransmisiones. Lo que sucede es que al momento en el que el receptor detecta un error en vez de desechar el paquete lo almacena y envía un mensaje que error (NAK). Posteriormente el transmisor reenvía el paquete que fue detectado como erróneo y al llegar al receptor realiza combinación de ambos paquetes (el que llegó con errores y el paquete retransmitido), con lo que se evita desperdiciar la energía de la señal. Con esta combinación también se aprovecha la parte o fracción del paquete que está correcto con lo que se logra evitar retransmisiones innecesarias, una mejora en la eficiencia del sistema y se permite un mayor número de paquetes transmitidos.

Tanto el sistema ARQ y HARQ son utilizados en la transmisión y recepción de datos en HSDPA, como se muestra en la figura 9 [16]:

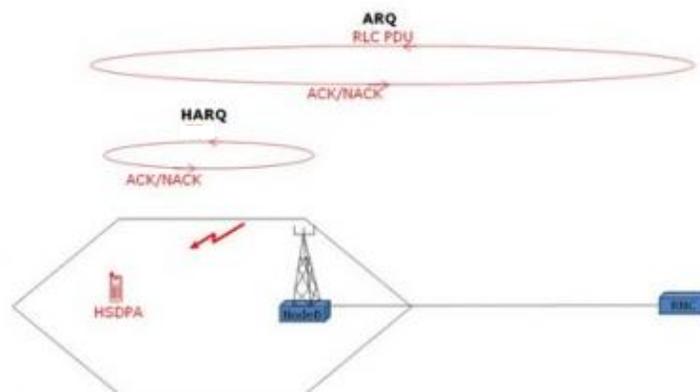


Figura 9. Sistemas ARQ y HARQ en HSDPA [16].

El sistema ARQ se utiliza entre el UE y el RNC. El sistema HARQ funciona entre el UE y la BS. El sistema completo funciona de la siguiente manera; el número de retransmisiones que puede realizar el sistema HARQ es limitado por lo que existirán casos en los que el sistema ARQ pasará a tomar el control.

- AMC: Este sistema consiste en una modulación y codificación adaptativa. Si la cantidad de relación señal a ruido que presenta la señal se encuentra en un rango aceptable y las interferencias no llegan a afectar en gran medida a nuestra señal, mediante el AMC se puede lograr aumentar las tasas de transmisión. A continuación se explicará en qué consiste la modulación y codificación adaptativa:
 - Modulación adaptativa: Dependiendo de las características que presente el medio donde se van a realizar las transmisiones como por ejemplo: la distancia a la que se encuentre el UE de la radiobase, la capacidad de tráfico disponible en la celda, entre otros factores, se utilizarán las modulaciones quadrature phase shift keying (QPSK) o 16 QAM. Dicho de otra forma no todos los UE serán modulados de la misma manera sino que se elegirá la modulación más conveniente para cada uno de ellos [20]. A continuación se describirá cómo funcionan las modulaciones antes mencionadas:
 - QPSK: Se ocupa en las modulaciones digitales. Primero se explicará en qué consiste la modulación phase-shift keying (PSK). La modulación de una señal está conformada por una portadora y una señal moduladora. La portadora de la señal es la que llevará la información que al ser modulada presentará un cambio de fase dependiendo del valor de la señal moduladora. Existen diversas variaciones de la modulación PSK como por ejemplo binary phase-shift keying (BPSK) y QPSK.

En la modulación BPSK solamente se utilizan dos símbolos por lo tanto si se transmite un 1 se va generar una señal con una fase de 0° pero si se transmite un 0 esta se va a desfasar 180° . En la figura 10 inciso A) se puede observar el cambio de fase que presenta la señal de salida dependiendo de la señal de entrada y en el inciso B) el diagrama de constelación que corresponde a la modulación BPSK [21].

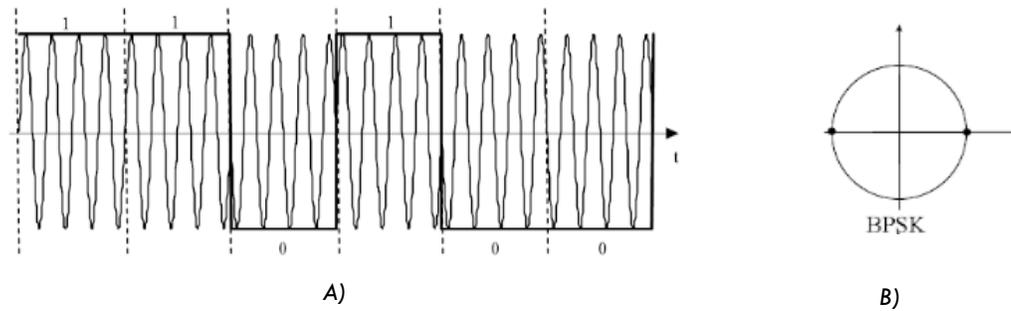


Figura 10. A) Modulación BPSK B) Diagrama de constelación modulación BPSK [21].

La modulación QPSK trabaja con 4 símbolos y en cada uno de ellos puede transmitirse 2 bits, de igual que en BPSK esta modulación es de amplitud constante y tiene un funcionamiento similar. Por cada cambio de símbolo se presentará una fase diferente a la salida de la señal. En la figura 11 se puede observar la constelación de la modulación QPSK:

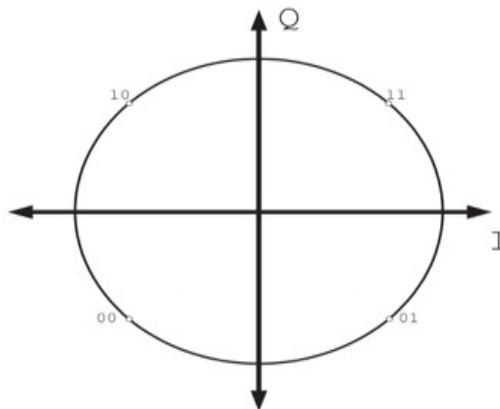


Figura 11. Constelación de la modulación QPSK [22].

- Quadrature amplitude modulation (QAM): En esta modulación cuenta con varios símbolos. El número de símbolos se indica en su nombre, por ejemplo 8-QAM son 8 símbolos con 3 bits a transmitir cada uno ($2^3 = 8$), 16-QAM son 16 símbolos con 4 bits cada uno ($2^4 = 16$), 32-QAM son 32 símbolos con 5 bits cada uno ($2^5 = 32$), 64-QAM son 64 símbolos con 6 bits cada uno ($2^6 = 64$) y así sucesivamente. A diferencia de las modulaciones de BPSK y QPSK, la señal portadora no solamente presentará un cambio de fase sino que también se verá modificada en su amplitud. En la figura 12 se puede ver una constelación de la modulación 16-QAM:

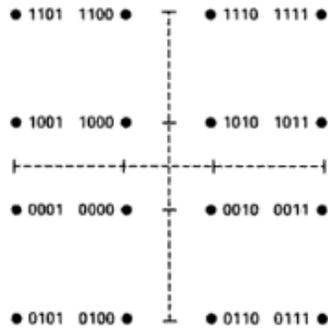


Figura 12. Constelación de la modulación 16-QAM [23].

- Codificación adaptativa: Depende de las condiciones del medio, distancia entre el EU y la radiobase, etc. En la codificación adaptativa se manejan tasas de código desde $\frac{1}{4}$ hasta $\frac{3}{4}$ [16].

Los códigos nos sirven para la detección y corrección de errores como ya se ha mencionado. Se llegan a utilizar códigos convolucionales que a diferencia de los códigos de bloque, no perjudican el ancho de banda ya que los códigos de bloque trabajan con todo un bloque de bits y los códigos convolucionales trabajan con bits por bits. Otro detalle de los códigos convolucionales es que utilizan una memoria que van trabajando conforme la información va llegando en bloques con longitud fija y también con la información que anteriormente fue recibida.

Los códigos convolucionales se determinan con tres variables: n , m y k , donde n corresponde a los bits a la salida del codificador, m es el número de registros en la memoria y k es la información que se recibió a la entrada del codificador. En estos códigos también se maneja un concepto al que llamamos relación o tasa de código y se determina con k/n . Cada uno de los parámetros mencionados tiene un rango definido: n y k van de 1 a 8, m de 2 a 10 y por último la tasa de código k/n va de $\frac{1}{8}$ a $\frac{7}{8}$.

Por lo tanto los valores se interpretan de la siguiente manera: una tasa de codificación de $\frac{1}{4}$ significa que por cada bit que llegue a la entrada, a la salida tendremos 4 bits en total, por lo que se agregaron 3 bits de redundancia. En el caso de utilizar una tasa de codificación de $\frac{3}{4}$ nos indica que por cada tres bits que se tienen a la entrada se tendrá un total de 4 bits a la salida, por lo que fue agregado un bit de redundancia. En este último ejemplo se puede observar que es más eficiente que el primero debido a que se envían un mayor número de bits que contienen información, pero su capacidad de detección y corrección de errores no es tan eficiente por lo que existirá una mayor probabilidad de que se generen errores en la recepción del paquete a comparación de utilizar la tasa de codificación $\frac{1}{4}$.

- Desecho rápido (Fast scheduling) [8]: Cuando se va a realizar una transmisión en un determinado intervalo de tiempo se envía una trama la cual tiene una duración de 2 [ms]. Gracias a esta trama el scheduler puede determinar la cantidad de paquetes que serán enviados y junto con el AMC determinar que tasa de código se usará. En un inicio esto se realizaba desde el RNC por lo que en HSDPA dicha funcionalidad se pasó al BS para que el monitoreo fuera

Todas estas mejoras que se realizaron en HSDPA sirvieron para aumentar la transmisión de datos en el enlace DL.

En cuanto a la potencia de transmisión en HSDPA [10], la BS proporciona toda la potencia disponible para permitir la comunicación de un solo equipo por un intervalo de tiempo. Cuando el intervalo de tiempo finaliza se proporciona esta misma cantidad de potencia a otro equipo y así sucesivamente. Realizar lo antes mencionado ocasiona un gran problema de eficiencia al sistema debido a que solamente se está transmitiendo un solo equipo a la vez.

2.2.3.2.3 Release 6

Posteriormente llegó el Release 6 también conocido como high-speed uplink packet access (HSUPA) que se encargó de mejorar las velocidades de transmisión en los paquetes del enlace ascendente (UL). Para lograr aumentar las velocidades de transmisión en el enlace UL [15] se implementó la codificación adaptativa y el sistema HARQ para la detección y corrección de errores.

Otra mejora que se obtuvo con este lanzamiento es la forma en la que realiza la estación base (BS) la repartición de la potencia. Esto se hace de manera uniforme a todos los EU pertenecientes a la misma celda. También se designó un límite en la tasa de transmisión a cada EU para evitar las interferencias. Con lo anterior se logró que todos los usuarios pertenecientes a la celda pudieran transmitir al mismo tiempo.

La decisión de la cantidad de potencia de transmisión designada a cada usuario lo realiza la BS. Esta decisión será tomada en base a las mediciones realizadas por la BS de la interferencia que está presentando el EU durante su transmisión. Si la potencia con la que está transmitiendo la BS es suficiente para que un número determinado de EU pueda recibir la información, la BS decidirá a que usuarios se les permitirá enviar su información y se les asignará el nivel de potencia de transmisión.

En este lanzamiento también fueron clasificados los EU dependiendo de su capacidad para soportar las tasas de transmisiones logradas en HSUPA. En la tabla 5 se muestra su clasificación:

Categoría	Velocidad [Mbit/s]
1	.73
2,3	1.46
4	2.93
5	2
6	5.76
7	11.5

Tabla 5. Clasificación de los equipos de usuario en HSUPA [8].

La diferencia de las capacidades de transmisión entre HSPDA y HSUPA son menores en este último lanzamiento. En HSPDA solo podía transmitir un usuario a la vez en cada celda y en HSUPA ya pueden transmitir todos al mismo tiempo y para lograr esto mismo su capacidad de transmisión por cada EU debe ser limitada para evitar interferencias.

2.2.3.2.4 Release 7, 8 y 9

El Release 7 es también conocido como HSPA+ o HSPA evolved aquí se tuvieron mejoras en ambos enlaces tanto en UL y DL [8]. Se llegaron a velocidades de 28 [Mbits] para DL y 1.5 [Mbits] para UL utilizando modulaciones de 64 QAM y 16 QAM respectivamente. También se implementaron otras técnicas como son el uso de las antenas multiple-input multiple-output (MIMO) mejoras en la potencia de transmisión y se realizó un mayor aprovechamiento de los recursos radioeléctricos. En el Release 8 ya se comenzaba a hablar de la siguiente generación de telefonía celular (4G), con la implementación de las siguientes mejoras: un ancho de banda flexible, opciones de espectro flexible, altas velocidades de transmisión, etc. Por último en el Release 9 se siguieron mejorando las técnicas implementadas en los Release 7 y 8 con lo que se logró llegar a la cuarta generación de telefonía celular.

Capítulo 3. Sistema de telefonía celular 4G

3.1 Introducción

A lo largo del tiempo existe cada vez una mayor demanda de los servicios de telecomunicaciones. Por ejemplo: más personas tienen acceso al servicio de internet desde sus dispositivos móviles lo que a su vez les da la facilidad de tener una mayor movilidad por lo tanto esto va generar mayor cantidad de tráfico en cada celda. El sistema debe ser lo suficientemente eficaz para permitir la movilidad sin que la conexión continua de los usuarios se vea afectada y poder soportar las grandes cantidades de información. Esto se logró con la llegada de la cuarta generación de telefonía celular en donde se alcanzaron velocidades de transmisión muy altas mejorando la eficiencia del sistema. Para conseguir estas velocidades se realizaron diferentes implementaciones en la red de ahí la importancia de entender cómo funciona este sistema, como está constituido, que elementos lo conforman, como se realiza el intercambio de la información, como se realiza un mayor aprovechamiento de los recursos radioeléctricos, etc. Todos estos conceptos se verán a lo largo de este capítulo.

En este capítulo se verán diferentes conceptos como las velocidades de transmisión del sistema 4G, la arquitectura del sistema, los conceptos “plano de control” y “plano de usuario”, las diferentes técnicas de acceso al medio, los canales físicos, de transporte y lógicos que permiten la comunicación de los UE con los componentes del sistema, la estructura de una trama LTE, etc.

3.2 Cuarta generación (4G)

Esta generación es también conocida como LTE-Advanced. Su característica principal es que su infraestructura está basada en el Protocolo de internet. La técnica de acceso al medio que se utiliza en esta generación es orthogonal frequency-division multiple access (OFDMA) para el enlace DL y single carrier frequency division multiple access (SC-FDMA) para el enlace UL. Su principal objetivo es lograr velocidades de transmisión más altas que en las anteriores generaciones. En la tabla 6 se puede observar cuales son las velocidades que se manejan en 4G y en los diferentes lanzamientos de 3G [8]:

	WCDMA	HSPA HSDPA/HSUPA	HSPA+	LTE (Rel 8/9)	LTE-Advanced
Velocidad de descarga (DL)	384 [kbit/s]	14 [Mbit/s]	28 [Mbit/s]	100 [Mbit/s]	1 [Gbit/s]
Velocidad de subida (UL)	128 [kbit/s]	5 [Mbit/s]	11 [Mbit/s]	50 [Mbit/s]	500 [Mbit/s]
Latencia	150 [ms]	100 [ms]	50 [ms]	20 [ms]	<5 [ms]
Release 3GPP	Rel 99/4	Rel 5/6	Rel 7	Rel 8/9	Rel 10
Año de despliegue	2003	HSDPA-2005 HSUPA-2007	2008	2009	Finales 2010
Método de acceso	CDMA	CDMA	CDMA	OFDMA SC-FDMA	OFDMA SC-FDMA

Tabla 6. Características de los diferentes lanzamientos de la generación 3G y 4G [8].

En este sistema se logró llegar a mayores velocidades de transmisión por las siguientes razones [14]: se utilizaron las antenas MIMO, se disminuyó el tiempo de latencia (tiempo en que tarda en enviar una señal y en recibir una respuesta), se realizó la separación entre los canales unos dedicados a la información del usuario y otros a los mensajes de control, se utiliza un ancho de banda adaptativo, se maneja una modulación hasta 64-QAM, se realizó una mejora del sistema HARQ y se implementó el uso de turbocódigos para mejorar la detección y corrección de errores, se realizaron modificaciones en la arquitectura de la red, entre otras razones que se serán explicadas más adelante.

3.2.1 Arquitectura del sistema LTE

La arquitectura de long term evolution (LTE) se divide en tres partes: el equipo de usuario (UE), la red de acceso E-UTRAN y la parte central evolved packet core (EPC).

- Equipo de usuario (UE): En esta tecnología se divide en categorías a los UE y dependiendo de cada una de estas será la capacidad de transmisión de datos que permiten cada uno de ellos. En la tabla 7 se observan las diferentes categorías:

Categoría	Máxima Velocidad de datos (DL) [Mbit/s]	Máxima Velocidad de datos (UL) [Mbit/s]	Soporta transmitir con una modulación de 64 QAM.
1	10.3	5.2	No
2	51	25.5	No
3	102	51	No
4	150.8	51	No
5	302.8	75.4	Si

Tabla 7. Características de las diferentes categorías en las que se dividen los UE en el sistema LTE [24].

Para poder identificar los equipos de usuario dentro de la red se les asignan números que están conformados de la siguiente manera:

- IMSI: Como en el caso de las anteriores generaciones también se usa en la generación 4G y contiene tres elementos:
 - MCC: Corresponde al código de país (tres dígitos).
 - MNC: Corresponde al código de la red móvil u operador (2 o 3 dígitos)
 - MSIN: Conformado por 9 o 10 dígitos dependiendo de la región.

Este número sirve para poder indicar las QoS que son aplicadas a cada usuario y también para realizar una autenticación con la que se puede saber si el usuario tiene acceso a la red o no. Con este número también se indica la cantidad que tiene que pagar cada usuario dependiendo de los servicios que contrató al operador.

- IMEI: Es un número de 15 dígitos que es colocado por el fabricante, no se puede cambiar y es único. Sirve para que el sistema pueda tener un control sobre el equipo ya que proporciona diferentes datos, por ejemplo: su ubicación del dispositivo, se puede detectar con ayuda de una base de datos si el equipo fue robado y si es el caso negarle el acceso a la red, etc.

Una diferencia entre el número IMSI y el número IMEI es que este último no tiene ninguna relación con ningún operador. La figura 13 representa cómo se conforman ambos números:

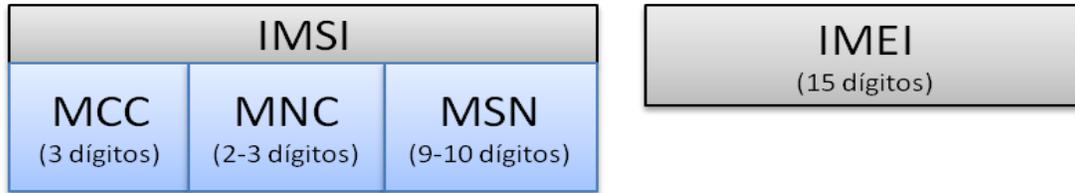


Figura 13. Número IMSI e IMEI [25].

- Globally unique temporary identity (GUTI) [26]: Este número es asignado al UE por parte del sistema a través del mobility management entity (MME) que es un componente perteneciente al mismo sistema (más adelante se dará una explicación de su funcionamiento). El objetivo de este número es proporcionar una mayor seguridad a los usuarios dentro de la red. Al momento de encender el teléfono celular, se manda un mensaje con nuestro IMSI. Este servirá para que la red realice una autenticación y permita el acceso al sistema. Posteriormente la red envía un mensaje con un número GUTI, este solo será de forma temporal, de tal manera que el UE quedará registrado con este número y cuando quiera acceder a la red lo hará mediante el número GUTI. Este número se cambiará las veces que sean necesarias. Está conformado por varios elementos:
 - Globally unique mobility management entity identifier (GUMMEI) [25]: Este indica cual fue el MME que se encargó de realizar la asignación del número GUTI y está constituido por varios elementos los cuales son:
 - Public land mobile network identifier (PLMN ID): Se constituye por dos elementos: el MCC que corresponde al código de país y el MNC que corresponde al código del operador. Una vez que es identificado, una PLMN ofrece diferentes servicios como por ejemplo: llamadas de emergencia, llamadas de voz, mensajes cortos, etc. Por lo tanto se puede decir que cada operador cuenta con una diferente PLMN ya que está conformada por los servicios que cada uno de estos nos ofrece.

- MME identifier (MMEI): Este se constituye de dos elementos: el MME group ID (MMEGI) siendo el identificador del grupo donde pertenece el MME y el MME code (MMEC) que corresponde al código del MME.
- MME temporary subscriber identity (M-TMSI): Sirve para identificar al usuario dentro del MME.

La figura 14 ayudará a comprender de mejor manera como está conformado el número GUTI:

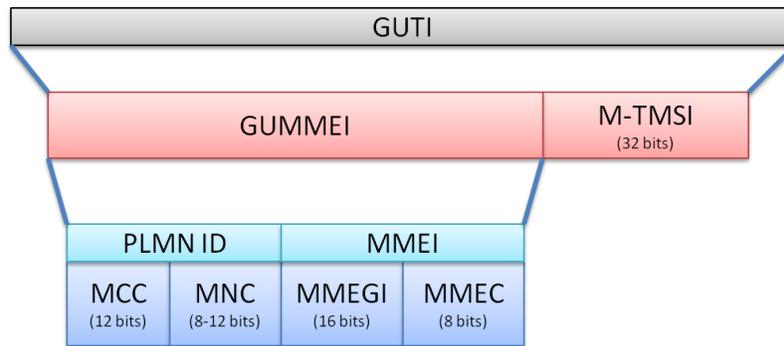


Figura 14. Elementos que conforman al número GUTI [25].

El número GUTI es demasiado largo por lo que en caso de ser posible se manda el número S-TMSI. Que solamente contiene la parte de MMEC y M-TMSI y es usado para solicitar un servicio.

- Red de acceso E-UTRAN: En esta generación a las radiobases se les conoce como eNB. Son una evolución de las radiobases usadas en 3G para poder soportar las funcionalidades de LTE que son [8]:
 - Gestión de recursos de radio: Se encarga de la asignación y el control de los recursos de radio ya sean enlaces UL o DL para que la transmisión de paquetes se haga de forma ordenada.
 - Selección del MME que será asociado al UE.
 - Enrutamiento de los datos de usuario hacia el SGW.
 - Clasificación de paquetes y aplicación de políticas de calidad (QoS).
 - Protección de datos.
 - Compresión de datos.

Para poder entender de mejor manera el funcionamiento del sistema a continuación se dará una explicación de dos nuevos términos que se implementaron en el sistema LTE que son [24]: el plano de usuario y el plano de control. Estos términos se realizaron para tener una mejor organización de los protocolos utilizados que permiten la comunicación y el flujo de paquetes de forma correcta. En el plano de usuario se encuentran todos los protocolos que son utilizados para el envío de tráfico de un usuario o de la información que es de su interés. En el plano de control se encuentran

todos los protocolos que se encargan de los mensajes utilizados para la señalización entre los elementos del sistema.

Los equipos de usuario tienen comunicación con las eNB, mediante la interfaz Uu [8]. Esta interfaz está basada en las siguientes técnicas de acceso al medio OFDMA para el enlace descendente (DL) y SC-FDMA para el enlace de ascendente (UL). Es de tipo aérea y está dividida en tres capas que corresponden a las capas del modelo OSI [24].

La capa física se encarga de todas las funciones relacionadas con el procesamiento de la señal, como son la codificación y decodificación, modulación y demodulación, etc. Posteriormente encontramos a la segunda capa que es la de enlace y está conformada por tres protocolos: MAC, RLC y PDCP. El protocolo medium access control (MAC) es el que se encarga de llevar un control de bajo nivel de la capa física, basándose en la programación de las transmisiones entre el equipo de usuario y la estación base. El protocolo radio link control (RLC) es el que se encarga de mantener la conexión entre dos equipos de usuario, logrando que la entrega de la información se realice de forma correcta. El funcionamiento del protocolo RLC entrará al momento de estar realizando una llamada o una videoconferencia, se encargará de la corrección de errores, reordenar la entrega de paquetes y detectar posibles duplicaciones. Por último el protocolo packet data convergence protocol (PDCP) tendrá diversas funciones dependiendo si es el plano de usuario o el plano de control y de igual manera lleva a cabo las funciones de transporte de alto nivel. En el caso del plano de usuario se encarga de las retransmisiones, detección de duplicados, compresión, seguridad etc. En el caso del plano de control se encarga de la seguridad, protección de la información, detección de duplicados y retransmisiones.

Por último tenemos a la capa de Red. Esta capa tiene diferentes funciones dependiendo si es el plano de usuario o el plano de control. Para el caso del plano de usuario cada elemento de la red está asociado con una IP y se utiliza el protocolo IP para enrutar la información de un elemento a otro. Para el caso del plano de control se encuentra el protocolo radio resource control (RRC) que se encarga de controlar el enlace de radio y tiene funciones como son [27]: el envío y control de informes de medidas del UE, handover, selección y reelección de la celda del UE, tratamiento de errores de los protocolos, calidad de servicios, etc.

La figura 15 se puede observar las tres capas anteriormente descritas junto con sus protocolos correspondientes:

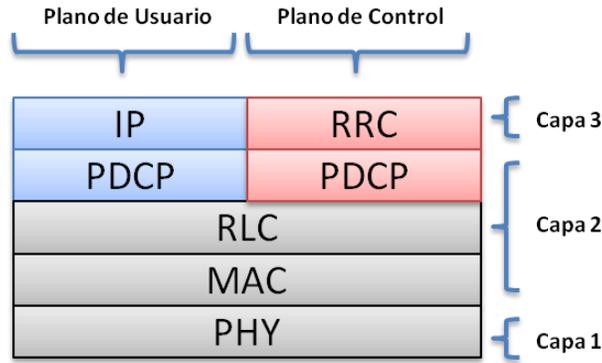


Figura 1.5. Pila de protocolos correspondientes a la interfaz Uu [24].

Posteriormente, las eNB se comunican entre ellas mediante la interfaz X2. De igual manera que en la interfaz Uu existe una pila de protocolos que se encarga de controlar el plano de usuario y otra el plano de control. La pila de los protocolos de ambos planos son similares a los de la interfaz Uu hasta la capa 3 y en la capa 4 que corresponde a la capa de transporte comienzan a cambiar de la siguiente manera:

- En el plano de usuario el protocolo consecutivo al protocolo IP [24], es el protocolo user datagram protocol (UDP). Este protocolo simplemente se encarga de enviar los datos de un elemento a otro, se utiliza debido a que evita el retraso de datos. A continuación se encuentra el protocolo GPRS tunneling protocol (GTP). En el plano de usuario se le conoce como GTP-U su función principal es encapsular el paquete IP para que pueda ingresar a la red central y a su vez los paquetes puedan salir a otras redes externas. Esto funciona de la siguiente manera; una vez que ingresa un paquete IP a la red, este contiene la dirección IP del equipo de usuario y la dirección destino que corresponde a una dirección IP de una red externa. Al momento de que este paquete ingrese a la red central EPC, se encapsula dándole una dirección IP de origen que será la del serving-gateway (S-GW) y una dirección IP destino que corresponde al P-GW (más adelante se dará una explicación de la función de estos dos elementos de la red central) con esto se indica hasta donde tiene que llegar el paquete dentro de la red central. Dicho de otra manera se le indica el camino que debe seguir y a este camino se le conoce como “túnel” y es por donde viaja el paquete transmitido.
- En el caso del plano de control el protocolo siguiente al protocolo IP se encuentra el protocolo stream control transmission protocol (SCTP). Su función principal es garantizar que los paquetes lleguen sin errores a su destino y detectar cuando alguno de estos se pierda, se desordene o se duplique y en caso de ser necesario se indique que la realización de retransmisiones necesarias. Esto lo logra debido a que antes de realizar cualquier transmisión se establece una conexión entre los dos extremos en donde se realizará la comunicación.

Posteriormente encontramos el protocolo S1 application protocol (S1AP) este se encuentra tanto en la pila de protocolos del plano de control perteneciente a las interfaces X2 y S1. Primeramente se debe de mencionar que las eNB tienen

comunicación con dos elementos de la red central los cuales son el MME y S-GW (más adelante se explicará con más detalle estos elementos).

La interfaz S1 se divide en dos partes. La primera corresponde a la pila de protocolos del plano de usuario llamada S1-U y la segunda a la pila de protocolos correspondiente a el plano de control llamada S1-MME. El protocolo S1AP se encargará de la gestión de los mensajes de control entre las eNB y MME que se comunicaran por medio de la interfaz S1-MME que funciona de la siguiente manera [28]. Cada eNB tiene conectados varios equipos de usuarios (UE) y solamente el sistema cuenta con una interfaz S1-MME, por lo tanto hay que diferenciar cada mensaje S1AP proveniente de cada UE, para esto las eNB asignan un identificador conocido como eNB UE S1AP ID a cada UE. Por otra parte un MME tiene conectados varias eNB y a su vez cada que llega un nuevo mensaje de control de un UE al MME este asigna un identificador llamado MME UE S1AP ID. La asignación de estos identificadores por separado se realizará durante la primera conexión. Por lo que en las próximas conexiones para el intercambio de mensajes entre el eNB y el MME, cada mensaje S1AP contará con una combinación de ambos identificadores asignados por la eNB y el MME. En la figura 16 se muestra lo descrito anteriormente:

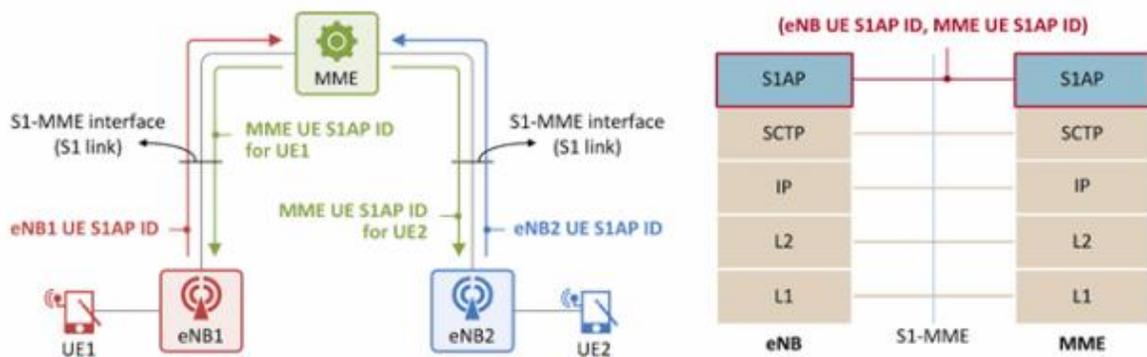


Figura 16. Asignación de identificadores para los mensajes de control S1AP entre las eNB y los MME [28].

La interfaz S1-U tiene la misma pila de protocolos de plano de usuario que la interfaz X2 y esto se puede observar en la siguiente figura 17:

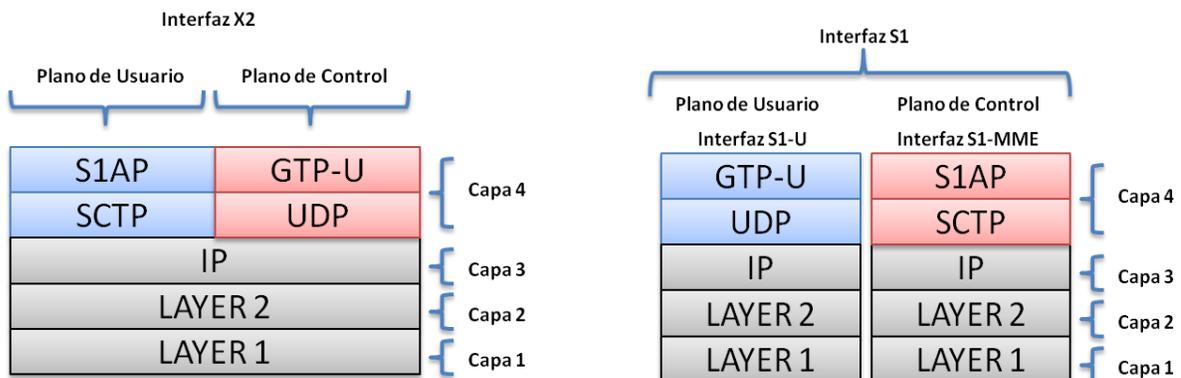


Figura 17. Pila de protocolos tanto del plano de usuario como el plano de control correspondientes a las interfaces X2 y S1 [28].

- Red central EPC: Es una red cuya distribución de la información se basa en el protocolo IP y está fundamentada bajo los siguientes principios [8]:
 - Utilizar protocolos basados en IP en todas sus interfaces.
 - Existe una separación de la información que se denomina plano de control que se encargará de la información de control de la red y plano de usuario para la información de los usuarios.
 - Existen varios puntos los cuales permiten la conexión con otras redes 3GPP y eNB.

En la red central EPC contamos con 3 elementos principales que son [24]:

- MME: Es el encargado del plano de control de la red EPC. Dentro de sus funciones se encuentran: autenticar, autorizar y seleccionar cuales redes externas serán utilizadas para establecer las conexiones con los UE. También se encarga de administrar la movilidad de los UE mediante mensajes de señalización al momento de realizar los handover, de la localización de los UE, etc.
- Packet data network gateway (P-GW): Su función principal consiste en dar conectividad a los usuarios a redes externas como por ejemplo, el Internet o subsistemas multimedia IP. Otra de sus funciones son: la asignación de direccionamiento IP a cada UE, verificar el cumplimiento de políticas y el filtrado de paquetes.
- Serving-gateway (S-GW): Su funcionamiento inicia al momento en el que los usuarios comienzan a moverse de eNB y es el encargado de enrutar a los paquetes ya sea dentro del mismo sistema u otra tecnología perteneciente al grupo 3GPP como lo es GSM/UMTS.

Existen otros elementos de la EPC como son:

- Policy and charging rules function (PCRF): Es el responsable de aplicar y de asegurarse que se cumplan todas las políticas de la calidad de servicios de cada usuario.
- Home subscriber service (HSS): Dentro de este podemos encontrar al HLR y al AuC que tienen la misma función que en las anteriores tecnologías.
- Entre otros.

La comunicación entre estos elementos de la red central se realiza por medio de interfaces como ya se ha mencionado anteriormente y cada una de estas tiene su propia funcionalidad y característica. Los MME se comunican entre ellos mediante la interfaz S10 y la comunicación del MME con S-GW se hace mediante la interfaz S11. Una de las funciones principales de la interfaz S11 es establecer la sesión del UE con la red que posteriormente se encargará de administrarla. También identifica la movilidad del usuario para que sea notificado al S-GW. Todo lo mencionado anteriormente lo realiza mediante el protocolo GTPv2-U.

La comunicación entre el S-GW y el P-GW se realiza mediante la interfaz S5/S8, esta interfaz consta de una pila de protocolos asignados al plano de usuario y otra al plano de control. En el plano de usuario se utilizan dos protocolos el GTP-U y el Proxy mobile IP (PMIP). El protocolo GTP-U se encargará de las funciones de creación,

3.2.2 Técnicas de acceso al medio

Cada una de las generaciones de telefonía celular que fueron apareciendo han tenido sus propias características y una de ellas fue la técnica de acceso al medio que utilizan.

A lo largo del tiempo la demanda de los servicios ofrecidos por la telefonía celular se ha incrementado considerablemente y por esta razón cada uno de operadores tiene la tarea de aprovechar al máximo la banda de frecuencia del espectro radioeléctrico que le corresponde por lo que las técnicas de acceso al medio juegan un papel importante en esta tarea.

3.2.2.1 FDMA

Esta técnica fue utilizada en la primera generación de telefonía celular [29]. Principalmente consiste en dividir una banda de frecuencia cuyo ancho de banda será menor que el ancho de banda de frecuencia original. Estas bandas serán asignadas a canales donde cada uno de estos corresponderá a un usuario ya sea para la transmisión de datos o recepción de estos.

La información será enviada en forma de bits. Estos bits se agruparán en símbolos para que puedan ser transmitidos y cada uno de estos símbolos será asignado en un canal que fue asignado a un usuario. La figura 20 representa lo antes mencionado:

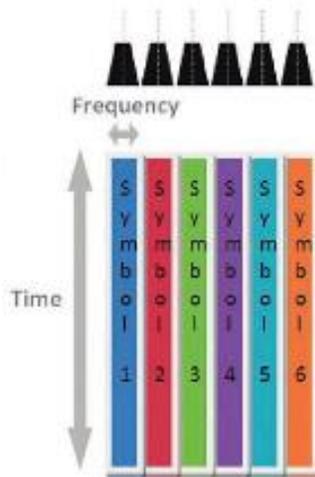


Figura 20. Transmisión de símbolos utilizando FDMA [30].

El uso de FDMA como técnica de acceso al medio trae consigo desventajas:

- Al momento de realizar la asignación de frecuencia a cada uno de los canales para evitar la interferencia se tiene que dejar un ancho de banda sin utilizar, por lo tanto se estarán desperdiciando recursos.
- Se necesita un transmisor y un receptor diferente para cada canal.
- No se puede variar la tasa de transmisión de datos.
- Si los canales tiene un ancho de banda reducido serán muy susceptibles a interferencias.

3.2.2.2 TDMA

Con la llegada de la segunda generación de telefonía celular apareció la técnica de acceso al medio TDMA [29]. Básicamente consiste en asignar intervalos de tiempo a cada usuario en una misma frecuencia para que puedan transmitir o recibir información y de esta manera se realiza de forma más eficiente el uso del espectro.

A los intervalos de tiempo se les denomina time slots. En GSM se agrupan 8 time slots y se les llama "trama". A cada usuario se le asigna un time slots por lo que en el sistema GSM pueden transmitir 8 usuarios en un misma frecuencia.

Una trama tiene una duración de 4.615 [mseg] por lo tanto cada time slots tiene una duración de 576.92 [μ seg]. En cada time slots podemos enviar un total de 148 bits, que no todos son utilizados para el envío de información, sino que varios de estos bits tienen otras funciones. Primeramente tenemos 3 bits que se encargan de indicar el inicio del time slot, seguidos de 57 bits de información, 2 bits de indicadores, 26 bits de sincronización en tiempo, otros 57 bits de información, 3 bits que indican el fin del time slots y finalmente contamos un tiempo de guarda con una duración de 30.46 [μ seg]. En el tiempo de guarda no se transmite nada, esto es con el fin de evitar interferencias con la transmisión del siguiente time slot. Esto se puede observar en la figura 21:

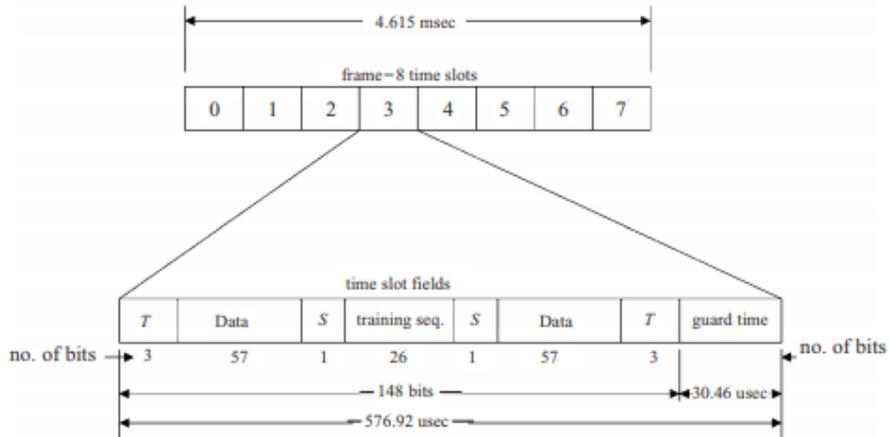


Figura 21. Estructura de una trama GSM [29].

En GSM se puede decir que se utiliza un sistema FDMA/TDMA debido a que todo el espectro que es asignado a esta tecnología se divide en bandas de frecuencias y a cada una de estas se aplica el sistema TDMA por separado como se observa en la figura 22:

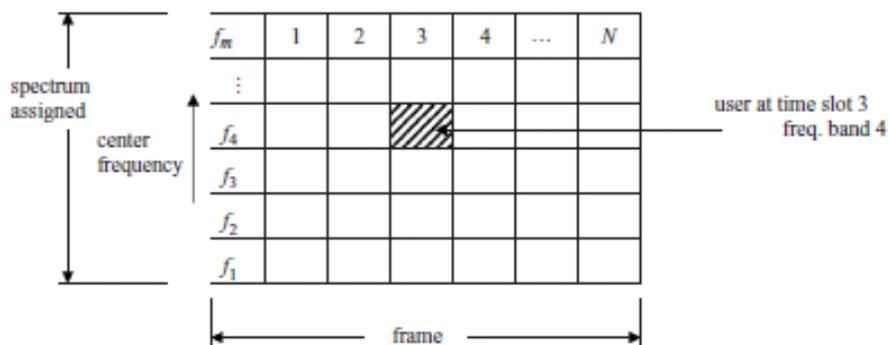


Figura 22. Asignación de frecuencias utilizando las técnicas de acceso al medio FDMA/TDMA en GSM [29].

Esta técnica de acceso al medio FDMA/TDMA, tiene ventajas como:

- Se realiza un mayor aprovechamiento del espectro.
- Permite la variación de velocidad en la transmisión de datos, ya sea asignando un mayor número de intervalos de tiempo o disminuyéndolos a cada usuario.
- Solo se necesita un transmisor para todos los usuarios.

También esta técnica de acceso al medio presenta desventajas como:

- Es necesario contar con precisión en la sincronización, que puede elevar el costo del sistema.
- Los elementos que lo componen deben de ser de banda ancha lo que puede provocar que sean muy costosos.

- Dentro de la capacidad de información que se puede mandar utilizando esta técnica de acceso al medio, parte de ella se debe de ocupar para la señalización y sincronización.

3.2.2.3 CDMA

Esta técnica de acceso al medio también fue utilizada en la segunda generación de telefonía celular y a diferencia de TDMA este último se utiliza en los sistemas IS-136 o D-AMPS y code division multiple access (CDMA) se utiliza en el sistema IS-95. El funcionamiento de CDMA [31] permite que varios usuarios transmitan a la vez en un mismo canal, sin necesidad de dividir el espectro como en FDMA o el tiempo como en TDMA.

En CDMA a cada transmisor se le coloca un código, que es ortogonal a los demás códigos que son asignados a otros transmisores (UE) y de esta manera la estación base puede diferenciar y seleccionar las señales que está recibiendo. Este sistema permite que múltiples usuarios transmitan a la vez en un mismo canal. Para prevenir las interferencias cada canal tiene un límite de usuarios y para evitar llegar a este límite el sistema CDMA cuenta con un control de potencia que es de suma importancia.

La figura 23 muestra comparación de las diferentes técnicas de acceso al medio:

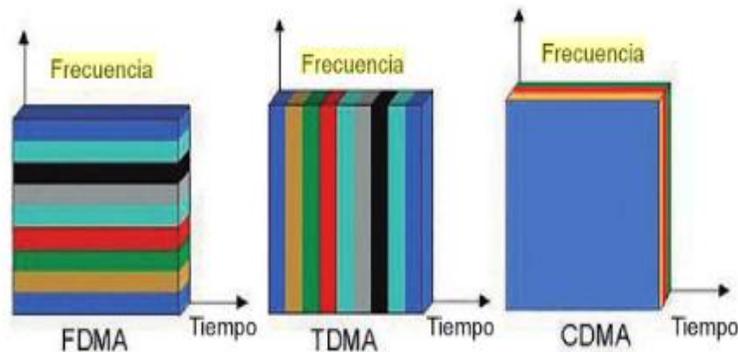


Figura 23. Comparación de la manera en la que realizan la asignación de recursos las diferentes técnicas de acceso al medio [30].

3.2.2.4 OFDMA

La técnica de acceso al medio OFDMA es un caso particular de OFDM [24]. Es utilizada en la cuarta generación de telefonía celular (4G) para el enlace DL y para el enlace UL se usa SC-FDMA que de igual manera es un caso particular de OFDM. La transmisión de la información se realiza agrupando en bloques a los símbolos y cada uno de estos se asigna a una subportadora. Cada subportadora cuenta con un ancho de banda muy limitado por lo que solamente se pueden enviar pocos bits de información. Lo que hace eficiente esta técnica de acceso es que a cada usuario se le asigna una determinada cantidad de subportadoras dependiendo de la información que necesite transmitir por un tiempo determinado y con esto se logró aumentar considerablemente las tasas de transmisión. También esta forma de asignación de las subportadoras nos ayuda a tener velocidades variables y de esta manera se realiza un mejor aprovechamiento de los recursos radioeléctricos.

En OFDM cada subportadora es ortogonal a las demás y esto trae como consecuencia un traslape mostrado en la figura 24:

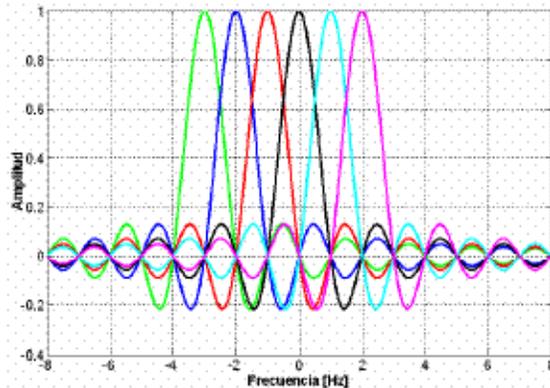


Figura 24. Espectro de una señal OFDM donde podemos observar 6 portadoras [32].

Este traslape ayuda a eliminar las interferencias entre cada una de las portadoras, con lo que se logra una mayor eficiencia espectral ya que no es necesario que exista una separación entre las subportadoras como en el de FDMA. Para que una subportadora sea ortogonal a otra, la separación que debe de existir entre ellas en frecuencia debe ser el inverso de la duración del símbolo y una vez cumpliendo esta condición se logrará que las subportadoras no interfieran entre si y sus portadoras adyacentes se anulen entre sí. En LTE la duración del símbolo es de 66.7 [μseg] por lo que la separación entre cada una de ellas es de 15 [KHz], logrando una velocidad de transmisión de 15 [Kbps] pero en la práctica se llega a alcanzar 14 [Kbps] debido a que se introduce un intervalo de guarda en tiempo.

El intervalo de guarda o el periodo cíclico (en inglés Cyclic Prefix) se agrega debido a que durante la transmisión de los datos se presenta un efecto llamado efecto Doppler [30]. El efecto Doppler aparece al momento en el que el transmisor y receptor comienzan a variar su distancia provocando un desplazamiento en la frecuencia de la señal recibida por el receptor y este desplazamiento genera desvanecimientos profundos. Un desvanecimiento profundo provoca la pérdida de una parte de la señal, es decir, en algún punto de la señal se presentará una disminución de potencia por lo que ya no será posible que sea reconocida por el receptor.

Otra razón por la que se agrega este intervalo de guarda es debido al efecto multitrayecto. Cuando la señal es enviada existen factores en el medio que producen duplicaciones de la señal que a su vez todas estas son recibidas por el receptor, provocando interferencia y distorsión en la señal de inicio.

El periodo cíclico [30] se coloca antes de cada símbolo a transmitir. Su duración depende de la distancia a la que se encuentre el receptor del transmisor así como también de la duración del símbolo y durante este tiempo el receptor no recibirá ninguna señal. Si la duración de lo que tarda en llegar la señal inicial y su repetición es menor a la duración del periodo cíclico, la información útil de ambas señales coincidirá dentro del tiempo útil del símbolo por lo que se evitará que haya interferencia intersímbolo. Aunque puede existir la posibilidad de que un símbolo se vea afectado por la llegada retardada de sí mismo por lo que habrá una interferencia intrasímbolo.

La técnica de acceso al medio OFDM también se ve afectada por la PAPR. La peak to average power ratio (PAPR) es la relación de potencia pico a promedio. Como se sabe OFDM se basa en el envío de múltiples subportadoras en un periodo de tiempo determinado por lo que en muchas ocasiones y por otros factores estas subportadoras llegan a tener un desfase. Este desfase nos provoca una disminución considerable en la potencia de la señal, por lo que de igual manera que los desvanecimientos profundos ocasionados por el efecto Doppler en este caso también la señal ya no podrá ser reconocida por el amplificador. De esta forma se puede presentar el caso contrario en el cual la señal puede llegar a presentar un aumento en potencia por lo que puede ocasionar una saturación en el amplificador y a su vez una distorsión en la señal. En la figura 25 se puede observar en la parte izquierda todas las subportadoras se encuentran en fase por lo que en la señal OFDM no se produce ningún problema generado por el efecto PAPR. En la parte derecha se presenta un desfase en cada una de las subportadoras por lo que en la señal OFDM se presenta el efecto PAPR y este se puede visualizar claramente en la amplitud de la señal.

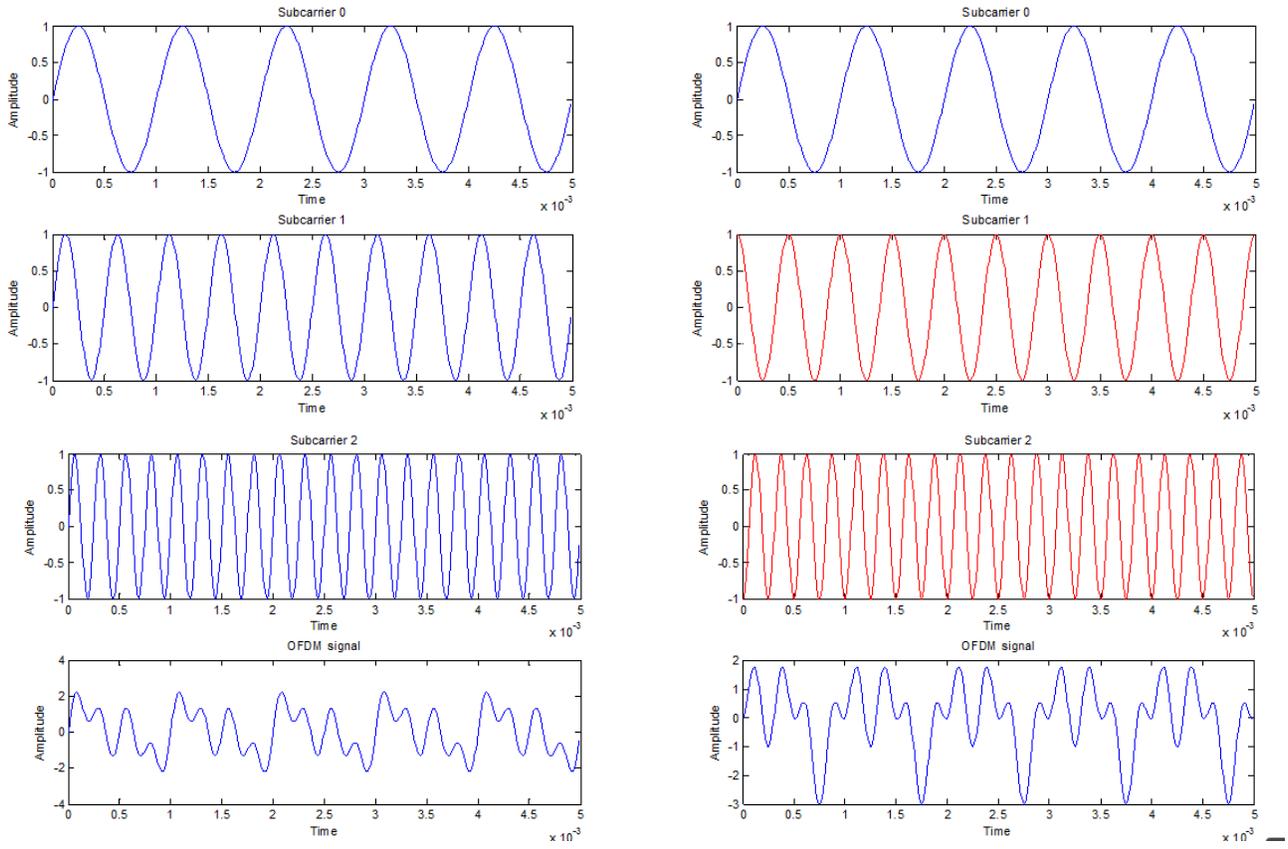


Figura 25. Efecto PARP en la señal OFDM [33].

El proceso que se realiza en OFDM para la transmisión y recepción de datos es el siguiente [34]:

- Primero se tiene a la entrada los datos de información en bits ya previamente codificados que ingresan en serie para que posteriormente sean agrupados en símbolos de n número de bits y ordenados en forma paralela para que puedan ser modulados o mapeados utilizando ya sea la modulación PSK o QAM. A la salida del modulador se obtendrán símbolos representados de forma compleja (con una amplitud y fase). El siguiente paso será aplicar en cada uno de estos la transformada rápida de Fourier inversa que se encargará de asignarlos a diferentes subportadoras que serán ortogonales entre sí para lograr disminuir la interferencia intersímbolo y otro trabajo de esta sección es dividir el ancho de banda en N subportadoras. A la salida de este bloque tendremos varias señales en el dominio del tiempo por cada símbolo o grupo de símbolos. Posteriormente pasaran de forma paralela a serial y se les agregará un tiempo de guarda al inicio de cada símbolo. Por último pasarán por un convertidor de digital a analógica logrando una señal en banda base en donde finalmente será modulada en RF para que pueda ser transmitida.

En el receptor se realiza el mismo proceso pero en forma invertida que en el transmisor. La señal recibida se pasa a una señal en banda base, posteriormente se envía a un convertidor analógico/digital, se elimina el tiempo de guarda, los datos pasan de ser ordenados de forma serial a paralela, se aplica la transformada rápida de Fourier donde se obtendrá a la salida el espectro de la señal. Los datos obtenidos serán demodulados y a continuación se volverán a ordenar de forma serial y finalmente se tendrán los datos en bits codificados.

En la figura 26 se ve el proceso que es realizado por el sistema OFDM para la transmisión y recepción de datos:

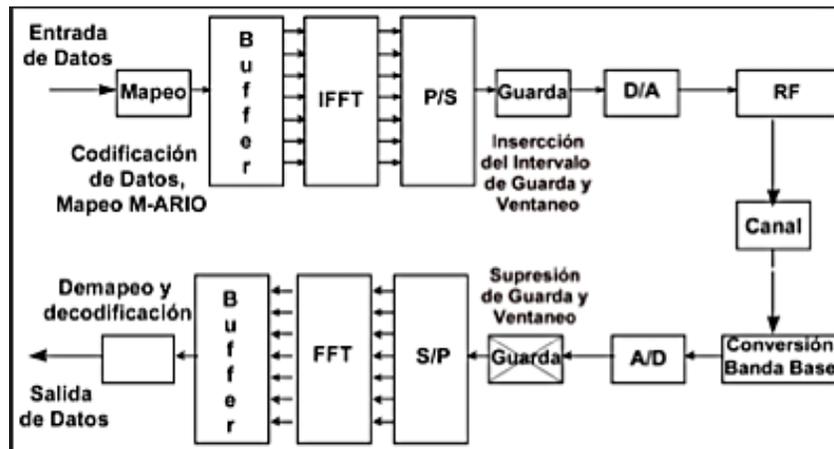


Figura 26. Sistema OFDM [34].

Una de las ventajas de OFDM es:

- Se utilizan técnicas ante los desvanecimientos profundos por lo tanto se podría decir que es resistente a las multirayectorias.
- Uso eficiente del espectro radioeléctrico.
- Eliminación de las interferencias intersímbolos.
- Implementación relativamente simple debido al uso de inverse fast fourier transform (IFFT) y fast fourier transform (FFT).

En cuanto a las desventajas se presentan:

- Los errores en frecuencia y en fase nos provocan diversos problemas.
- Los sistemas OFDM pueden llegar a sufrir un alto PAPR.
- Se necesita una alta sincronización en frecuencia y tiempo.
- El efecto Doppler afecta la ortogonalidad de las subportadoras.

3.2.3 Modos de transmisión

El sistema LTE cuenta con flexibilidad en cuanto al uso del espectro para poder transmitir y hacer un uso eficiente. En este sistema contamos con dos modos de transmisión el FDD y TDD [35]:

- Modo de transmisión FDD: Se indica que la transmisión del enlace DL y UL se realiza en dos frecuencias diferentes con una separación entre ellas para evitar las interferencias.
- Modo de transmisión TDD: A diferencia de FDD la transmisión de los enlaces DL y UL se realiza en la misma frecuencia pero en intervalos de tiempo.

Esto se muestra en la figura 27:

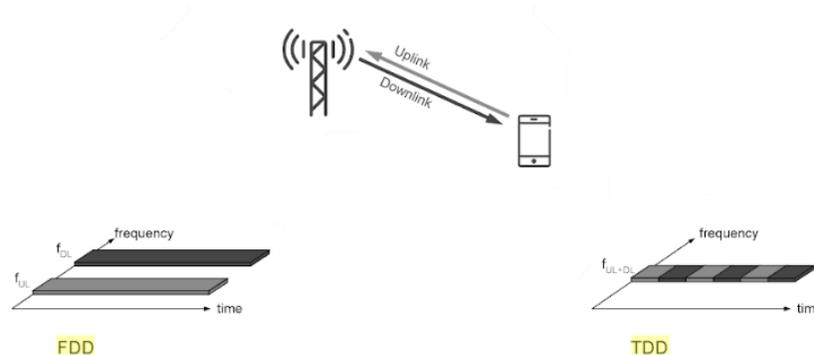


Figura 27. Modos de transmisión FDD y TDD [35].

Cada uno de estos modos de transmisión opera de manera diferente por lo tanto pueden ser utilizados en servicios específicos, por ejemplo, el FDD es de mejor utilidad para el servicio de voz o llamadas de voz debido a que en este servicio se presenta un tráfico simétrico. Un tráfico simétrico significa que al momento de realizar una llamada ambas personas intercambian información a la vez y se puede decir que la carga de tráfico tanto en el enlace DL como en el enlace UL es el mismo. En el caso de TDD es utilizado para servicios que presentan un tráfico asimétrico como por ejemplo el servicio a internet. Se dice que es un tráfico asimétrico debido a que es mucho mayor la información que se descarga o se recibe en los dispositivos móviles (mayor tráfico en el enlace DL) a comparación de la información que se envía para solicitar la requerida (menor tráfico en el enlace UL). Aunque también se puede presentar el caso contrario, al momento que se sube un archivo a una página de internet, se presenta mayor tráfico en el enlace UL que en el enlace DL.

3.2.4 Canales de LTE

El sistema LTE está estructurado en diversos canales que se clasifican de la siguiente manera y lo podemos observar en la figura 28 [8] [24]:

- Canales Lógicos.
- Canales Transporte.
- Canales Físicos.
- Canales de Radio.

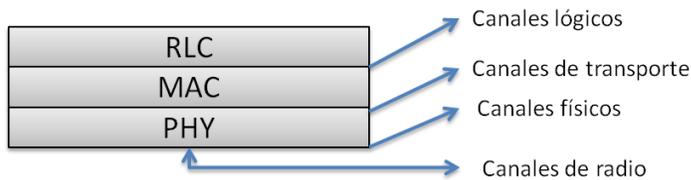


Figura 28. Estructura de los canales utilizados en LTE [24].

3.2.4.1 Canales lógicos

Los canales lógicos se clasifican dependiendo de la información que llevan (de control o de los usuarios) y si son dedicados o comunes.

Los canales lógicos de control llevan los mensajes de señalización. Mientras que los canales lógicos de datos se encargan de los mensajes que contienen información de los usuarios. Los canales lógicos dedicados son asignados a un móvil específico y los canales lógicos comunes pueden ser utilizados por más de un dispositivo.

Algunos canales lógicos se encargan solamente de enviar información del enlace DL, otros envían información de ambos enlaces tanto DL como UL. Los canales lógicos encargados de la información DL son los siguientes:

- Canales lógicos de control:
 - Canal de control de notificación (PCCH): Se utiliza para enviar información de aviso cuando se realiza la búsqueda de un equipo de usuario en la red, por lo que este mensaje es necesario que se transmita en múltiples celdas.
 - Canal de control de difusión (BCCH): Se utiliza para mandar información del sistema a todos los equipos de usuarios conectados en la red. A su vez estos mensajes están divididos en dos bloques:

- Los MIB (Bloques de información maestra), que contienen información de parámetros importantes como el ancho de banda del enlace DL y el número de antenas de transmisión de eNB.
- Los bloques SIBs (Bloques de información del sistema). Son clasificados desde SIB1 hasta SIB11. Cada uno de estos bloques proporciona diferente tipo de información como por ejemplo, información de configuración de recursos de radio (configuración del control de potencia, frecuencia de la portadora en el enlace descendente, etc.), información común para la reelección de celdas, información relacionada con la celda vecina para la reelección de celda, etc.

Este canal es de suma importancia debido a que el dispositivo debe de saber la situación del sistema antes de conectarse para saber cómo está configurado y así saber cómo ingresar adecuadamente a este mismo.

- Canal de control común (CCCH): Se utiliza para la transmisión de información de control hacia y desde los equipos con los que se realizará una conexión. Este canal también cuenta con el envío de datos UL.
 - Canal dedicado de control (DCCH): Se utiliza para la transmisión de mensajes de control desde y hacia un equipo de usuario, como son los mensajes formados al momento de realizar un handover, control de potencia, entrega, etc. Este canal también cuenta con el envío de datos UL.
 - Canal de control de transporte multicast (MCCH): Este canal se utiliza para la transmisión de mensajes de control que son utilizados para poder recibir y enviar datos del canal MTCH.
- Canales de datos:
 - Canal de tráfico dedicado (DTCH): Se encarga de transportar los datos (información del usuario) desde y hacia un equipo de usuario. Este canal también cuenta con el envío de datos UL.
 - Canal de tráfico multicast (MTCH): Este canal es utilizado para enviar datos multidifusión. Los datos multidifusión son utilizados para proporcionar los servicios de MBMS y gracias a estos servicios podemos disponer de TV en nuestro dispositivo móvil.

La figura 29 muestra la conexión de los canales lógicos con los canales de transporte. Los recuadros azules corresponden a los que se encargan de enviar información en el enlace descendente y los recuadros de color rojo se encargan de enviar información del enlace ascendente.

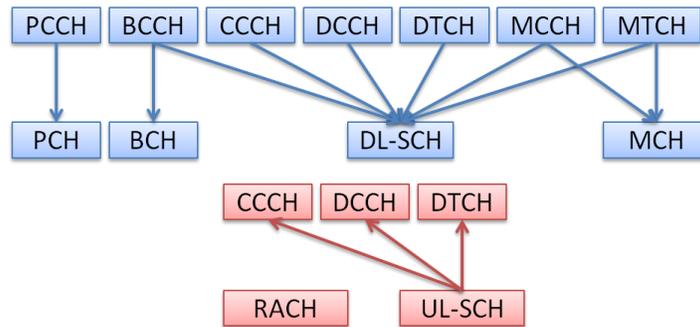


Figura 29. Conexión de los canales lógicos con los canales de transporte [8].

Todos estos canales tienen funciones específicas, los canales lógicos BCCH y PCCH son utilizados para mandar información de control y los canales lógicos CCCH y DCCH se encargan de mandar información de señalización.

Los mensajes de señalización por parte del CCCH y DCCH se clasifican dependiendo de la información que están transmitiendo y son conocidos como SRB. Los signalling radio bearers (SRB) se encargan de enviar mensajes de señalización RRC y NAS. Los mensajes de señalización non-access stratum (NAS) [27] son enviados desde la capa NAS que pertenece a los protocolos de plano de control y estos mensajes sirven para comunicar de forma directa a la entidad MME y UE. Por otra parte como mencionamos anteriormente el RRC es un protocolo que se encarga de controlar el enlace de radio por lo que los mensajes de señalización RRC sirven para comunicar de forma directa a la eNB con el UE y a su vez pertenece a la pila de protocolos de control access stratum (AS). Esto se muestra en la figura 30:

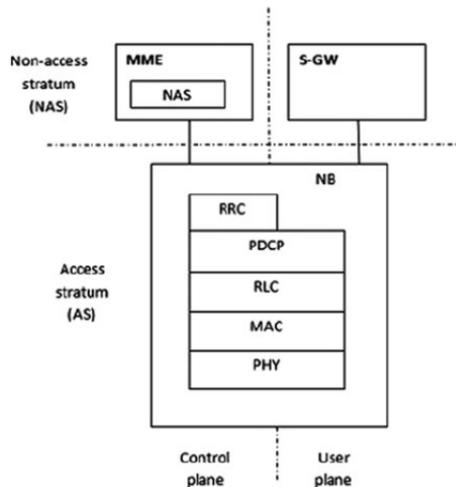


Figura 30. Pila de protocolos de control que pertenecen al AS y los pertenecientes al NAS [36].

Los SRB se clasifican de la siguiente manera:

- SRB0 se utiliza para transmitir mensajes RRC que usan el canal CCCH. Estos mensajes son los encargados de la configuración de la conexión del UE con eNB. Por parte de la eNB se encargan de la solicitud de conexión y reconexión RRC en el enlace DL. Por parte del UE en el enlace UL se encargan de enviar el mensaje ya sea de rechazo o establecimiento de la conexión RRC con el eNB.
- SRB1 se utiliza para transferir mensajes RRC que usan el canal DCCH. Estos mensajes de señalización son los encargados de la reconfiguración de la conexión RRC, la liberación del RRC, entre otros para el enlace DL. Para el enlace UL se encargan de restablecimiento de la conexión RRC, configuración de la conexión RRC completa, envían un informe de medición completo, transferencia de información en caso de que no esté configurado el SB2, entre otros.
- SRB2 se utiliza para transferir mensajes RRC que usan el canal DCCH y encapsula un mensaje NAS de baja prioridad. Estos mensajes son para transferencia de la información tanto UL como DL.

3.2.4.2 Canales de transporte

En los canales de transporte algunos solamente se dedican a enviar información correspondiente al enlace DL y otros al enlace UL. Como dice su nombre se encargan de transportar la información de la capa física hacia la capa MAC y a las capas superiores.

Los canales de transporte encargados de enviar información del enlace DL son:

- Canal de notificación (PCH): Este canal se encarga de transportar los mensajes del canal lógico PCCH y una característica de este canal es que acepta la recepción discontinua (DRX).
La recepción discontinua consiste en que los dispositivos móviles no se encuentran todo el tiempo en estado activo, es decir, no siempre se encuentran conectados a la red para poder recibir información por parte del canal PCH. Sino que solamente en ciertos periodos de tiempo los dispositivos escuchan a este canal, a esto se le llama recepción discontinua. Esto es con el fin de ahorrar la batería de los dispositivos aunque en algunas ocasiones la DRX genera un retraso al momento de establecer una llamada.
- Canal de difusión (BCH): Este canal se encarga del envío de información originada en el canal lógico BCCH. Dicho de otra manera más específica se encarga de enviar los bloques MIB.
- Canal compartido en el enlace descendente (DL-SCH): Este canal es utilizado para transportar los datos de información de diversos canales lógicos de enlace descendente, los cuales son: CCCH, DCCH, DTCH, MCCH, MTCH y algunos mensajes del BCCH como por ejemplo la transmisión de los bloques de información SIBs.
- Canal multicast (MCH): Es el encargado de transmitir la información de multidifusión proveniente de los canales lógicos MCCH y MTCH.

Los canales de transporte encargados de enviar información del enlace UL son:

- Canal de acceso aleatorio (RACH): Este canal es de acceso aleatorio y se utiliza cuando los usuarios quieren acceder a la red y no cuentan con ningún recurso para transmitir.
- Canal compartido en el enlace ascendente (UL-SCH): Se encarga de transportar los datos del enlace UL y es utilizado por canales lógicos que son: CCCH, DCCH y DTCH.

Un dato importante es que los mensajes encargados de transmitir la información del usuario se llaman data radio bearer (DRB). En la figura 29 se observa cómo se conectan los canales de transporte con los canales lógicos.

3.2.4.3 Canales físicos

Se encargan de la sincronización del sistema, la asignación de celdas, de realizar la asignación de los símbolos a las subportadoras, de transportar la información a las capas superiores, etc.

Para poder entender de mejor manera la función de cada uno de estos canales físicos es importante saber que la transmisión de datos es programada en bloques (Resource Block-RB) y cada RB está conformado por elementos de recursos (Resource Element- RE).

El sistema LTE cuenta con canales físicos encargados de la información que se transmite en el enlace DL y otros para el enlace UL. Para el enlace DL se tienen los siguientes:

- Canal físico de difusión (PBCH): Este canal es el encargado de transportar los MIB, para que el UE pueda acceder al sistema. Estos mensajes proporcionan información acerca del ancho de banda del sistema y el número de antenas (configuración MIMO), tipo de prefijo cíclico, identificación de la red, etc.
- Canal físico de control de enlace descendente (PDCCH): Este canal es utilizado para indicarle al equipo de usuario la asignación de recursos que le corresponde tanto en el enlace DL como en el enlace UL y a esta información se le denomina DCI (Downlink Control Information). Dentro de la información DCI que se encuentra el esquema de modulación y codificación utilizado en ambos canales, ajuste del control de potencia del enlace ascendente, información sobre el mecanismo de retransmisión híbrida (HARQ), el prefijo cíclico utilizado, etc.
- Canal físico de indicador del formato de control (PCFICH): Este canal nos sirve para indicar cuál es el número de símbolos que utilizará el canal PDCCH que se indica mediante el channel format indicator (CFI). Este canal proporcionará la información suficiente para que el UE pueda decodificar al canal PDCCH.

- Canal físico de indicador híbrido ARQ (PHICH): Este canal indica al UE el estado del ARQ híbrido y se hace mediante el reconocimiento de los mensajes ACK y NAK.
- Canal físico compartido del enlace (PDSCH): Se encarga de transmitir información al usuario, principalmente los mensajes SIB.
- Canal físico multicast (PMCH): Este canal se encarga de transmitir los mensajes de información MBMS que como mencionamos anteriormente son los encargados de transmitir el servicio de multidifusión.

En el sistema LTE cuenta con canales físicos encargados de transmitir tráfico de información como lo son el PDSCH y el PMCH. Mientras que los demás se encargan de mandar mensajes de control (PHICH, PDCCH, PBCH y PCFICH) para que el UE pueda acceder al sistema y así establecer alguna conexión ya sea con otro usuario o simplemente para acceder a un servicio.

Para la transmisión de información ya sea de control o tráfico del enlace UL se tienen los siguientes canales:

- Canal físico de acceso aleatorio (PRACH): Es un canal de acceso aleatorio y mediante este mismo el UE pide a la eNB que se le asigne un canal de enlace ascendente para comenzar a establecer una conexión con el sistema LTE.
- Canal físico de control en el enlace ascendente (PUCCH): Se encarga de enviar mensajes de control de parte del UE hacia la eNB como son: los mensajes (ACK/NAK) para establecer el reconocimiento HARQ y el indicador de la calidad del canal (CQI). Este canal es capaz de transmitir información de varios usuarios a la vez. La cantidad de recursos que utilizará el canal para transmitir la información correspondiente se indica en el canal PBCH y dependerá del ancho de banda que se esté utilizando.
- Canal compartido en el enlace ascendente (PUSCH): Este canal es de acceso compartido por lo que permite que diversos UE puedan transmitir su información a la vez. Su función es transmitir tráfico del usuario y también datos de control del usuario (RRC).

La figura 31 se encuentra como se relacionan los canales que se describieron anteriormente (canales físicos, canales de transporte y los canales lógicos). Los recuadros de color morado corresponden a los canales físicos, los de color rojo a los canales de transporte y por último los de color azul corresponden a los canales lógicos.

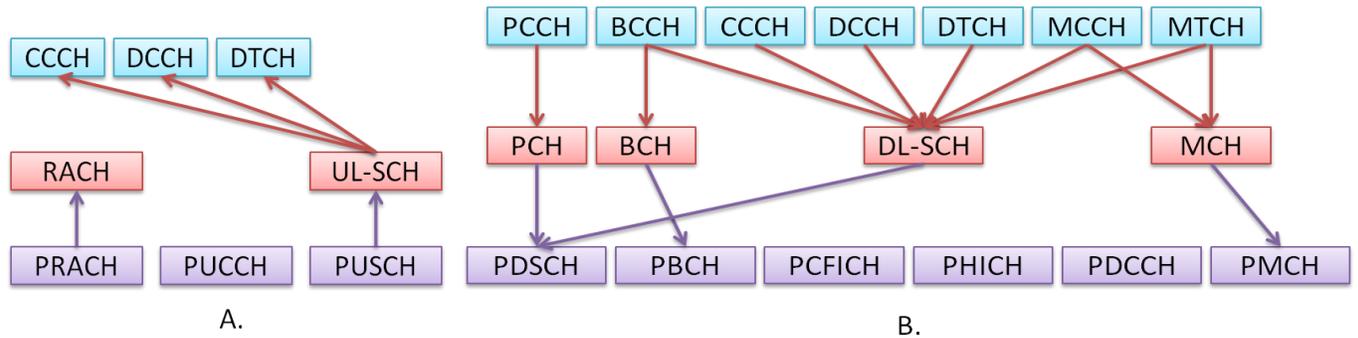


Figura 31. Canales utilizados para el flujo de información en el sistema LTE. A. Enlaces UL B. Enlaces DL [8].

3.2.5 Características de la transmisión del sistema LTE

Así como en los demás sistemas de telefonía celular el sistema LTE cuenta con varias características en cuanto a la forma en la que realiza la asignación de recursos, la estructura de la trama utilizada para el envío de información, la modulación y codificación, etc. Por lo que en los siguientes capítulos se describirá el funcionamiento de cada uno de estos términos importantes.

3.2.5.1 Resource Grid

El sistema LTE se encarga de organizar la información en una red de recursos que a su vez se conforman de Recursos de bloques (RB), los cuales están formados por 12 subportadoras dando un total de 180 [KHz] de ancho de banda. Una de estas subportadoras tiene una duración de .5 [ms] donde se transmiten 7 símbolos que conforman 1 slots. Cada elemento de recurso (o cada símbolo) puede variar el número de bits que lo conforman. Esto dependerá de la modulación que se esté utilizando. Lo antes mencionado se puede observar en la figura 32:

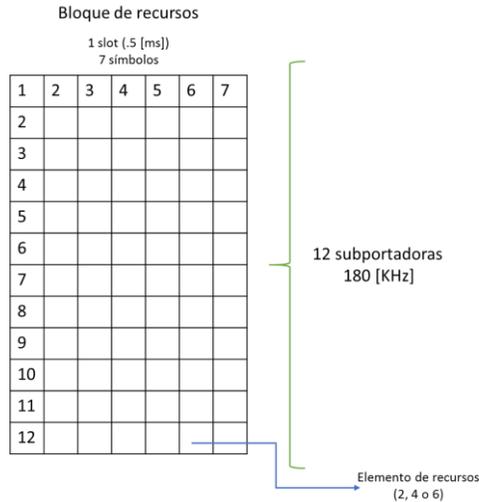


Figura 32. Bloque de recursos utilizado en el sistema LTE [24].

Un bloque de recursos está conformado teóricamente por 84 elementos de recursos pero en realidad son alrededor de 72 debido al prefijo cíclico utilizado en este sistema de telefonía celular.

3.2.5.2 Estructura de la trama LTE

En el dominio del tiempo una trama LTE [19] tiene una duración de 10 [ms]. Esta trama está conformada por 10 subtramas cuya duración de cada una de estas es de 1 [ms] y a su vez cada subtrama se conforma por 2 intervalos de tiempo mejor conocidos como time slots, cada uno tiene una duración de .5 [ms], por lo tanto cada trama de LTE está conformada por 20 time slots.

Cada time slots está conformado por 7 o 6 símbolos dependiendo si se usa el prefijo cíclico normal o el prefijo cíclico extendido (se utiliza cualquiera de los prefijos cíclicos dependiendo de la distancia a la que se encuentre el UE de la radiobase). En el caso de utilizar el prefijo cíclico normal se tienen 7 símbolos en cada time slots donde cada símbolo tendrá una duración de 66.7 [μs] y una duración del prefijo cíclico de 4.7 o 5.2 [μs]. Mientras que en el prefijo cíclico extendido se tienen 6 símbolos por time slots, donde cada símbolo tendrá una duración de 66.7 [μs] y el prefijo cíclico extendido contará con una duración de 16.7 [μs]. En la figura 33 se observa una trama de LTE:

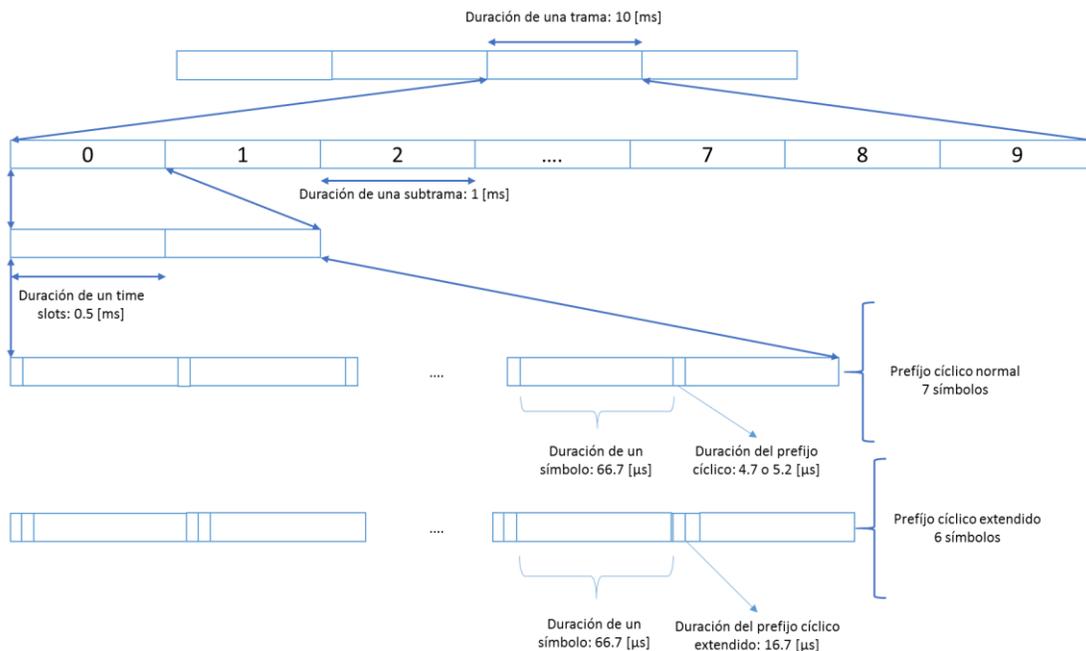


Figura 33. Estructura de una trama LTE [24].

En el LTE se cuenta con dos modos de transmisión FDD y TDD por lo tanto se tienen dos tipos de tramas. El primer tipo de trama corresponde a una transmisión FDD. Esta trama no es flexible por lo que su estructura es representada en el dominio del tiempo de la siguiente manera y hay que recordar que en el modo de transmisión FDD cada enlace se transmite en diferente frecuencia como se observa en la figura 34:

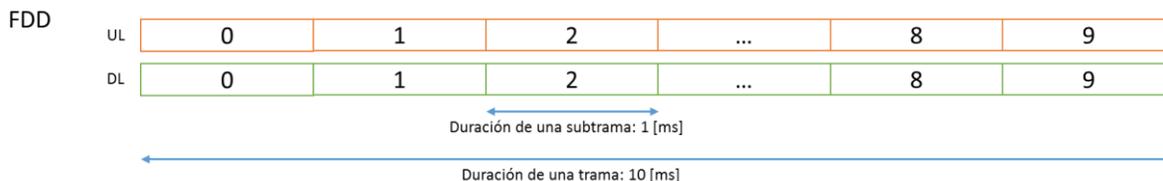


Figura 34. Estructura de una trama en el dominio del tiempo usada en el modo de transmisión FDD [24].

El segundo tipo de trama corresponde a la transmisión TDD que a diferencia de la trama FDD está si es flexible. Esto quiere decir que en una trama TDD se puede modificar cuales subtramas serán dedicadas a transmitir información correspondiente al enlace UL y cuales al enlace DL. Además estas no tienen que ser fijas como en las subtramas FDD. El enlace DL y UL se transmiten en la misma frecuencia y para indicar en qué momento se cambiará de una subtrama DL a una UL existen subtramas especiales que se dividen en tres partes:

- Downlink pilot time slot (DwPTS): En esta sección aún se encuentra información del enlace DL, ocupa un 1 símbolo de la subtrama que sirve como sincronización.
- Guard period (GP): Es un intervalo de tiempo necesario para cambiar la transmisión entre el enlace DL al UL y viceversa. Su longitud depende de las demás secciones (DwPTS y UpPTS).
- Uplink pilot time slot (UpPTS): Este ya se encuentra en el enlace UL, no se puede transmitir información en esta sección debido a su corta duración. Se deja vacío que nos serviría como tiempo adicional para realizar el cambio de enlace DL a UL.

La figura 35 muestra la estructura de una trama en el dominio del tiempo utilizada en el modo de transmisión TDD:

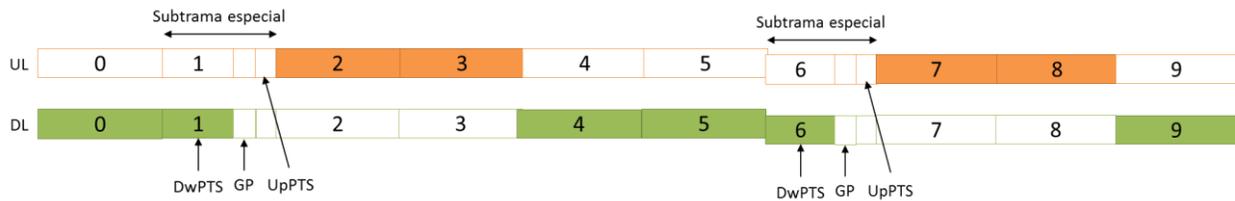


Figura 35. Estructura de una trama en el dominio del tiempo utilizada en el modo de transmisión TDD [37].

Las tramas TDD tienen flexibilidad en cuanto a la asignación de recursos al enlace DL o al UL, por lo que se tienen las siguientes configuraciones que podemos observar en la figura 36. La subtrama 0 de cada trama siempre será utilizada para transmisión del enlace DL al igual que la subtrama 5. La subtrama 1 será utilizada para indicar el cambio de la transmisión al enlace UL y en algunas configuraciones se utilizará la subtrama 6.

Configuración	Subtrama									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Figura 36. Configuraciones de las tramas utilizadas en el modo de transmisión TDD [37].

3.2.5.3 Ancho de Banda, Modulación y Codificación en el sistema LTE

En el sistema LTE se pueden manejar canales con diferente ancho de banda donde cada uno de estos posee sus propias características. Esto se observa en la tabla 8:

Ancho de Banda del Canal [MHz]	Número de RB (Resource Blocks)	Número de subportadoras	Ancho de Banda utilizado [MHz]	Bandas de Guarda [MHz]
1.4	6	72	1.08	2-.16
3	15	180	2.7	2-.15
5	25	300	4.5	2-.25
10	50	600	9	2-.5
15	75	900	13.5	2-.75
20	100	1200	18	2-1

Tabla 8. Características de los diferentes canales del sistema LTE [24].

Por otra parte el sistema LTE [27] se caracteriza por ser un sistema cuya codificación y modulación es adaptable. Esto significa que tiene la capacidad de decidir qué modulación y cuál tipo de codificación utilizar dependiendo de las condiciones del entorno en donde se realizará el intercambio de la información entre el UE y la eNB logrando un mayor aprovechamiento de los recursos radioeléctricos y alcanzando mayores tasas de transmisión.

Las modulaciones que se utilizan en este sistema son: QPSK, 16-QAM y 64-QAM. En cuanto a la codificación, el sistema LTE utiliza dos esquemas de codificación: el convolucional que es aplicado para la información de control y los turbo códigos que se aplican en la información de los usuarios.

El sistema toma la decisión de saber que modulación y tasa de codificación es la más adecuada basándose en el CQI. El channel quality indicator (CQI) es el indicador de la calidad del canal y esta información es enviada del UE a la eNB. Este indicador es de suma importancia ya que dependiendo de este valor serán definidos los recursos que se le asignarán a este canal para realizar el intercambio de información entre el UE y la eNB. En la tabla 9 se puede observar que modulación y que tasa de codificación así como también la eficiencia espectral que es utilizada en cada canal dependiendo del valor del CQI:

Índice CQI	Modulación	Tasa de codificación	Eficiencia [bit/s/Hz]
0	Fuera de cobertura	N/A	N/A
1	QPSK	0.076172	0.1523
2	QPSK	0.117188	0.2344
3	QPSK	0.188477	0.377
4	QPSK	0.300781	0.6016
5	QPSK	0.438477	0.877
6	QPSK	0.587891	1.17558
7	16QAM	0.369141	1.4766
8	16QAM	0.478516	1.9141
9	16QAM	0.601562	2.4063
10	64QAM	0.455078	2.7305
11	64QAM	0.553711	3.3223
12	64QAM	0.650391	3.9023
13	64QAM	0.753906	4.5234
14	64QAM	0.852539	5.1152
15	64QAM	0.925781	5.5547

Tabla 9. Modulación, tasa de codificación y eficiencia utilizada en la transmisión dependiendo del valor de CQI enviado por UE [27].

3.2.5.4 Canal físico de control en el enlace ascendente (PUCCH)

Es un canal físico independiente y se encarga de transmitir la información de control del enlace ascendente. Esta información es llamada UCI. El UCI se va a encargar de transmitir toda la información acerca del UE para que se pueda establecer una conexión con la eNB. Este se divide en tres formatos donde cada uno de estos se encargará de una información de control diferente: el primero se ocupará de la información de estado del canal (CSI), el segundo de las solicitudes de programación (SR) y el último formato de la información de los mensajes HARQ ACK / NACK [35].

- Información de estado del canal (CSI): En este formato se observará información acerca de los reportes indicador de calidad del canal (CQI). Como lo dice su nombre se encargará de indicar la calidad que presenta el canal en el enlace DL. Esto lo especifica mediante un rango que va de 0 a 15 donde 15 significa que se tiene una excelente calidad en la señal del enlace DL. También se encuentra información del indicador de rango (RI), que se encargará de proporcionar un rango de transmisión recomendado. Por último la información del indicador de matriz de precodificación (PMI) que en términos generales nos indica como el flujo de datos es asignado a las antenas (MIMO, más adelante se dará una explicación de lo que significa y en que consiste).
- Solicitudes de programación (SR): Mediante este formato el UE enviará información a la eNB para solicitar recursos PUSCH-PUCCH y así poder enviar mensajes de control y de tráfico de información.
- HARQ ACK / NACK: Mediante este formato se indicará a la eNB si los mensajes que se enviaron de parte de la eNB hacia el UE en el enlace DL se recibieron correctamente. En el caso de que se presente un error el UE pedirá una retransmisión de los datos incorrectos y almacenará los datos correctos.

Así como el UCI se divide en tres formatos de igual manera el canal PUCCH está dividido en diferentes formatos y en cada uno de estos envía una combinación diferente de formatos UCI. Esto se puede observar en la tabla 10 [35]:

Formato PUCCH LTE	No. Bits por subtrama	Esquema de modulación	CP normal	CP extendido
1	-	-	Solicitudes de programación (SR)	
1 ^a	1	BPSK	1-bit HARQ ACK / NACK ó 1 bits HARQ ACK / NACK + SR	
1 ^b	2	QPSK	2-bit HARQ ACK / NACK ó 2 bits HARQ ACK / NACK + SR 4-bit HARQ ACK / NACK ó 4 bits HARQ ACK / NACK + SR	
2	20	QPSK	CSI	CSI + 1 ó 2 bit HARQ ACK / NACK
2 ^a	21	QPSK+BPSK	CSI+ 1-bit HARQ ACK / NACK	-
2 ^b	22	QPSK+QPSK	CSI+ 2-bit HARQ ACK / NACK	-

Tabla 10. Formatos de canal físico PUCCH en LTE [27].

Para que realice la transmisión de datos el canal PUCCH se le asignan dos bloques de recursos (RB) esto con la finalidad de aumentar la capacidad de control-señalización en cada celda. Cada uno de estos RB's pueden ser utilizados por múltiples UE a la vez. Para comprender de mejor forma como se realiza la asignación de recursos para el canal PUCCH se puede observar la figura 37:



Figura 37. Asignación de recursos de los formatos PUCCH en el sistema LTE [35].

3.2.5.5 Canal físico de indicador del formato de control (PCFICH)

El canal físico PCFICH es el encargado de indicar cuantos símbolos serán utilizados por el canal PDCCH. Esto lo indica mediante el CFI cuyos valores son variables debido a que el PDCCH cambia dependiendo de la cantidad de usuarios que requieran establecer una conexión mediante el sistema LTE [39].

Este canal ocupa un total de 16 RE y se transmite en el primer símbolo OFDM de cada subtrama cuya duración es de 1 [ms]. Es modulado mediante QPSK por lo tanto en total abarca 32 bits. El CFI puede tomar valores de 1, 2 o 3 que en binario se representan de la siguiente manera: 1- 01, 2-10 y 3- 11 (El valor número 4 está reservado). Y se codifica utilizando una tasa de codificación de 1/16. Esto quiere decir que por cada bits que entre al codificador se tendrán 16 a la salida, así la explicación de los 32 bits que ocupa este canal físico.

El valor CFI también depende del ancho de banda que se esté utilizando en el canal LTE como se ve en la tabla 11:

Ancho de Banda de Canal [MHz]	1.4	3	5	10	15	20
Valores PCFICH	2, 3 o 4	1, 2 o 3				

Tabla 11. Valores de PCFICH dependiendo el ancho de banda del canal LTE [27].

3.2.5.6 Canal físico de indicador híbrido ARQ (PHICH)

En este canal la eNB puede indicar a los UE si la información fue recibida correctamente basándose en los mensajes de reconocimiento ACK/NACK.

Este canal funciona de la siguiente manera: utiliza una modulación BPSK y un código de repetición con una tasa de codificación de 1/3 (esto significa que por cada bit que entra al código saldrán tres). Cada uno de estos será posteriormente multiplicado por una secuencia. A estas secuencias se les denomina secuencias de Walsh en total se utilizan 8 secuencias complejas con una longitud de 4 para poder multiplexar 8 mensajes (ACK/NACK) de diferentes UE. Como se muestra en la figura 38 y en la tabla 12 se observan las 8 secuencias utilizadas. Las secuencias de Walsh también dependen del prefijo cíclico utilizado ya sea el normal o el extendido.

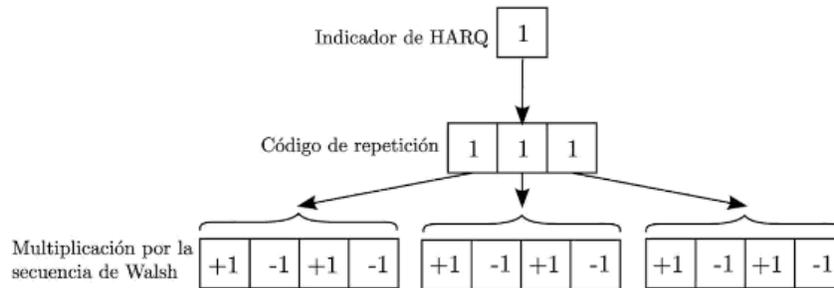


Figura 38. Codificación realizada por el canal PHICH en el sistema LTE [27].

Índice de Secuencia	Secuencias Ortogonales	
	CP Normal (SF=4)	CP Extendido (SF=2)
0	+1,+1,+1,+1	+1,+1
1	+1,-1,+1,-1	+1,-1
2	+1,+1,-1,-1	+j,+j
3	+1,-1,-1,+1	+j,-j
4	+j,+j,+j,+j	---
5	+j,-j,+j,-j	---
6	+j,+j,-j,-j	---
7	+j,-j,-j,-j	---

Tabla 12. Secuencias de Walsh [27].

Un ejemplo del funcionamiento del canal PHICH es el siguiente:

Se tienen cuatro UE a los que la eNB les indicará a cada uno de ellos si el mensaje fue recibido de forma correcta o incorrecta (si le envía un ACK el mensaje fue recibido de forma correcta y en caso contrario le enviará un NACK). En este ejemplo al primer UE se le enviará ACK representado por el número 1, al segundo ACK, al tercero un ACK y al cuarto un NACK representado por el número -1. Cada uno de estos valores será multiplicado por una secuencia de Walsh (Tabla 12) quedando de la siguiente manera:

UE	Valor (ACK/NACK)	Secuencia de Walsh	Resultado
1	1	+1,+1,+1,+1	+1,+1,+1,+1
2	1	+1,-1,+1,-1	+1,-1,+1,-1
3	1	+1,+1,-1,-1	+1,+1,-1,-1
4	-1	+1,-1,-1,+1	-1,+1,+1,-1

Tabla 13. Resultado del ejemplo planteado en el anterior párrafo.

Una vez obtenidos los anteriores resultados el canal PHICH realiza una suma de cada valor dando como resultado la siguiente serie que se puede observar en la figura 39:

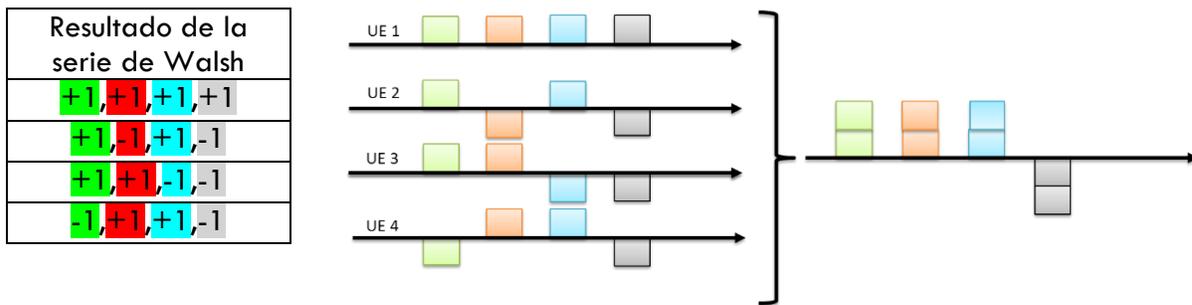


Figura 39. Serie resultante que será enviada a los UE.

La serie resultante será enviada a cada uno de los UE y una vez recibida realiza una multiplicación en donde posteriormente sumará los valores resultantes. Si el resultado final es 1 corresponderá a un mensaje ACK que indicará que el mensaje fue recibido correctamente y si el resultado es -1 corresponderá a un mensaje NACK por lo que el mensaje fue recibido de forma incorrecta en la eNB. Esto se observa gráficamente en la figura 40:

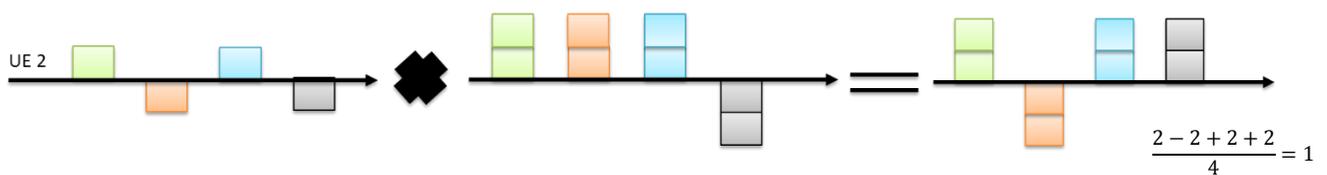


Figura 40. El UE recibe de manera correcta el mensaje por lo que se envía un mensaje ACK.

3.2.5.7 Búsqueda y asignación de celdas

En esta sección se mencionará un término importante que corresponde a la identidad de la célula física (PCI). El PCI es utilizado en el sistema LTE para que la planificación y asignación de celdas se haga de manera automática, esto con el fin de lograr que la red sea escalable. También es utilizado para que los UE puedan diferenciar a cada una de las celdas que se encuentren a su alrededor.

Se cuenta con un total de 504 números de PCI en el sistema LTE y cada uno de estos es agrupado en 168 grupos que van desde 0 hasta el 167, donde cada grupo está conformado por tres identidades únicas identificadas por los números 0, 1 y 2.

Para que un UE pueda realizar una conexión con el sistema LTE [40] lo primero que debe de realizar es una sincronización y esto lo hará mediante dos señales de sincronización que son enviadas de parte de la eNB cada 10 [ms]. Con ayuda de la primera señal de sincronización denominada PSS (señal de sincronización primaria) el UE podrá identificar la frecuencia central del ancho de banda del canal por lo tanto el UE podrá sincronizarse en frecuencia y también podrá reconocer a cualquiera de las 3 identidades únicas (0-2). Posteriormente con la ayuda de nuestra segunda señal de sincronización denominada SSS (señal de sincronización secundaria) el UE podrá sincronizarse en tiempo e identificar el grupo al que pertenece el PCI (0 al 167). También identificará la configuración MIMO que tiene el sistema y la configuración del CP (prefijo cíclico).

Los slots donde son enviadas las señales de sincronización varían dependiendo del modo de transmisión que se esté utilizando en este momento (FDD o TDD) [37]. En el caso de FDD la señal de sincronización PSS se transmitirá en el último símbolo del primer slot de las subtramas 0 y 5. Mientras que el SSS se transmitirá en el penúltimo símbolo del primer slot de las subtramas 0 y 5, dicho de otra manera va antes que el PSS. En el caso de TDD es PSS se transmite en el tercer símbolo del primer slots de las subtramas 1 y 6, mientras que el SSS será transmitido en el último símbolo del segundo slots de las subtramas 0 y 5. Esto se ve en la figura 41:

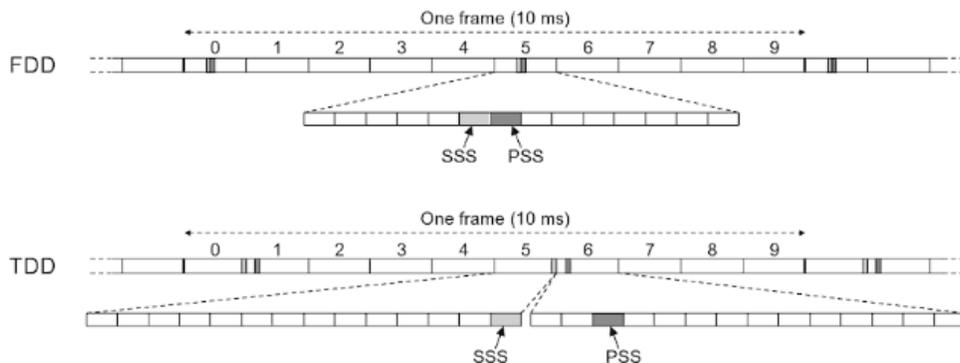


Figura 41. Posición en donde son transmitidas las señales de sincronización en las trama LTE ya sea TDD o FDD [37].

El PCI se calcula de la siguiente manera:

$$PCI = (3 * SSS) + PSS$$

En el sistema LTE solo se cuentan con 504 números posibles de PCI por lo que muchas veces se puede llegar a generar colisiones o confusiones y para evitarlo se tienen señales de referencia para el enlace DL y para el enlace UL [24]. Las señales de referencia son asignadas en diversos elementos de recursos (RE) dependiendo del número de puertos que se tengan en nuestra antena perteneciente a la eNB. Esto funcionará de la siguiente manera: cada puerto de las antenas pertenecientes a la eNB tendrán asignadas ciertas señales de referencia en posiciones determinadas para su transmisión y dichas posiciones serán únicas por cada puerto de la antena y mientras un puerto esté transmitiendo sus señales de referencia los demás puertos permanecerán en silencio. Esto se ve en la figura 42:

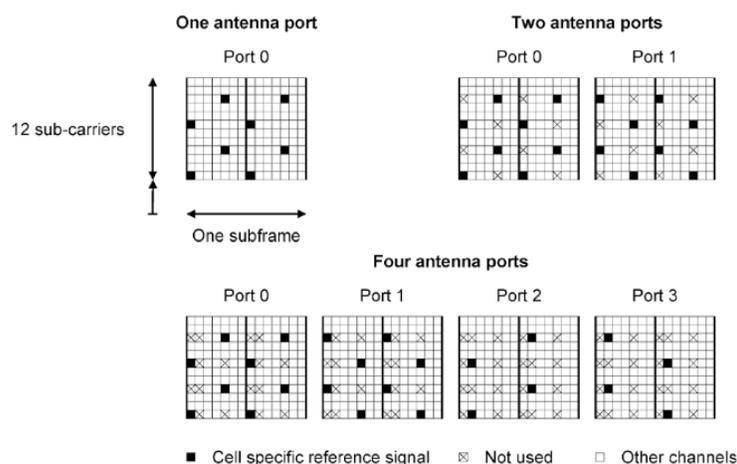


Figura 42. Posición de las señales de referencia de cada uno de los puertos de una antena [24].

Una de las funciones de las señales de referencia son las siguientes:

- Cálculo del *reference signal received quality (RSRQ)* y *reference signal received power (RSRP)* que servirán al momento de tomar las decisiones para la realización de un *handovers*.
- Estimación de canal de radio.

En la figura 43 se observa cómo se realiza la asignación de recursos a los mensajes de sincronización SSS y PSS, así como también las señales de referencia.

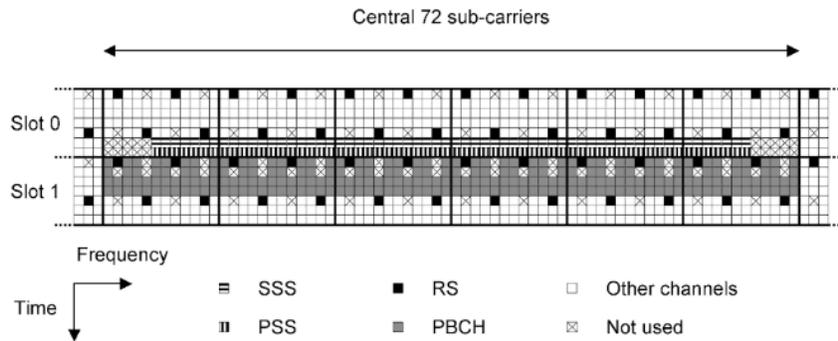


Figura 43. Asignación de recursos [24].

3.2.5.8 Antenas LTE-configuración MIMO

La técnica de configuración MIMO consiste en colocar varias antenas en el transmisor y receptor para conseguir mayores tasas de transmisión y a su vez realizar un mayor aprovechamiento de los recursos radioeléctricos.

Se tienen diversas configuraciones MIMO como son [19], MISO (Multiple-input Single-output) que consiste en que el transmisor cuenta con múltiples antenas y el receptor solo cuenta con una. También se tiene la configuración SIMO (Single-input Multiple-output), en este caso hay una sola antena en el transmisor y el receptor cuenta con múltiples antenas. A los sistemas en los que solamente se usa un transmisor y un receptor se les denomina SISO (Single-input Single-output).

Dentro de las técnicas de configuración MIMO pueden utilizarse varias técnicas que son:

- **Diversidad espacial:** En esta técnica cada una de las antenas transmisoras es enviada la misma señal pero son codificadas de forma diferente, lo que permite al receptor obtener una señal de entrada de mayor robustez. Esto es de gran utilidad para los dispositivos que se encuentran al límite de las celdas, así como también para el reconocimiento de los mensajes de control por parte del receptor.
- **Multiplexación espacial:** En esta técnica cada una de las antenas transmisoras envía una señal con diferente información. En este caso el receptor tendrá la tarea de recibir en cada una de sus antenas la información de tal manera que posteriormente será reorganizada logrando obtener el mensaje original.

Diversos tipos de MIMO:

- SU-MIMO (Single-User MIMO): Básicamente consiste en que el sistema está basado en la conexión punto a punto, dicho de otra manera una eNB se comunica solamente con un solo UE utilizando la configuración en las antenas MIMO.
- MU-MIMO (Multi-User MIMO): En este caso el sistema tiene la capacidad de realizar conexiones punto a multipunto, esto significa que la eNB es capaz de transmitir a múltiples UE a la vez.

Capítulo 4. HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN Y APLICACIÓN

4.1 Introducción

En este capítulo se describe el funcionamiento y aplicaciones de dos herramientas de suma importancia para realizar un estudio de cobertura, que fueron utilizadas durante el desarrollo de este trabajo. Es importante comprender como funcionan para poder utilizarlas de forma correcta y lograr obtener la información que se necesita para realizar un estudio de cobertura con una mayor exactitud.

Se mencionará la aplicación G-NetTrack Pro que ayudó a recolectar las mediciones experimentales en el área en donde se realiza el estudio de cobertura de telefonía celular (estado de Colima). Se describe su funcionamiento así como también se indica que información proporciona. Posteriormente se describe el simulador ATOLL. En este simulador se desarrolló la simulación que ayudó a realizar la estimación de cobertura en esta zona y debido a los parámetros que considera el estudio de cobertura obtuvo una mejor exactitud.

4.2 Simulador y Aplicación

4.2.1 Aplicación G-NetTrack Pro

Esta aplicación permite realizar mediciones de los parámetros de las señales móviles sin la necesidad de utilizar equipos especializados y costosos. Debido a los datos que proporciona esta aplicación, es normalmente utilizada en proyectos donde han sido diseñadas otras aplicaciones, páginas web, entre otros, ya que les permite realizar una comparación de sus resultados con los que proporciona la aplicación. También es utilizada por diversos operadores móviles donde sus trabajadores encargados de monitorear la intensidad de la señal que están proporcionando sus radiobases hacen uso de esta aplicación para realizar el monitoreo en diversas zonas. En base a esto los encargados de esta tarea pueden informar en que zonas no se cuenta con la intensidad de señal adecuada y comenzar a proponer soluciones a este problema ya sea con la instalación de una nueva radiobase o simplemente realizando un ajuste en potencia de las radiobases encontradas alrededor. En general esta aplicación es utilizada para realizar el estudio de cobertura de una zona determinada que es muy importante en varios proyectos.

Dos ejemplos de los proyectos que se mencionan, son los siguientes [41]:

- En la Fundación Universidad Autónoma de Colombia se realizó un artículo llamado *“Análisis de Radiopropagación de un eNodoB en un Escenario Urbano”* que se basó en las mediciones obtenidas en la aplicación G-NetTrack Pro. Con la ayuda de estas mediciones pudieron ajustar la simulación que realizaron logrando obtener un buen estudio de cobertura de la eNodoB elegida.
- En el proyecto [42] *“Generación y puesta en marcha de un modelo para la homologación de terminales móviles a través del desarrollo de una aplicación sobre el sistema operativo Android”*, también fue utilizada la aplicación para obtener las mediciones realizadas en cada uno de los dispositivos móviles para que posteriormente pudieran ser comparados.

4.2.1.1 Estructura de la aplicación

La aplicación consta de 5 pestañas: Cell, Nei, Map, Info y Drive [43].

- Cell:
En esta pestaña se encontrará la siguiente información:
 - Operador: El nombre de su proveedor de servicio inalámbrico
 - MCC, MNC

- **NODE:** Cuando está en 3G, muestra el ID del RNC que controla la celda de servicio actual. En 4G muestra el ID de eNB.
- **CID:** El ID de CELLI de la celda de servicio actual
- **PCI / PSC / BSIC:** PCI en 4G, PSC en 3G y BSIC en 2G para la celda de servicio actual.
- **F:** Número de canal de frecuencia ARFCN
- **B:** Banda de frecuencia
- **Tipo:** El modo de tecnología de red (como GPRS, EDGE en 2G o UMTS, HSPA, etc. en 3G)
- **NIVEL:** La intensidad de la señal actual en dBm. Para diferentes tecnologías, el título es diferente: RXLEV para 2G, RSCP para 3G y RSRP para 4G.
- **QUAL:** La calidad de la señal de la red. Para diferentes tecnologías, el título es diferente: RXQUAL para 2G, ECNO para 3G y RSRQ para 4G. Este valor no es reportado por la mayoría de los teléfonos.
- **SNR:** Relación señal / ruido. Se mide solo en LTE.
- **CQI:** Indicador de calidad del canal. Se mide solo en 4G.

La figura 44 muestra cómo se encuentra conformada la pestaña Cell:

G-NetTrack Pro v17.1
Operator: TELCEL

MCC:334 MNC:20 TAC:583 Type:LTE
eNB:90168 CID:2 PCI:85 F:66536 B:L66 TA:4
RSRP:-110 RSRQ:-13 SNR:-2.6 CQI:- RSI:-76
Longitude:99.04475 Latitude:19.383984
Speed:0km/h GPS Accuracy:19m
Height:2224m Altitude:2224m Ground:0m
UL: 27 kbps TELCEL-LTE DL: 180 kbps
Data: DATA

Serving time: 1s

TIME	EVENT	AC	CELLID	CI	ARFCN	LEVEL	QUAL	TYPE	SERV
12:43:42	HD4G4G	583	959432	349	66536	-110	-17	4G	2
12:43:44	HD4G4G	583	959432	349	2050	-111	-19	4G	20
12:44:06	HD4G4G	583	959432	349	66536	-114	-18	4G	14
12:44:22	HD4G4G	583	901682	85	2050	-112	-18	4G	20
12:44:44	HD4G4G	583	901682	85	66536	-111	-14	4G	10
12:44:56	HD4G4G	583	901682	85	2050	-111	-14	4G	4
12:45:00	HD4G4G	583	901682	85	66536	-110	-16	4G	8
12:45:09	CR4G4G	583	901682	85	2050	-112	-19	4G	6
12:45:16	HD4G4G	583	901682	85	66536	-109	-17	4G	8
12:45:25	HD4G4G	583	901682	85	2050	-111	-17	4G	8
12:45:34	HD4G4G	583	901682	85	66536	-110	-16	4G	8
12:45:43	HD4G4G	583	901682	85	2050	-112	-17	4G	4
12:45:47	HD4G4G	583	901682	85	66536	-110	-13	4G	22
12:46:12	CR4G4G	583	901682	85	2050	-110	-15	4G	6
12:46:18	CR4G4G	583	901682	85	66536	-110	-16	4G	8
12:46:27	CR4G4G	583	901682	85	66536	-110	-16	4G	2
12:46:29	CR4G4G	583	901682	85	2050	-110	-12	4G	24
12:46:56	CR4G4G	583	901682	85	66536	-112	-16	4G	10
12:47:07	CR4G4G	583	901682	85	2050	-110	-17	4G	4
12:47:12	CR4G4G	583	901682	85	66536	-109	-16	4G	8
12:47:21	CR4G4G	583	901682	85	2050	-111	-16	4G	24
12:47:48	HD4G4G	583	901682	85	66536	-109	-16	4G	12
12:48:01	HD4G4G	583	901682	85	2050	-109	-16	4G	18
12:48:21	HD4G4G	583	901682	85	66536	-110	-16	4G	16
12:48:39	CR4G4G	583	901682	85	67036	-110	-14	4G	6
12:48:46	CR4G4G	583	901682	85	2050	-111	-17	4G	8
12:48:53	CR4G4G	583	901682	85	66536	-109	-16	4G	14
12:49:10	HD4G4G	583	901682	85	2050	-110	-17	4G	12
12:49:24	HD4G4G	583	901682	85	66536	-110	-13	4G	

Gyokov Solutions MENU
Cell Nei Map Info Drive

Figura 44. Pestaña Cell.

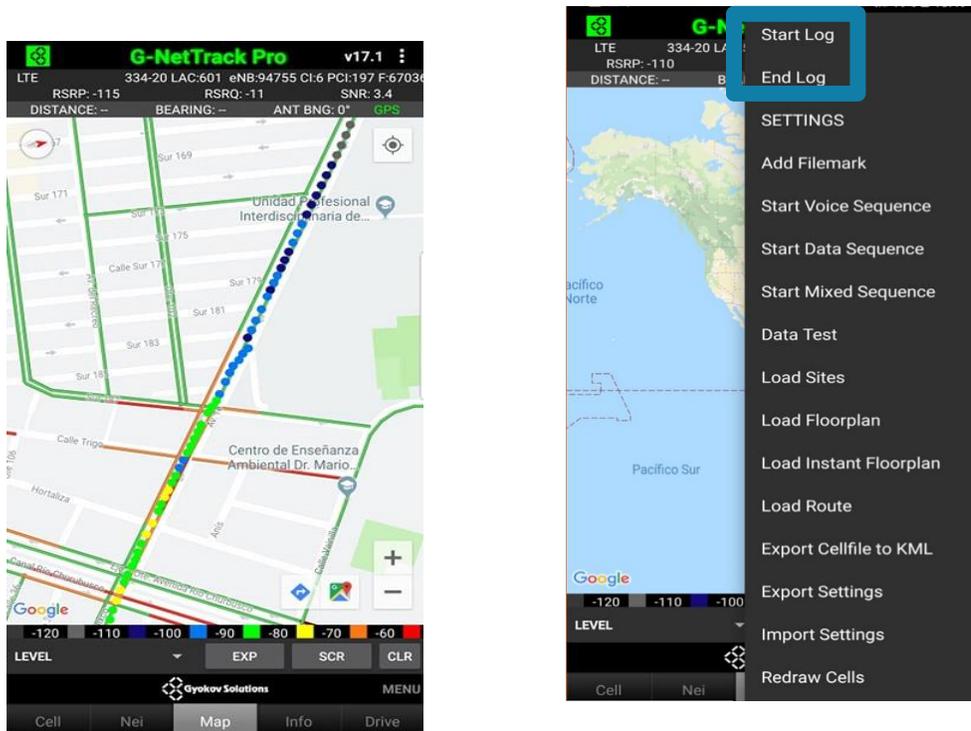
- **Nei:**
Esta sección está dividida en dos tablas. La primera mostrará las mediciones realizadas de la celda (Cell-ID, ARFCN y Nivel de la intensidad de la señal (LEVEL)). La segunda tabla indica las señales que están siendo reconocidas por el dispositivo de celdas vecinas y proporciona la misma información que en la primera tabla. Cada señal que es reconocida es diferenciada por colores como se puede observar en la figura 45.



Figura 45. Pestaña Nei.

- **Map:**
En esta pestaña se observa la ubicación donde se realizan las mediciones actualmente, así como también el recorrido donde se realicen. Cada que se realiza una medición la aplicación coloca un punto en el mapa como se puede observar en la figura 46 A. En esta aplicación se tienen varias opciones de lo que indican estos puntos antes mencionados como por ejemplo, se puede elegir que indique la intensidad de la señal, por lo que cada punto tendrá un color dependiendo de la intensidad. También puede indicar varios parámetros como lo son: CELL, PCI, SNR, SPEED, etc.
En la parte superior de esta pestaña se encuentra la información que ya fue mencionada anteriormente (eNB, PCI, F, RSRP y RSRQ). En esta misma sección se le puede indicar a la aplicación que guarde todas las mediciones realizadas en el trayecto figura 46 B, en la que le podemos indicar a la aplicación cuando iniciar y

cuando terminar. Estas mediciones serán guardadas en un archivo .txt en el dispositivo móvil que más adelante se muestra.



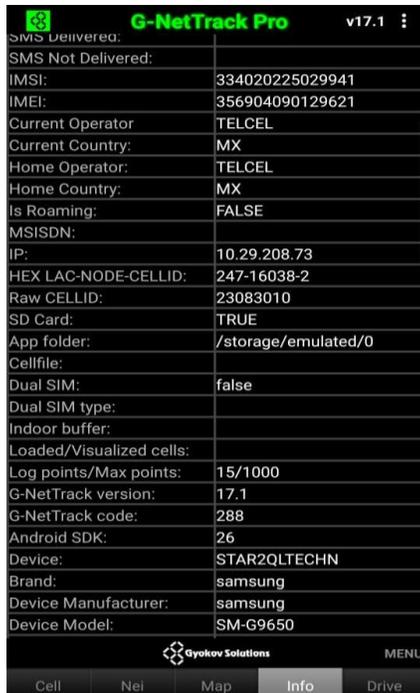
A)

B)

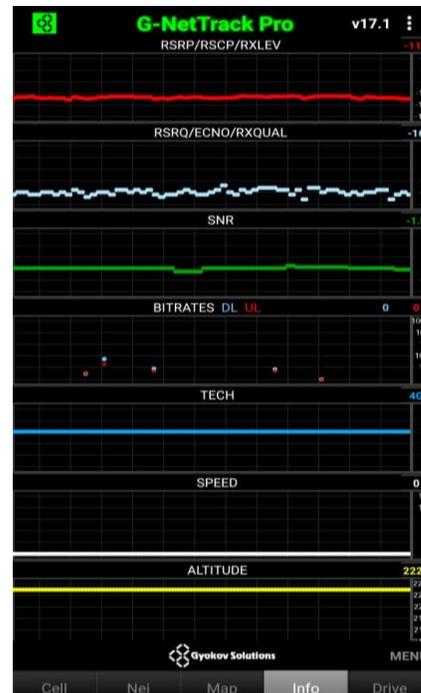
Figura 46. Pestaña Map.

- Info:

En esta pestaña la aplicación muestra varias gráficas donde se puede observar los diferentes valores que van presentando los parámetros durante las mediciones que se están realizando, como son: RSRP/RSCP/RXLEV, SNR, BITRATES, SPEED, etc. En la parte posterior se observa una tabla en la que se indica información del dispositivo móvil y de la misma aplicación, así como también información acerca de la secuencias que se hacen al realizar una llamada, mensajes, etc.



A)



B)

Figura 47. Pestaña Info.

- Drive:

En esta pestaña únicamente se ven los parámetros primordiales como se observa en la figura 48:



Figura 48. Pestaña Drive.

4.2.1.2 Comparación de resultados

En esta sección se observa la efectividad de esta aplicación ya que sin la necesidad de comprar equipos con altos costos como por ejemplo un analizador de espectros (que ronda en los 600-800 mil pesos M.N.) se puede realizar un estudio de cobertura.

Para observar lo mencionado anteriormente se realizó la comparación de los resultados obtenidos por un analizador de espectros y los obtenidos mediante la aplicación. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 49 y 50:

The screenshot shows the 'Global Results' section of a spectrum analyzer. The results are as follows:

Global Results		SYNC OK	
RF Channel Power:	--- dBm	Cell Identity [Grp/ID]:	88 [29/1]
Overall EVM:	--- %	Cyclic Prefix:	Normal
Carrier Freq Error:	--- Hz	Traffic Activity:	0.00 %
Sync Signal Power:	-93.36 dBm	SINR:	10.11 dB
OSTP:	--- dBm	RSSI:	-61.75 dBm
BSRP:	-94.49 dBm	RSRQ:	-12.74 dB
Occupied Bandwidth:	17.59 MHz		

Figura 49. Resultados en el analizador de espectros.

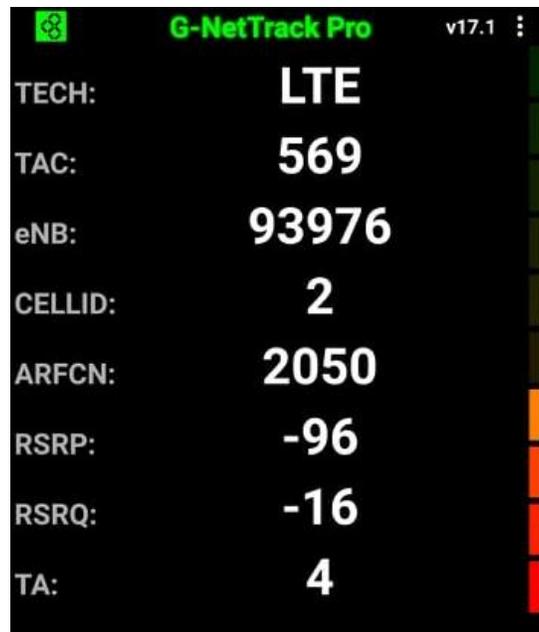


Figura 50. Resultados en la aplicación.

En la figura 50 los resultados conseguidos mediante la aplicación son muy similares a los mostrados en la figura 49. Se observa que el valor RSRP obtenido en la aplicación G-NetTrack Pro es de -96 dBm, mientras que en el analizador de espectro este valor fue de -94.49 dBm. Con esto se comprueba que no es necesario contar un equipo especializado y costoso para poder realizar un estudio de cobertura y la efectividad del uso de esta aplicación en este tipo de trabajos de investigación.

4.2.2 Simulador ATOLL

El simulador ATOLL en este trabajo sirvió para poder realizar una predicción sobre la cobertura de las señales en los diversos sistemas de telefonía celular (3G y 4G) que se tienen en el estado de Colima.

Para la realización de este trabajo se utilizó una versión de prueba la cual fue concedida para fines académicos por empresa FORK.

El simulador cuenta con múltiples características que son útiles para poder realizar un estudio de cobertura de señales de telefonía celular en cualquier zona. En este trabajo se pudo integrar un mapa de la Ciudad de Colima que sirvió para tener una mejor claridad de los resultados que se obtienen. De igual manera también se integró a este mismo mapa las ubicaciones de las radiobases encontradas en el estado de Colima donde cada una de estas se configuró de tal manera que proporcionara señales pertenecientes a los sistemas 3G y 4G.

En este simulador también se pueden configurar diferentes parámetros de tráfico como es el tipo de servicios que se ofrecerá ya sea altas velocidades de internet, acceso a internet móvil, VOIP o video conferencia y así mismo se puede configurar la velocidad de movilidad que tendrán los usuarios de esta zona. En la figura 51 se observa una simulación que fue realizada en ATOLL:

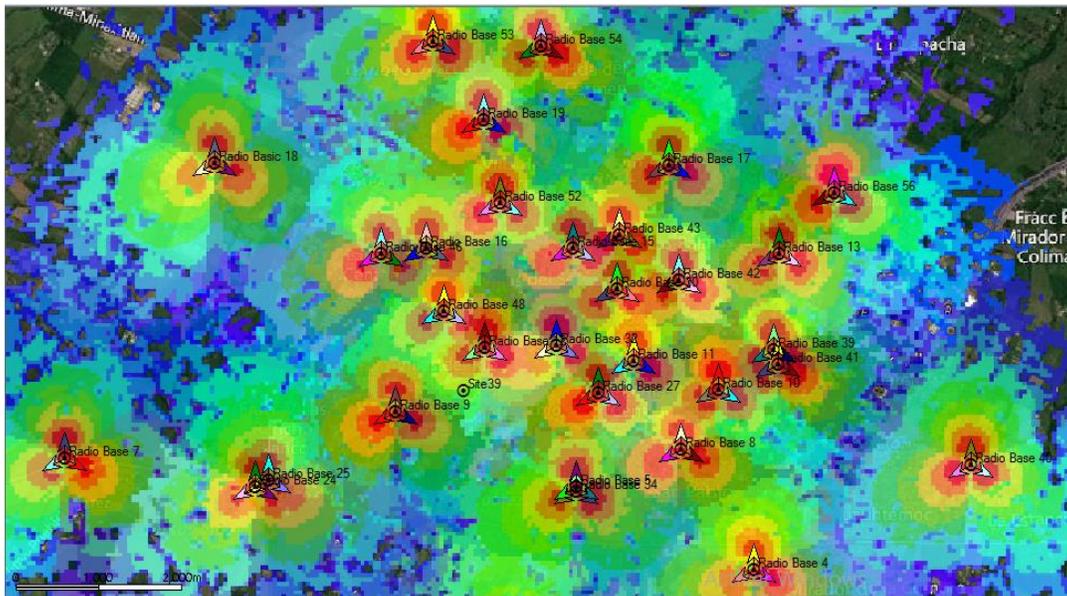


Figura 51. Simulación realizada en ATOLL.

Este simulador sirve al momento de realizar una predicción de cobertura de telefonía celular debido a que considera diversos parámetros como los que fueron mencionados anteriormente y puede ser configurado de varias maneras para que la red pueda proporcionar diferentes servicios. De esta manera se obtienen resultados más precisos.

Este simulador es aplicado para el diseño, simulación y estudio de cobertura de telefonía celular como se mencionó anteriormente en los proyectos ya sea para fines académicos o para el desarrollo de las redes de telefonía celular pertenecientes a los diferentes operadores del país.

Capítulo 5. Desarrollo de la simulación y recopilación de datos

5.1 Introducción

Para poder obtener un estudio de cobertura de telefonía celular, lo primero que se debe realizar es una recopilación de datos teóricos que ayudarán a obtener una mayor precisión en los resultados esperados en la simulación.

En este capítulo se mostrarán los resultados teóricos que fueron utilizados para realizar la simulación. Se presentará una tabla de las bandas de frecuencia en las que operan los diferentes operadores en el estado de Colima. Posteriormente se indicarán de los parámetros que son utilizados en los transmisores de telefonía celular encontrados en las radiobases así como la ubicación de estas mismas. También se mostrarán los resultados obtenidos de forma experimental mediante la aplicación G-NetTrackPro.

5.2 Recopilación de datos

5.2.1 Recopilación de datos teóricos

Primero se tuvo que identificar en que frecuencias operan los operadores de telefonía celular en el estado de Colima. Que no solamente servirá en este trabajo sino que también la información será de utilidad en futuros trabajos e investigaciones que se están realizando en conjunto para el desarrollo del proyecto EWIN.

De la página del Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) [44], se recopilaron las bandas de frecuencias que poseen los distintos operadores de servicios de comunicación móvil (TELCEL, AT&T y MOVISTAR) y esto se puede observar en la tabla 14:

BANDAS DE FRECUENCIA COLIMA							
COMPAÑÍA	REGION	IDA [UL]	RETORNO [DL]	ESTADO	FECHA DE VENCIMIENTO	FECHA DE INICIO DE VIGENCIA	ANCHO DE BANDA [MHz]
TELCEL	REGION 5 B "OCCIDENTE" QUE COMPRENDE LOS ESTADOS DE COLIMA, JALISCO, MICHOACAN Y NAYARIT, EXCLUYENDO LOS SIGUIENTES MUNICIPIOS DEL ESTADO DE JALISCO: HUEJUCAR, SANTA MARIA DE LOS ANGELES, COLOTLAN, TEOCALTICHE, HUEJUQUILLA, MESQUITIC, VILLA GUERRERO, BOLAÑOS, LAGOS DE MORENO, VILLA HIDALGO, OJUELOS Y ENCARNACION DE DIAZ	835-845	880-890	VIGENTE	08/08/2025	08/08/2010	
	REGION 6 QUE COMPRENDE LOS ESTADOS DE COLIMA, MICHOACAN, NAYARIT Y JALISCO EXCLUYENDO LOS SIGUIENTES MUNICIPIOS DE JALISCO: HUEJUCAR, SANTA MARIA DE LOS ANGELES, COLOTLAN, TEOCALTICHE, HUEJUQUILLA EL ALTO, MEZQUITIC, VILLA GUERRERO, BOLAÑOS, LAGOS DE MORENO, VILLA HIDALGO, OJUELOS DE JALISCO Y ENCARNACION DE DIAZ	1865 - 1870	1945 - 1950	VIGENTE	07/10/2018		10
	REGION 6 PCS, QUE COMPRENDE LOS ESTADOS DE COLIMA, MICHOACAN, NAYARIT Y JALISCO EXCLUYENDO LOS SIGUIENTES MUNICIPIOS DE JALISCO: HUEJUCAR, SANTA MARIA DE LOS ANGELES, COLOTLAN, TEOCALTICHE, HUEJUQUILLA EL ALTO, MEZQUITIC, VILLA GUERRERO, BOLAÑOS, LAGOS DE MORENO, VILLA HIDALGO, OJUELOS DE JALISCO Y ENCARNACION DE DIAZ	1860.8 - 1865	1940.8 - 1945	VIGENTE	21/10/2039	21/10/2019	8.4
	REGION 6 QUE COMPRENDE LOS ESTADOS DE COLIMA, MICHOACAN, NAYARIT Y JALISCO EXCLUYENDO LOS SIGUIENTES MUNICIPIOS DE JALISCO: HUEJUCAR, SANTA MARIA DE LOS ANGELES, COLOTLAN, TEOCALTICHE, HUEJUQUILLA EL ALTO, MEZQUITIC, VILLA GUERRERO, BOLAÑOS, LAGOS DE MORENO, VILLA HIDALGO, OJUELOS DE JALISCO Y ENCARNACION DE DIAZ	1890 - 1895	1970 - 1975	VIGENTE	21/04/2025		10
	REGION 6 QUE COMPRENDE LOS ESTADOS DE COLIMA, MICHOACAN, NAYARIT Y JALISCO EXCLUYENDO LOS SIGUIENTES MUNICIPIOS DE JALISCO: HUEJUCAR, SANTA MARIA DE LOS ANGELES, COLOTLAN, TEOCALTICHE, HUEJUQUILLA EL ALTO, MEZQUITIC, VILLA GUERRERO, BOLAÑOS, LAGOS DE MORENO, VILLA HIDALGO, OJUELOS DE JALISCO Y ENCARNACION DE DIAZ	1720 - 1725 1725 - 1730	2120 - 2125 2125 - 2130	VIGENTE	01/10/2030	01/10/2010	10
	NACIONAL	1710 - 1715 1760 - 1780	2110 - 2115 2160 - 2180	VIGENTE	01/10/2030	27/05/2016	10 40
AT&T	REGION 5 "OCCIDENTE" QUE COMPRENDE LOS ESTADOS DE COLIMA, JALISCO, MICHOACAN Y NAYARIT, EXCLUYENDO LOS SIGUIENTES MUNICIPIOS DE JALISCO: HUEJUCAR, SANTA MARIA DE LOS ANGELES, COLOTLAN, TEOCALTICHE, HUEJUQUILLA, MESQUITIC, VILLA GUERRERO, BOLAÑOS, LAGOS DE MORENO, VILLA HIDALGO, OJUELOS Y ENCARNACION DE DIAZ	825 - 835	870 - 880	VIGENTE	17/07/2025	19/07/2010	
	REGION 6 QUE COMPRENDE LOS ESTADOS DE COLIMA, MICHOACAN, NAYARIT Y JALISCO EXCLUYENDO LOS SIGUIENTES MUNICIPIOS DE JALISCO: HUEJUCAR, SANTA MARIA DE LOS ANGELES, COLOTLAN, TEOCALTICHE, HUEJUQUILLA EL ALTO, MEZQUITIC, VILLA GUERRERO, BOLAÑOS, LAGOS DE MORENO, VILLA HIDALGO, OJUELOS DE JALISCO Y ENCARNACION DE DIAZ	1850 - 1860.8	1930 - 1940.8	VIGENTE	26/09/2019		21.6
	REGION 6 QUE COMPRENDE LOS ESTADOS DE COLIMA, MICHOACAN, NAYARIT Y JALISCO, EXCLUYENDO LOS SIGUIENTES MUNICIPIOS DE JALISCO: HUEJUCAR, SANTA MARIA DE LOS ANGELES, COLOTLAN, TEOCALTICHE, HUEJUQUILLA EL ALTO, MEZQUITIC, VILLA GUERRERO, BOLAÑOS, LAGOS DE MORENO, VILLA HIDALGO, OJUELOS DE JALISCO Y ENCARNACION DE DIAZ	3475 - 3500	3575 - 3600	VIGENTE	27/09/2019		25
	REGION 6 QUE COMPRENDE LOS ESTADOS DE COLIMA, MICHOACAN, NAYARIT Y JALISCO, EXCLUYENDO LOS SIGUIENTES MUNICIPIOS DE JALISCO: HUEJUCAR, SANTA MARIA DE LOS ANGELES, COLOTLAN, TEOCALTICHE, HUEJUQUILLA EL ALTO, MEZQUITIC, VILLA GUERRERO, BOLAÑOS, LAGOS DE MORENO, VILLA HIDALGO, OJUELOS DE JALISCO Y ENCARNACION DE DIAZ	1735 - 1740	2135 - 2140	VIGENTE	08/11/2030		10
	REGION 6 QUE COMPRENDE LOS ESTADOS DE COLIMA, MICHOACAN, NAYARIT Y JALISCO EXCLUYENDO LOS SIGUIENTES MUNICIPIOS DE JALISCO: HUEJUCAR, SANTA MARIA DE LOS ANGELES, COLOTLAN, TEOCALTICHE, HUEJUQUILLA EL ALTO, MEZQUITIC, VILLA GUERRERO, BOLAÑOS, LAGOS DE MORENO, VILLA HIDALGO, OJUELOS DE JALISCO Y ENCARNACION DE DIAZ	1905 - 1910	1985 - 1990	VIGENTE	27/04/2025		10
	NACIONAL	1730 - 1735	2130 - 2135	VIGENTE	01/10/2030	27/05/2016	10
TELEFONICA MOVISTAR	REGION 6 QUE COMPRENDE LOS ESTADOS DE COLIMA, MICHOACAN, NAYARIT Y JALISCO, EXCLUYENDO LOS SIGUIENTES MUNICIPIOS DE JALISCO: HUEJUCAR, SANTA MARIA DE LOS ANGELES, COLOTLAN, TEOCALTICHE, HUEJUQUILLA EL ALTO, MEZQUITIC, VILLA GUERRERO, BOLAÑOS, LAGOS DE MORENO, VILLA HIDALGO, OJUELOS DE JALISCO Y ENCARNACION DE DIAZ	1870-1885	1950-1965	VIGENTE	07/10/2018		30
	REGION 6 QUE COMPRENDE LOS ESTADOS DE COLIMA, MICHOACAN, NAYARIT Y JALISCO, EXCLUYENDO LOS SIGUIENTES MUNICIPIOS DE JALISCO: HUEJUCAR, SANTA MARIA DE LOS ANGELES, COLOTLAN, TEOCALTICHE, HUEJUQUILLA EL ALTO, MEZQUITIC, VILLA GUERRERO, BOLAÑOS, LAGOS DE MORENO, VILLA HIDALGO, OJUELOS DE JALISCO Y ENCARNACION DE DIAZ	1895 - 1900	1975 - 1980	VIGENTE	01/10/2030		10
	REGION 6 QUE COMPRENDE LOS ESTADOS DE COLIMA, MICHOACAN, NAYARIT Y JALISCO, EXCLUYENDO LOS SIGUIENTES MUNICIPIOS DE JALISCO: HUEJUCAR, SANTA MARIA DE LOS ANGELES, COLOTLAN, TEOCALTICHE, HUEJUQUILLA EL ALTO, MEZQUITIC, VILLA GUERRERO, BOLAÑOS, LAGOS DE MORENO, VILLA HIDALGO, OJUELOS DE JALISCO Y ENCARNACION DE DIAZ	1895 - 1900	1975 - 1980	VIGENTE	01/10/2030		10

Tabla 14. Frecuencias que poseen los diversos operadores para ofrecer sus servicios de telefonía celular [44].

Posteriormente se realizó la búsqueda de los parámetros que son utilizados para el estudio de la cobertura de los diferentes sistemas de telefonía, que serán utilizados en la realización de la simulación. Los parámetros se presentan en las figuras 52 y 53 [45]:

- Para los sistemas de telefonía celular 3G:

	Unidades	Valor
Potencia Transmitida	dBm	44,7
Ganancia antena transmisora	dB	18
Pérdidas en transmisor	dB	1

Figura 52. Parámetros utilizados para los transmisores utilizados en los sistemas de telefonía celular 3G [45].

- Para los sistemas de telefonía celular 4G:

	Unidades	Valor
Potencia Transmitida	dBm	44,78
Ganancia antena transmisora	dB	17-18
Pérdidas en transmisor	dB	1

Figura 53. Parámetros utilizados para los transmisores utilizados en los sistemas de telefonía celular 4G [45].

Otro dato importante es saber que en México se tienen designadas las siguientes bandas de frecuencias para los diferentes sistemas de telefonía celular:

- 2G: 850 y 1900 [MHz]
- 3G: 800/850/900/1700/1900/2100 [MHz]
- 4G: 900,1700 y 2100 [MHz]

5.2.2 Modelos de propagación

Para poder realizar la simulación se debe comprender la importancia de los modelos de propagación.

Los modelos de propagación [46] son predicciones que ayudan a determinar cuáles son los efectos que producen ciertos entornos a la señal. Se puede decir que un modelo de propagación es empírico debido a que muchos están basados en modelos matemáticos que a su vez se llegan a basar en datos probabilísticos.

Estos modelos permiten obtener una estimación del comportamiento aproximado de la señal en cualquier entorno sin necesidad de realizar pruebas experimentales ya que puede ser muy costoso y requerir mucho tiempo.

Cada entorno tiene su propio modelo de propagación y de igual manera cada uno de estos posee sus propias características. El simulador ATOLL cuenta con los siguientes modelos de propagación [47]:

- Modelo de propagación estándar.
- Modelo de propagación Okumura-Hata.
- Modelo de propagación Cost-Hata.
- Modelo de propagación ITU 529-3.
- Modelo de propagación ITU 370-7.
- Modelo de propagación Erceg-Greenstein (SUI).
- Modelo de propagación ITU 526-5.
- Modelo de propagación WLL.
- Modelo de propagación Longley-Rice.
- Modelo de propagación ITU 1546.
- Modelo de propagación Sakagami Extended.

A continuación se describirán algunos de ellos los cuales podrán ser utilizados en la realización de la simulación:

- Modelo de propagación Cost-Hata: Las mediciones experimentales realizadas para la elaboración de este modelo se hicieron en Europa. Es utilizado en diversos entornos desde rurales hasta urbanos. Los parámetros que utiliza son:
 - La frecuencia de operación: 1500-2000 [MHz]
 - La altura de la antena transmisora: 30-200 [m]
 - La altura de la antena del UE: 1-10 [m]
 - Distancia entre el UE y la eNB: 1-20 [km]

- Modelo de propagación Okumura-Hata: Las mediciones experimentales realizadas para el desarrollo de este modelo fueron en Japón en la Ciudad de Tokio. Por lo que es de utilidad en las predicciones de cobertura de telefonía celular en entornos urbanos. Los parámetros que utiliza son los siguientes:
 - La frecuencia de operación: 150-1500 [MHz]
 - La altura de la antena transmisora: 30-200 [m]
 - La altura de la antena del UE: 1-10 [m]
 - Distancia entre el UE y la eNB: 1-20 [km]

- Modelo de propagación stanford university interim (SUI): Este modelo fue desarrollado por la IEEE en conjunto con la Universidad de Stanford. Es utilizado en tres tipos de entornos urbanos, suburbanos y rurales, cuyos parámetros que utiliza son:
 - La frecuencia de operación: mayor a 1900 [MHz]
 - La altura de la antena transmisora: 10-80 [m]
 - La altura de la antena del UE: 2-10 [m]
 - Distancia entre el UE y la eNB: .1-8 [km]

- Modelo de propagación recomendación ITU1546: Este modelo fue elaborado por la ITU, cuyas mediciones fueron realizadas en zonas de clima templado, como es el caso de Europa y América del Norte. Los parámetros que utiliza son:
 - La frecuencia de operación: 100, 600 y 2000 [MHz]
 - La altura de la antena transmisora: 10-1200 [m]
 - La altura de la antena del UE: 0-10 [m]
 - Distancia entre el UE y la eNB: 3-15 [km]

5.2.3 Recolección de datos experimentales

Para esta sección lo primero que se realizó fue encontrar mediante un recorrido realizado en la Ciudad de Colima la ubicación de las radiobases, que fueron utilizadas en la simulación. En la tabla 15 se puede encontrar las coordenadas de la ubicación de cada una de estas radiobases:

Nombre	Longitudo	Latitudo		Nombre	Longitudo	Latitudo
Radio Base 1	-103.761218	19.166958		Radio Base 23	-103.765102	19.236055
Radio Base 2	-103.80991	19.210024		Radio Base 24	-103.573597	19.386305
Radio Base 3	-103.737168	19.2165		Radio Base 25	-103.727364	19.245239
Radio Base 4	-103.709787	19.225991		Radio Base 26	-103.72514	19.256431
Radio Base 5	-103.730012	19.235158		Radio Base 27	-103.732059	19.250467
Radio Base 6	-103.78828	19.238603		Radio Base 28	-103.707264	19.249765
Radio Base 7	-103.717992	19.239108		Radio Base 29	-103.684892	19.23717
Radio Base 8	-103.750513	19.243454		Radio Base 30	-103.706771	19.248263
Radio Base 9	-103.713647	19.245531		Radio Base 31	-103.718092	19.25742
Radio Base 10	-103.723301	19.248755		Radio Base 32	-103.724865	19.262353
Radio Base 11	-103.740304	19.250308		Radio Base 33	-103.752008	19.26049
Radio Base 12	-103.706541	19.260134		Radio Base 34	-103.744885	19.254212
Radio Base 13	-103.730064	19.260956		Radio Base 35	-103.738399	19.265895
Radio Base 14	-103.746816	19.261024		Radio Base 36	-103.745903	19.283432
Radio Base 15	-103.719079	19.269885		Radio Base 37	-103.733643	19.282868
Radio Base 16	-103.77091	19.270387		Radio Base 38	-103.700249	19.266754
Radio Base 17	-103.74019	19.274864		Radio Base 39	-103.742697	19.2456553
Radio Base 18	-103.704624	19.294683		Radio Base 40	-103.606469	19.3092806
Radio Base 19	-103.604194	19.313058		Radio Base 41	-103.659286	19.2831611
Radio Base 20	-103.653268	19.338077		Radio Base 42	-103.62504	-103.62504
Radio Base 21	-103.80762	19.209524		Radio Base 43	-103.65877	19.3064554
Radio Base 22	-103.76651	19.235397		Radio Base 44	-103.712153	19.3754167

Tabla 15. Coordenadas de la ubicación de las radiobases en el estado de Colima.

Posteriormente se realizaron mediciones en la Ciudad de Colima con la aplicación G-NetTrack Pro, para esto fueron utilizados varios dispositivos cuyo modelo es Samsung s6 EDGE de diferentes operadoras (TELCEL y AT&T). El modelo de los dispositivos utilizados se eligió debido a que anteriormente en otros estudios ajenos a este trabajo se realizaron pruebas detectando que este modelo poseía una mejor recepción de señales emitidas por las radiobases.

La aplicación G-NetTrack Pro, proporciona un archivo .txt donde se registran los valores obtenidos en las mediciones realizadas durante el recorrido por la Ciudad de Colima.

Las mediciones registradas fueron registradas en diferentes tablas ya que se realizaron mediciones en varios días y con dispositivos de diferentes operadores (TELCEL y AT&T). De esta manera fue más sencillo seleccionar los parámetros que interesaban, que fueron Nivel de intensidad de la señal, ubicación de la medición realizada, operadora, sistema de telefonía celular utilizada (3G o 4G), relación señal a ruido, CQI y LTERSSI. Un ejemplo de estas tablas se puede encontrar en la figura 54:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	Timestamp	Longitude	Latitude	Speed	Operatormname	Operator	CGI	Cellname	Node	CellID	LAC	NetworkTech	NetworkMode	Level	Qual	SNR	CQI	RTT
2	2018.08.01_12.51.52	-103.6976	19.249478	0	AT&T_4G	33490	3.34901E+14	60023	1	5009	4G	LTE	-100	-6	19	2	-82	
3	2018.08.01_12.51.52	-103.6976	19.249462	0	AT&T_4G	33490	3.34901E+14	60023	1	5009	4G	LTE	-100	-6	19	2	-82	
4	2018.08.01_12.51.53	-103.6976	19.249462	0	AT&T_4G	33490	3.34901E+14	60023	1	5009	4G	LTE	-99	-6	18	2	-82	
5	2018.08.01_12.51.54	-103.6976	19.249462	0	AT&T_4G	33490	3.34901E+14	60023	1	5009	4G	LTE	-99	-6	18	2	-82	
6	2018.08.01_12.51.56	-103.6976	19.249462	0	AT&T_4G	33490	3.34901E+14	60023	1	5009	4G	LTE	-100	-5	14	2	-82	
7	2018.08.01_12.51.57	-103.6976	19.249462	0	AT&T_4G	33490	3.34901E+14	60023	1	5009	4G	LTE	-100	-5	14	2	-82	
8	2018.08.01_12.51.58	-103.6976	19.249462	0	AT&T_4G	33490	3.34901E+14	60023	1	5009	4G	LTE	-102	-6	24	2	-82	
9	2018.08.01_12.51.59	-103.6976	19.249462	0	AT&T_4G	33490	3.34901E+14	60023	1	5009	4G	LTE	-102	-6	24	2	-82	
10	2018.08.01_12.52.00	-103.6976	19.249462	0	AT&T_4G	33490	3.34901E+14	60023	1	5009	4G	LTE	-100	-7	21	2	-82	
11	2018.08.01_12.52.02	-103.6976	19.249462	0	AT&T_4G	33490	3.34901E+14	60023	1	5009	4G	LTE	-100	-7	21	2	-82	
12	2018.08.01_12.52.03	-103.6976	19.249462	0	AT&T_4G	33490	3.34901E+14	60023	1	5009	4G	LTE	-96	-7	22	2	-82	
13	2018.08.01_12.52.04	-103.6976	19.249462	0	AT&T_4G	33490	3.34901E+14	60023	1	5009	4G	LTE	-96	-7	22	2	-82	
14	2018.08.01_12.52.05	-103.6976	19.249462	0	AT&T_4G	33490	3.34901E+14	60023	1	5009	4G	LTE	-96	-6	21	2	-82	
15	2018.08.01_12.52.07	-103.6976	19.249462	0	AT&T_4G	33490	3.34901E+14	60023	1	5009	4G	LTE	-96	-6	21	2	-82	
16	2018.08.01_12.52.08	-103.6976	19.249462	0	AT&T_4G	33490	3.34901E+14	60023	1	5009	4G	LTE	-97	-5	20	2	-82	
17	2018.08.01_12.52.09	-103.6976	19.249462	0	AT&T_4G	33490	3.34901E+14	60023	1	5009	4G	LTE	-97	-5	20	2	-82	
18	2018.08.01_12.52.10	-103.6976	19.249462	0	AT&T_4G	33490	3.34901E+14	60023	1	5009	4G	LTE	-99	-5	19	2	-82	
19	2018.08.01_12.52.12	-103.6976	19.249462	0	AT&T_4G	33490	3.34901E+14	60023	1	5009	4G	LTE	-99	-5	19	2	-82	
20	2018.08.01_12.52.13	-103.6976	19.249462	0	AT&T_4G	33490	3.34901E+14	60023	1	5009	4G	LTE	-101	-6	18	2	-82	
21	2018.08.01_12.52.14	-103.6976	19.249462	0	AT&T_4G	33490	3.34901E+14	60023	1	5009	4G	LTE	-101	-6	18	2	-82	
22	2018.08.01_12.52.16	-103.6976	19.249462	0	AT&T_4G	33490	3.34901E+14	60023	1	5009	4G	LTE	-101	-6	16	2	-82	
23	2018.08.01_12.52.17	-103.6976	19.249462	0	AT&T_4G	33490	3.34901E+14	60023	1	5009	4G	LTE	-101	-6	16	2	-82	
24	2018.08.01_12.52.17	-103.6976	19.249462	0	AT&T_4G	33490	3.34901E+14	60023	1	5009	4G	LTE	-101	-6	16	2	-82	

Figura 54. Las mediciones obtenidas con nuestra aplicación G-NetTrack Pro.

Para tener una mayor claridad de las mediciones obtenidas, estos datos fueron introducidos en Google Earth. Este programa ayudó a tener una visión más clara, ya que las mediciones se presentan como se muestra en la figura 55.

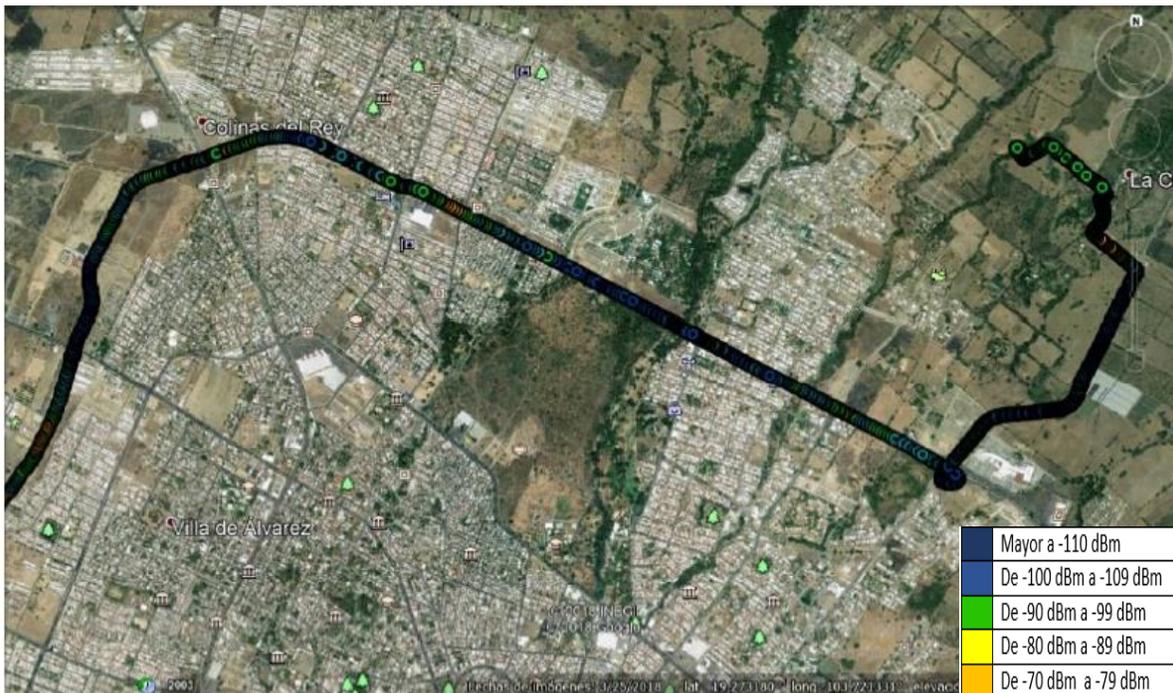


Figura 55. Esta imagen representa las mediciones realizadas en el estado de Colima (Operadora-AT&T).

La figura 55 muestra las mediciones que se realizaron con un dispositivo cuyo operador es AT&T. Cada punto que se muestra en la figura representa una medición que fue realizada por la aplicación. También se puede observar que estos presentan diferentes colores que de igual manera que en la aplicación G-NetTrack Pro la variación de colores depende de la intensidad de señal que está siendo registrada.

Estos puntos mostrarán la información que fue captada por el dispositivo y aparecerá de la como se ve en la figura 56:

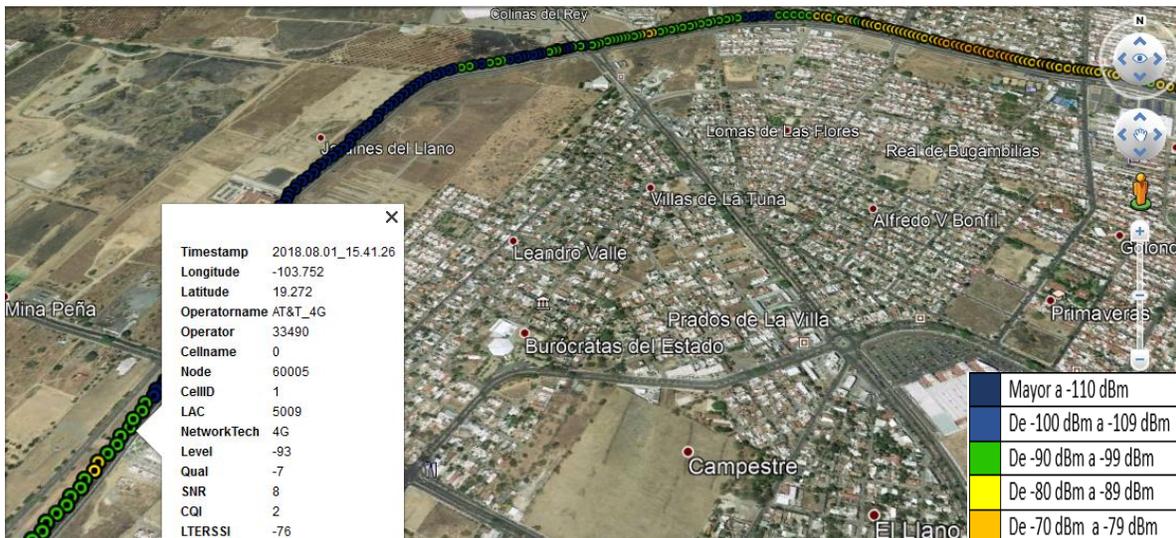


Figura 56. Datos obtenidos de la aplicación los cuales también son visibles en Google Earth.

Lo mismo se visualizar para la operadora TELCEL. En este caso también se realizó un recorrido con un dispositivo en que se registró las mediciones y fueron introducidas en Google Earth, como se muestra en la figura 57.

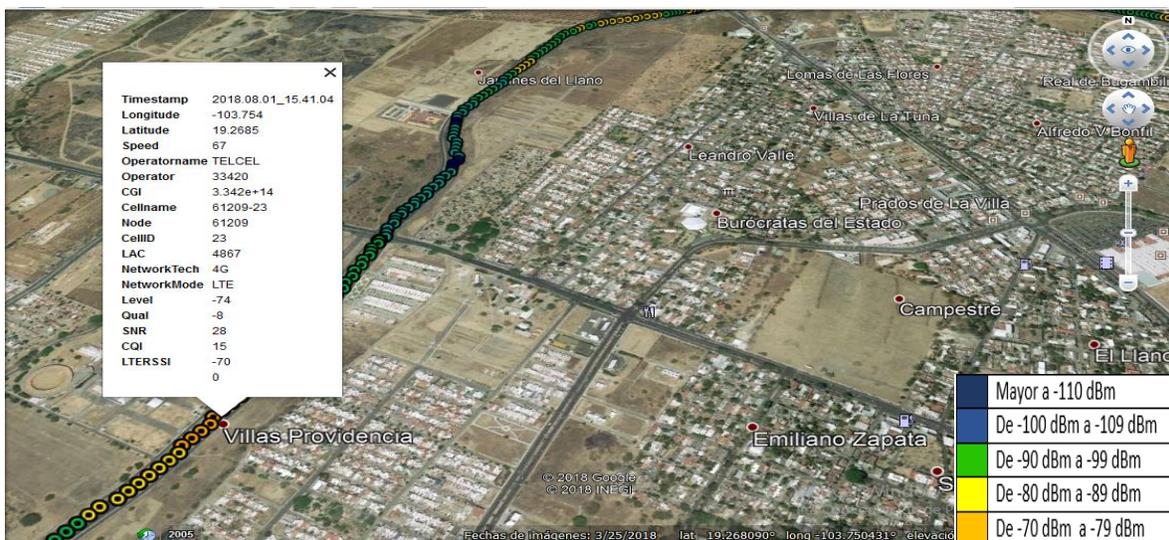


Figura 57. Estos datos corresponden a las mediciones realizadas con el operador TELCEL.

5.3 Desarrollo de la Simulación

Lo primero que se realizó en esta simulación fue colocar las radiobases localizadas en el estado de Colima (Ver Tabla 15). Esto se puede observar en la figura 58.

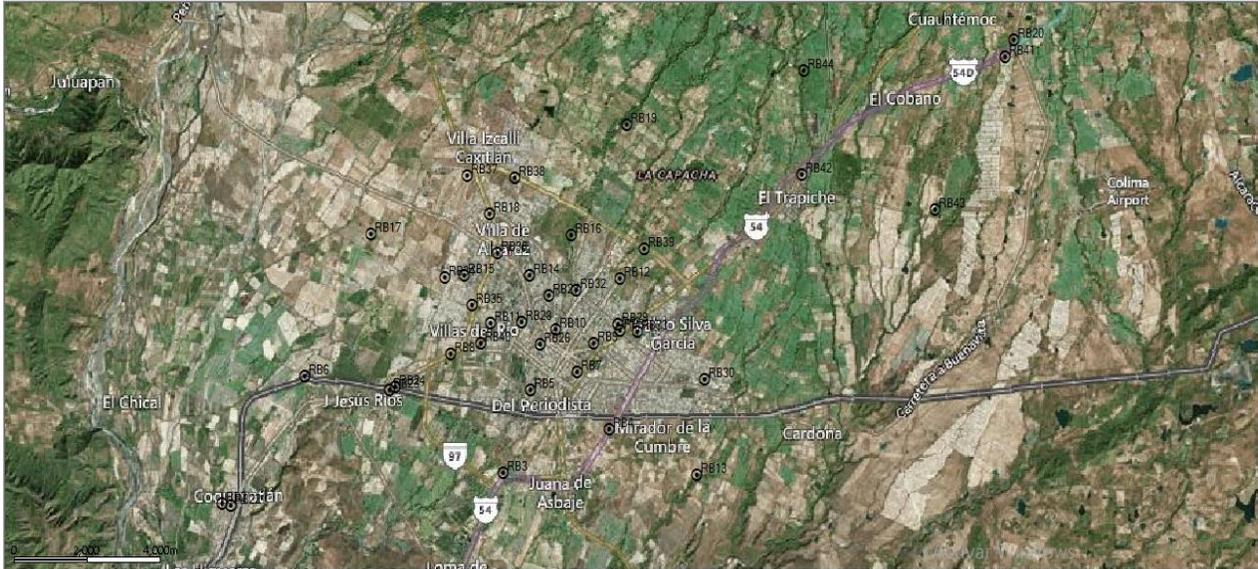


Figura 58. Radiobases colocadas en el simulador ATOLL.

Una vez ubicadas las Radiobases en el simulador, a cada una de estas se le colocaron transmisores de tal manera que cada uno de estos proporciona una cobertura de 120 grados como se muestra en la figura 59.

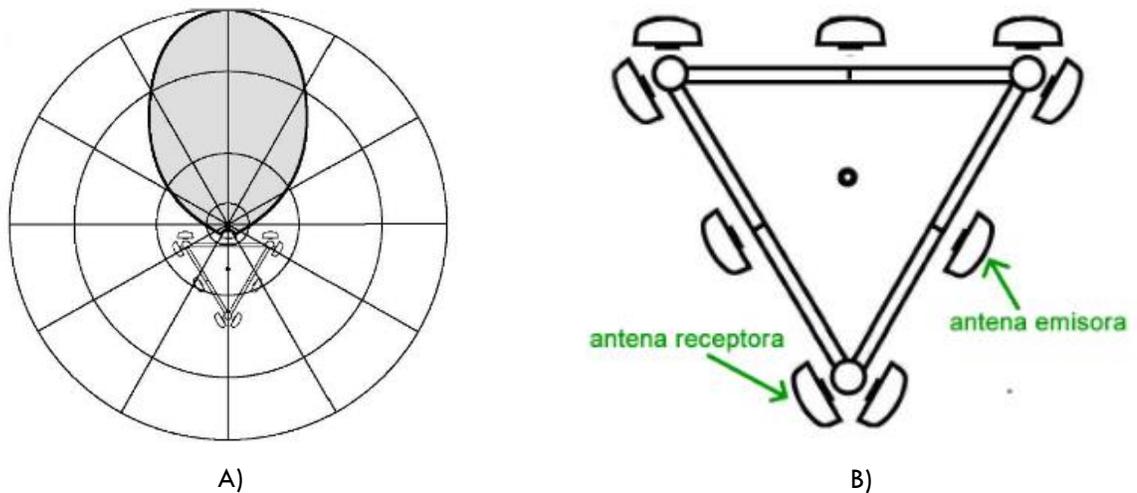
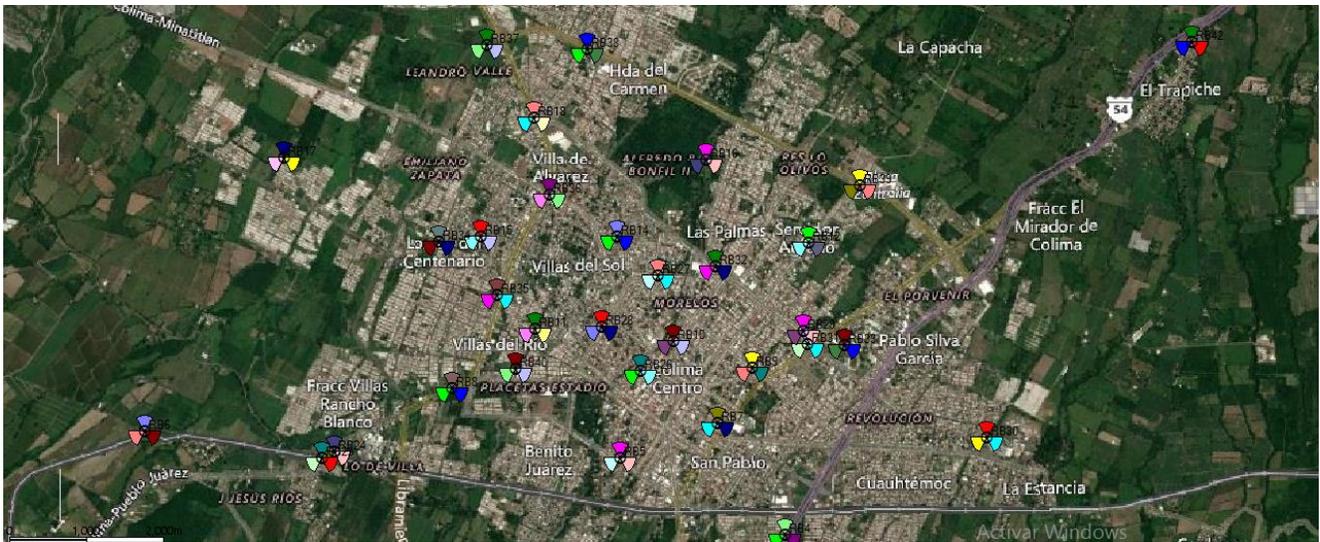
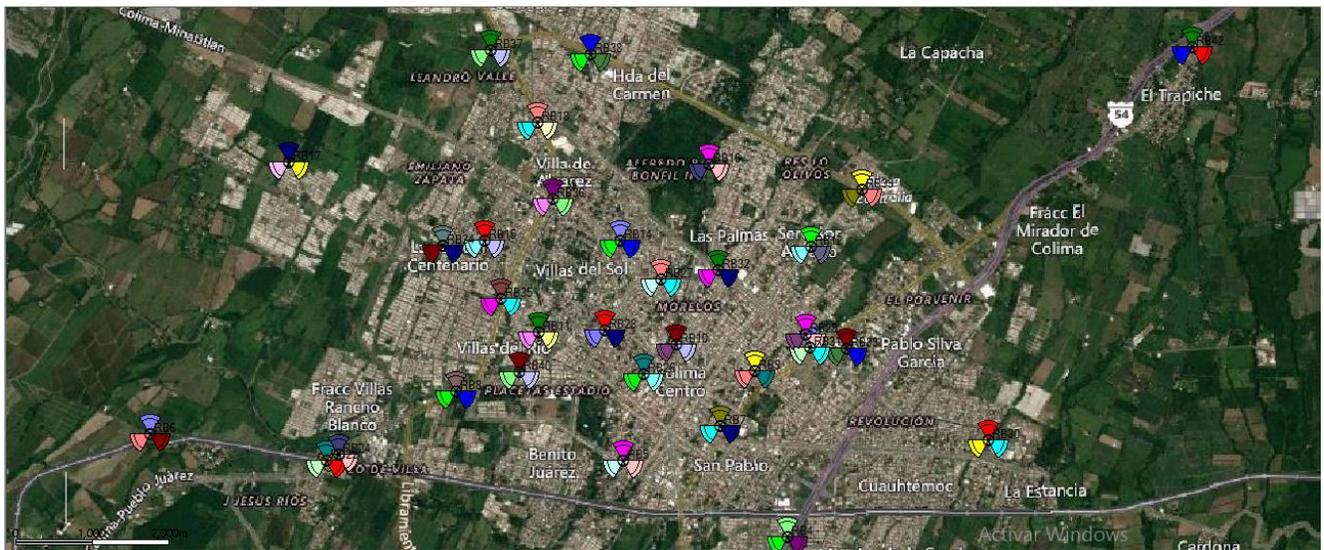


Figura 59. A) Distribución de las antenas receptoras y emisoras en una radiobase. B) Se observa el patrón de radiación de las antenas emisoras.

Las radiobases cuentan con 3 antenas emisoras (transmisoras). En la figura 60 A. A cada antena emisora se le colocaron 2 tipos de transmisores donde uno de ellos proporcionara una señal del sistema de telefonía celular 3G y en la figura 60 B. De la misma forma que en la anterior se le colocaron transmisores pero en este caso proporcionan señales del sistema 4G.



A)

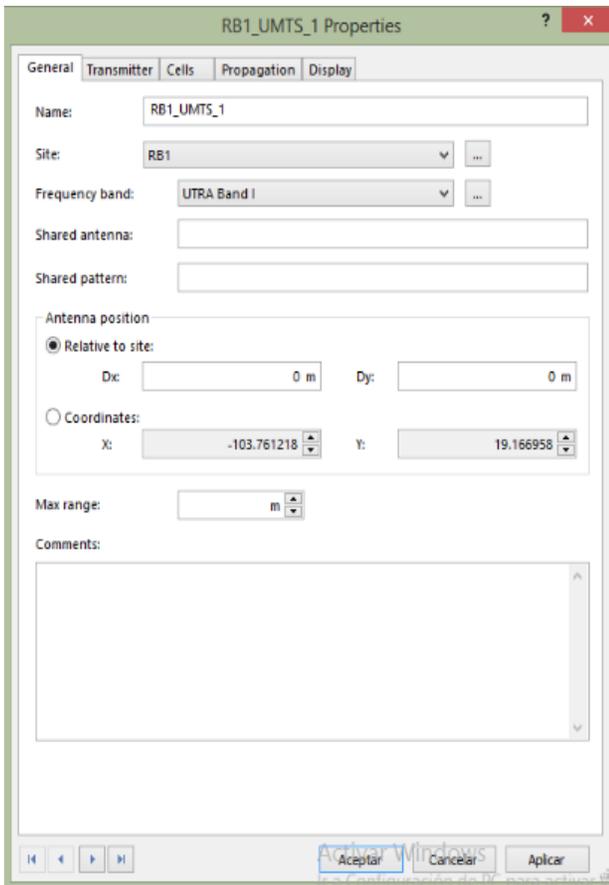


B)

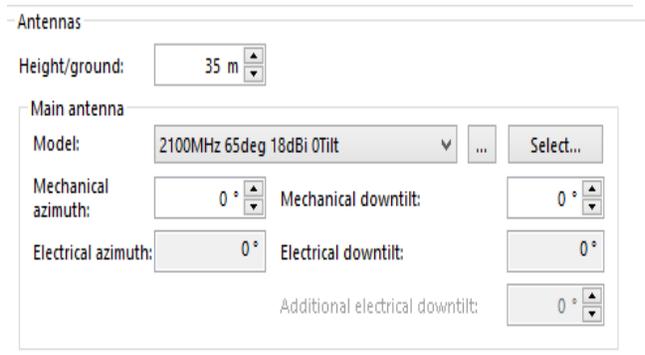
Figura 60. Posición de los transmisores. A) Transmisores 3G. B) Transmisores 4G.

A continuación cada uno de los transmisores fue configurado con los parámetros indicados en las figuras 52 y 53.

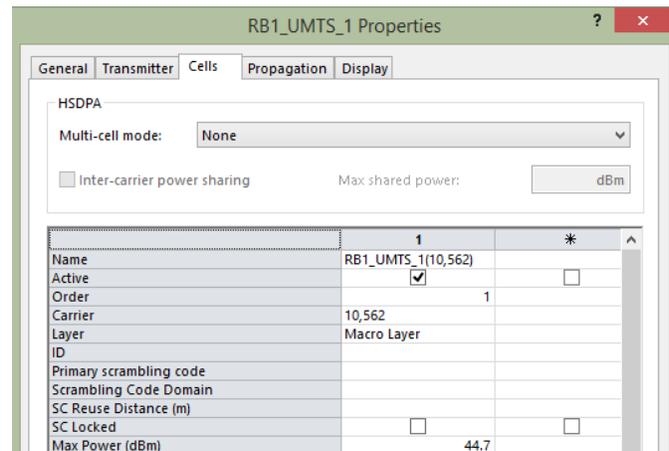
Para el sistema 3G. La figura 61 inciso A) En la pestaña General se selecciona la banda de frecuencias que se utilizará que es ULTRA Band I y corresponde a las frecuencias UL: 1920 – 1980 [MHz] y DL: 2110 – 2170 [MHz]. En el inciso B) En la pestaña Transmitter fueron configurados y seleccionados los parámetros de la antena. Una altura de 35 [m] y Modelo 2100MHz 65deg 18dBi 0Tilt. En el inciso C) En la pestaña Cells fue indicada la potencia de transmisión que es de 44.7 [dBm]. Y por último en el inciso D) En la pestaña Propagation fue indicado el modelo de propagación, en este caso es el Cost-Hata.



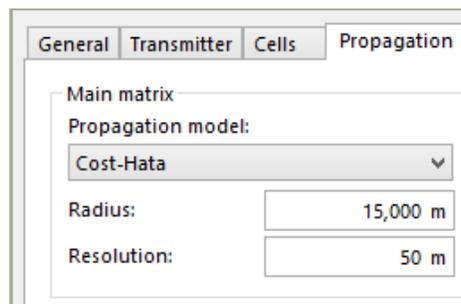
A)



B)



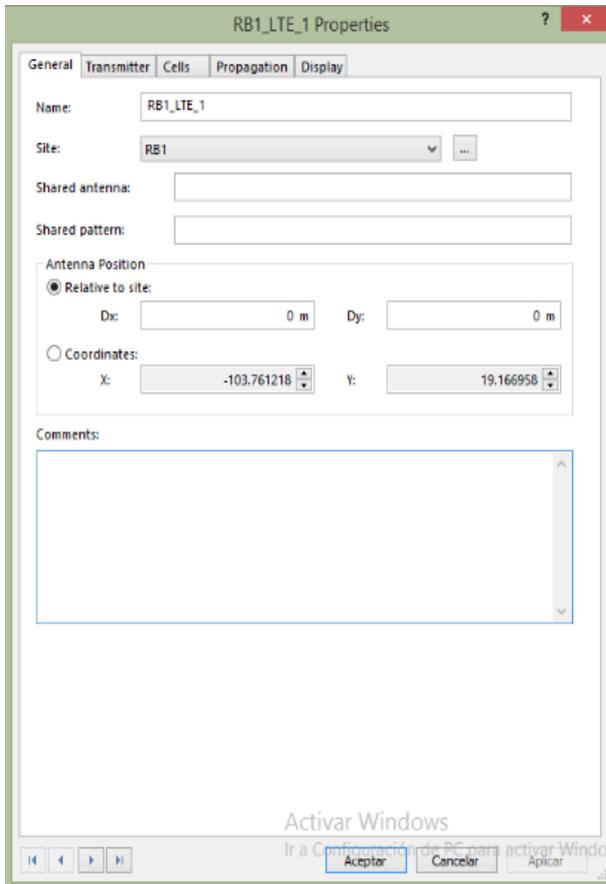
C)



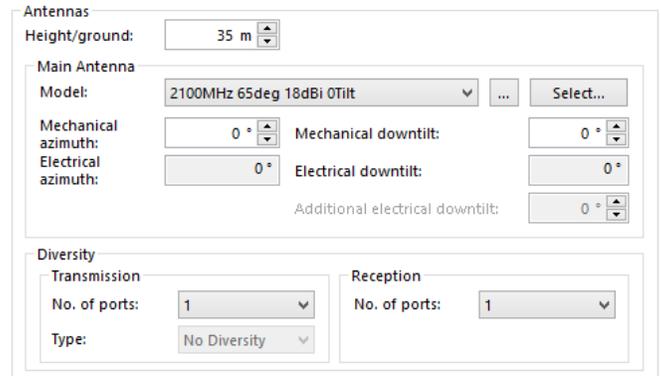
D)

Figura 61. Configuración realizada en cada una de los transmisores (3G).

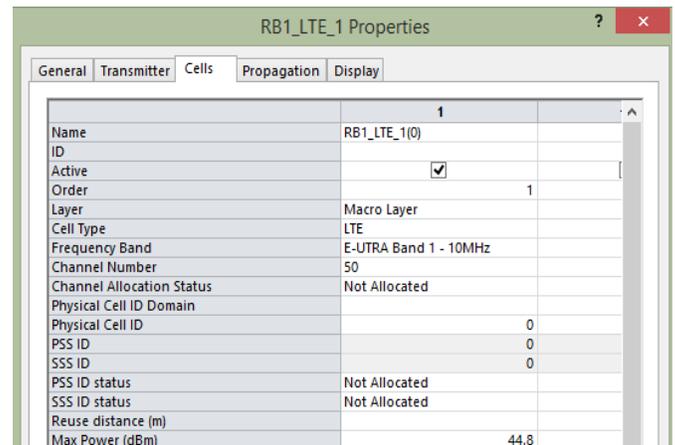
Para el sistema 4G. En la figura 62 inciso A) En la pestaña General solamente se coloca la ubicación de la Radiobase. En el inciso B) En la pestaña Transmitter fue configurada y seleccionada las propiedades de la antena: una altura de 35 [m], Modelo 2100 [MHz] 65 deg 18 dBi 0Tilt. En el inciso C) En la pestaña Cells fue indicada la potencia de transmisión que es de 44.8 [dBm], la banda de frecuencias que se utiliza es la E-ULTRA Band I con 10 [MHz] de ancho de banda y corresponde a las frecuencias UL: 1920 – 1980 [MHz] y DL: 2110 – 2170 [MHz]. Y por último en el inciso D) En la pestaña Propagation fue indicado el modelo de propagación en este caso es el Cost-Hata.



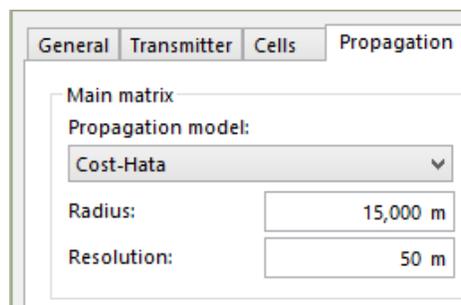
A)



B)



C)



D)

Figura 62. Configuración realizada en cada una de los transmisores (4G).

Capítulo 6. Resultados

6.1 Introducción

El objetivo principal de este trabajo es realizar un estudio de cobertura, que ayudará a saber si en las zonas donde serán colocados los sensores se cuenta con cobertura de telefonía celular. En este capítulo se realizará un análisis de los resultados para saber si la simulación es correcta o si es necesario realizar un ajuste en los parámetros.

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos en la simulación. Una vez obtenidos los resultados se realizará una comparación de los resultados experimentales-teóricos y en base a esto se verificará si es necesario realizar un ajuste en la simulación. Posteriormente se analizará la cobertura que se tiene en los puntos en donde serán localizados los sensores y en caso de no tener cobertura se estudiará el terreno para verificar cual es el problema.

6.2 Resultados de la simulación

Al momento de correr la simulación se muestran los resultados observados en las figuras 63 y 64:

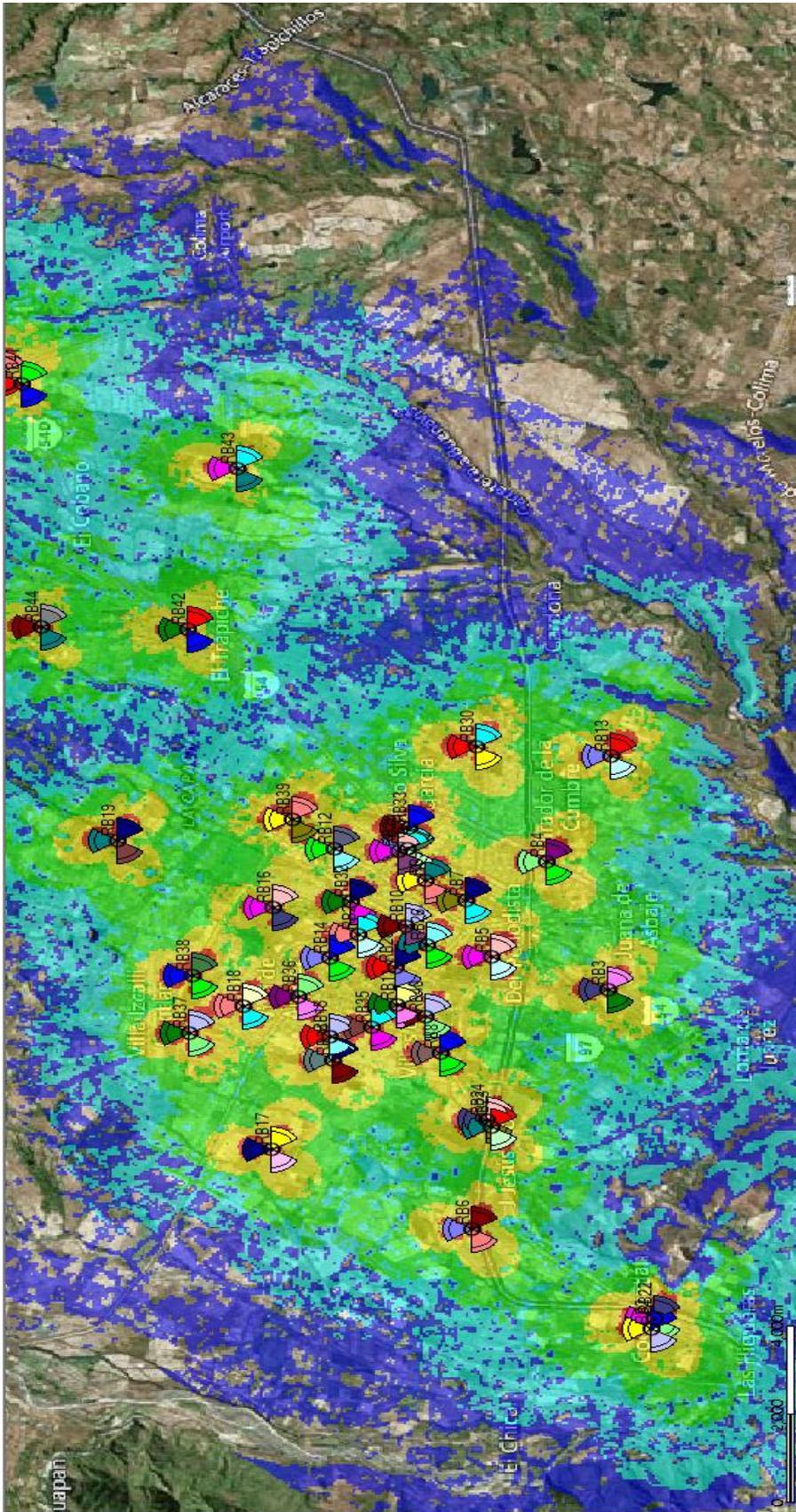


Figura 63. Simulación de la cobertura del sistema de telefonía celular 3G en la Ciudad de Colima realizada en ATOLL.

A continuación para poder realizar la comparación de los resultados experimentales y teóricos. Los resultados obtenidos en el simulador ATOLL pueden ser exportados a Google Earth donde anteriormente ya se habían colocado los resultados experimentales obteniendo los siguientes resultados:

Para esta sección se debe considerar que no se sabe con exactitud cuales radiobases pertenecen al operador AT&T y cuales al operador TELCEL. El objetivo de realizar la comparación es el de verificar si en el lugar donde la simulación indica que se tiene cobertura mediante las mediciones realizadas por la aplicación se pueda comprobar la información.

- La figura 65 muestra la comparación de los resultados experimentales obtenidos del operador AT&T en el sistema de telefonía celular 4G con los obtenidos en la simulación.

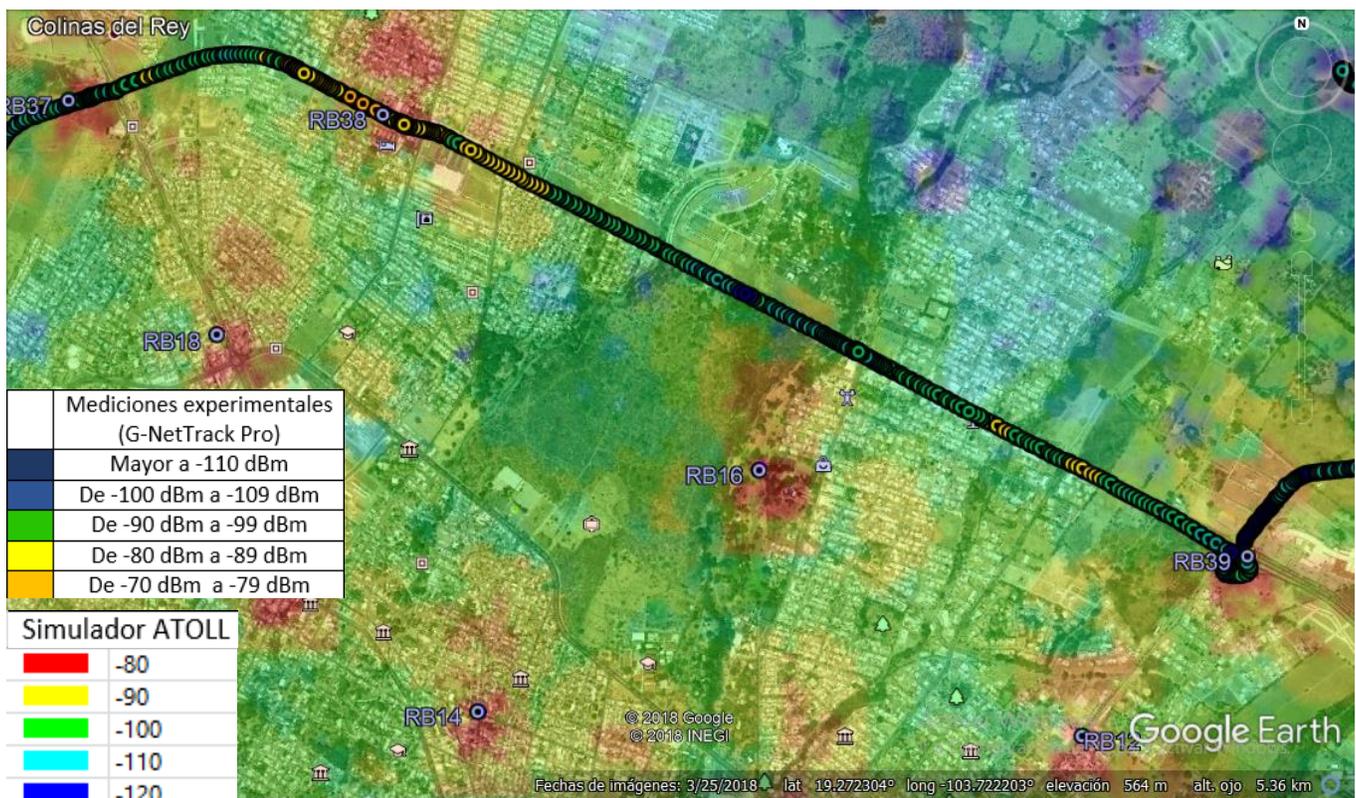


Figura 65. Comparación de los resultados experimentales obtenidos del operador AT&T en el sistema de telefonía celular 4G y los obtenidos teóricamente.

En la figura 66 se puede observar que la intensidad de señal que indica la aplicación coincide con los resultados obtenidos en la simulación. Dentro de la comparación también se tienen valores que no son similares, esto se puede deber a que posiblemente las radiobases pertenecen al operador de TELCEL o al mismo operador (AT&T) pero sus transmisores proporcionan servicios de telefonía celular 3G.

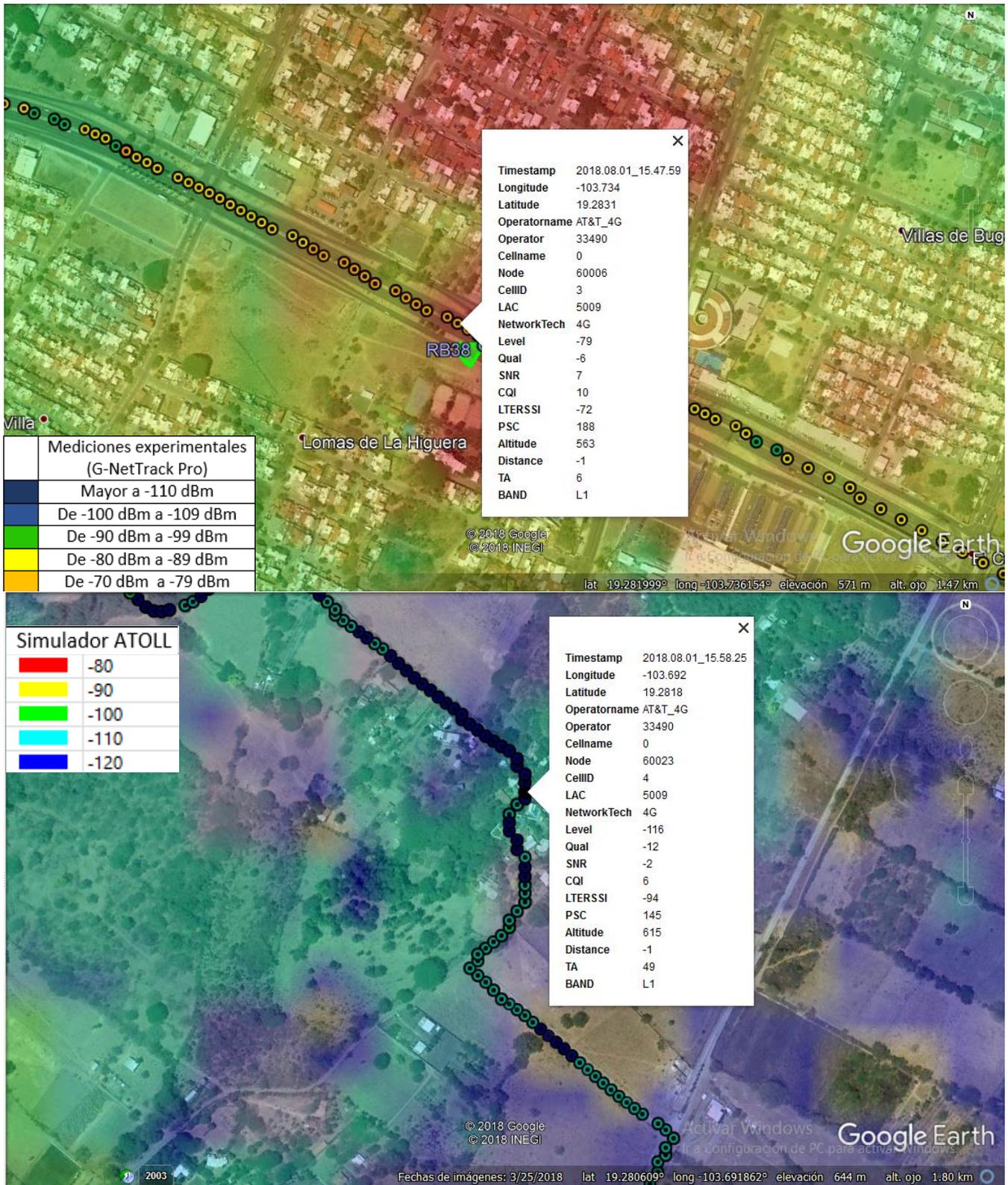


Figura 66. Comparación de ambos resultados obtenidos mediante la simulación ATOLL y la aplicación G-NetTrack Pro.

- Comparación de los resultados experimentales obtenidos del operador TELCEL en el sistema de telefonía celular 4G con los obtenidos en la simulación:

En este caso se encontró que había resultados obtenidos de la simulación que no coincidían con los resultados experimentales, esto se puede observar en la figura 67. Por lo que se realizó un recorrido en la zona con ayuda del programa Google Earth y se encontró una radiobase que no había sido considerada anteriormente.

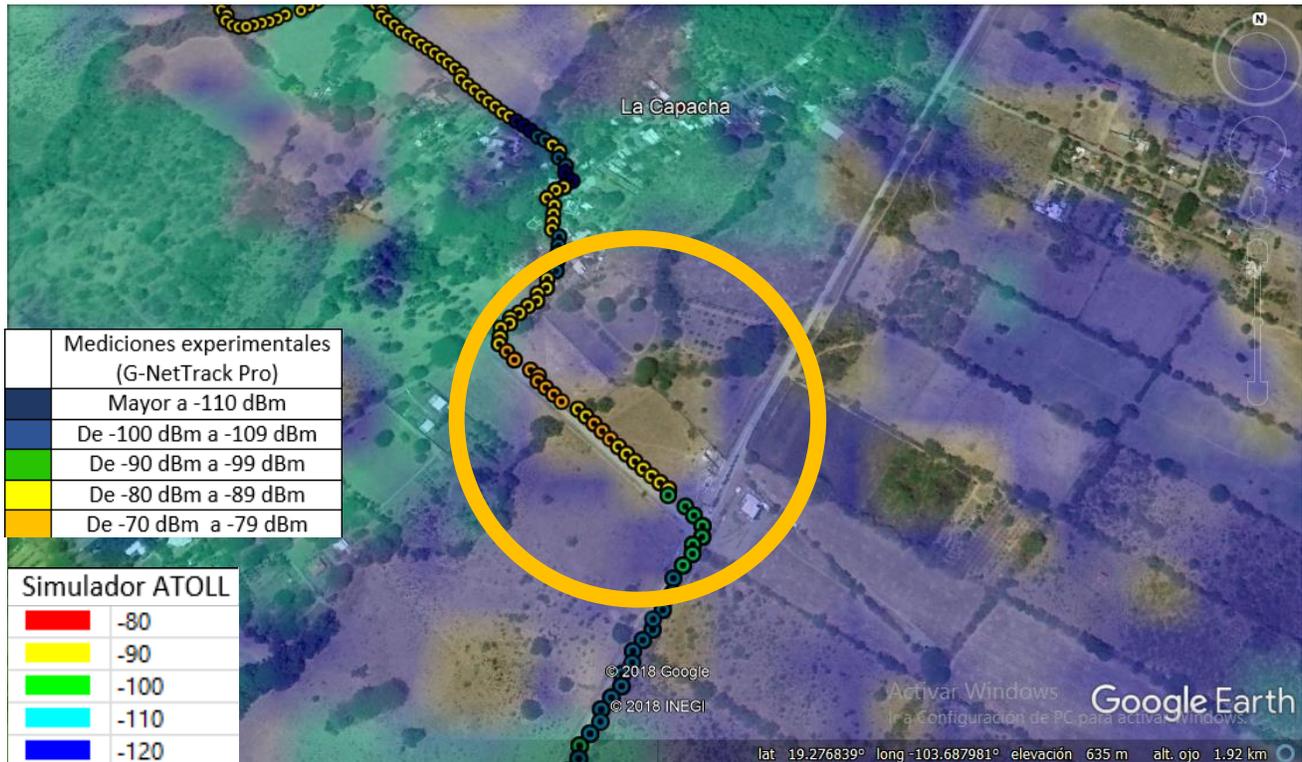


Figura 67. Radiobase que no se había considerado anteriormente.

Una vez que se identificó la ubicación de la radiobase faltante, se agregó y configuro como se hizo con las anteriores y nuevamente se corroboraron los resultados los que ya presenta una mayor coincidencia. Esto se puede observar en la figura 68.

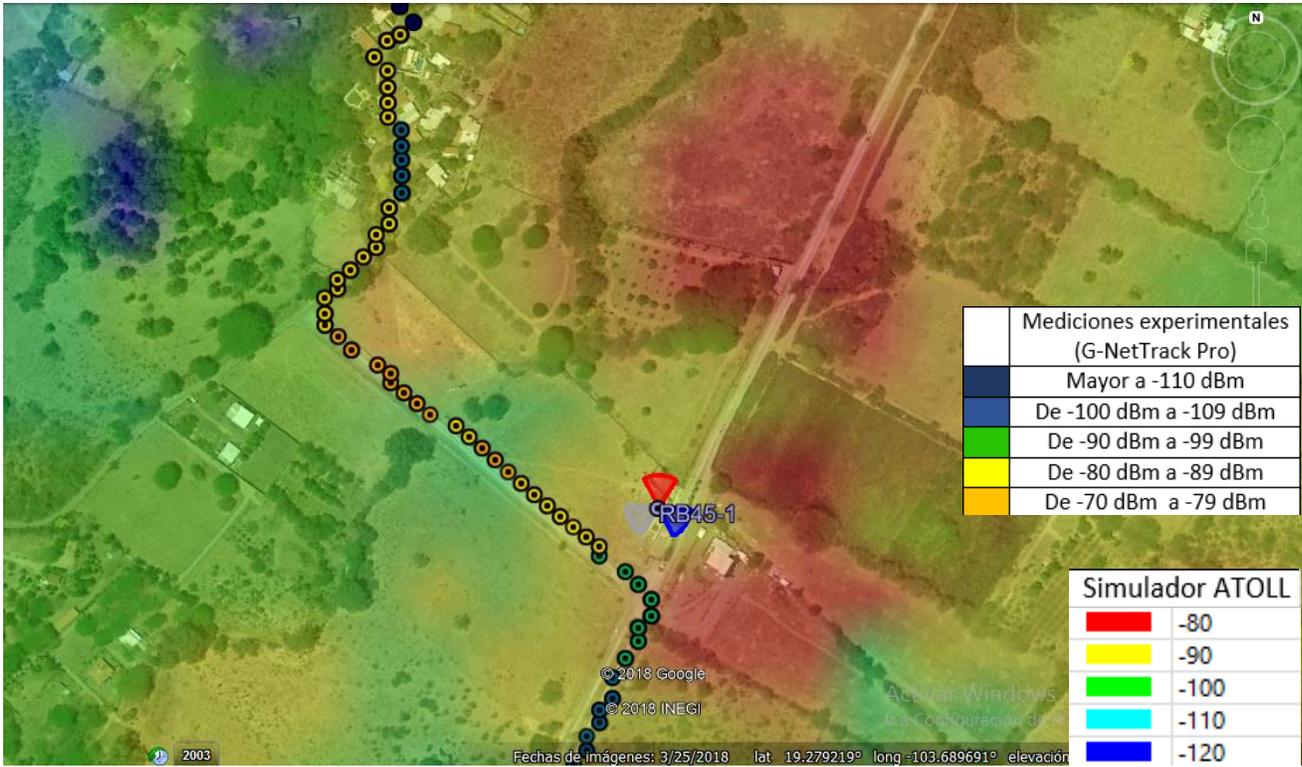


Figura 68. Comparación de los resultados obtenidos, considerando la radiobase faltante.

Con esto se puede comprobar que la simulación de cobertura del sistema de telefonía celular en el sistema 4G en ambos operadores se asemeja de forma considerable por lo que se puede concluir que la simulación es muy aproximada a la realidad. Algunos datos que no fueron considerados son: orientación exacta de las antenas transmisoras de las radiobases, identificar a que operador corresponde cada una de ellas, la potencia de transmisión real, etc.

- Comparación de los resultados experimentales obtenidos del operador TELCEL en el sistema de telefonía celular 3G con los obtenidos en nuestra simulación:

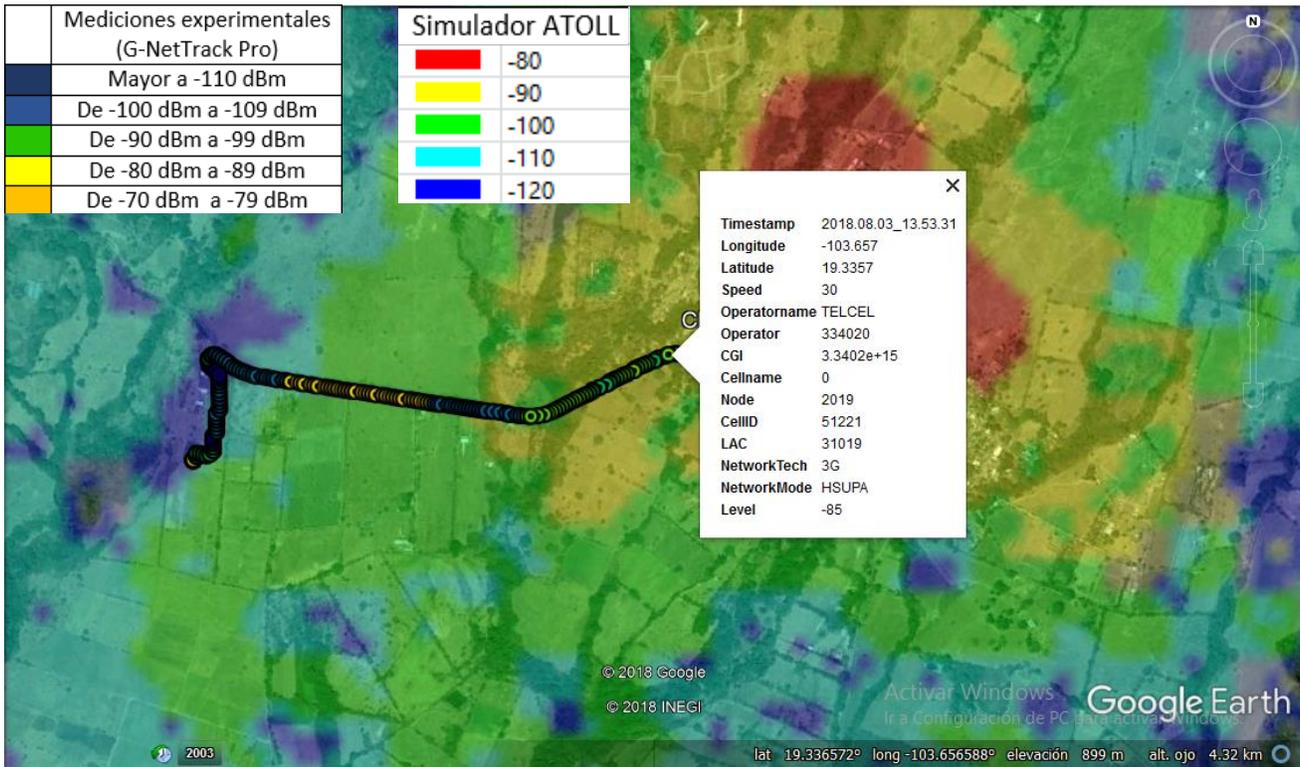


Figura 69. Comparación de los resultados obtenidos mediante la simulación ATOLL y la aplicación G-NetTrack Pro, en caso con el operador TELCEL.

Una vez que se realizó la comparación de los resultados experimentales y teóricos, se procedió a verificar si en el lugar donde serán colocados los sensores se cuenta con el nivel mínimo de intensidad de señal necesario para poder transmitir por medio de un canal de telefonía celular la alerta en caso de que se detecte un incremento alarmante de los niveles del río.

Lo primero que se realizó fue localizar en donde serán colocados los sensores en el programa Google Earth cuya ubicación se muestra en la tabla 16 y en la figura 70 se muestra la ubicación de los sensores en dicho programa.

Sensores	Latitud	Longitud
1	19.172212	-103.827139
2	19.208246	-103.803261
3	19.258147	-103.756558
4	19.230072	-103.727544
5	19.250885	-103.723423
6	19.277929	-103.72939
7	19.335003	-103.673017

Tabla 16. Coordenadas de la ubicación de los sensores en el estado de Colima.

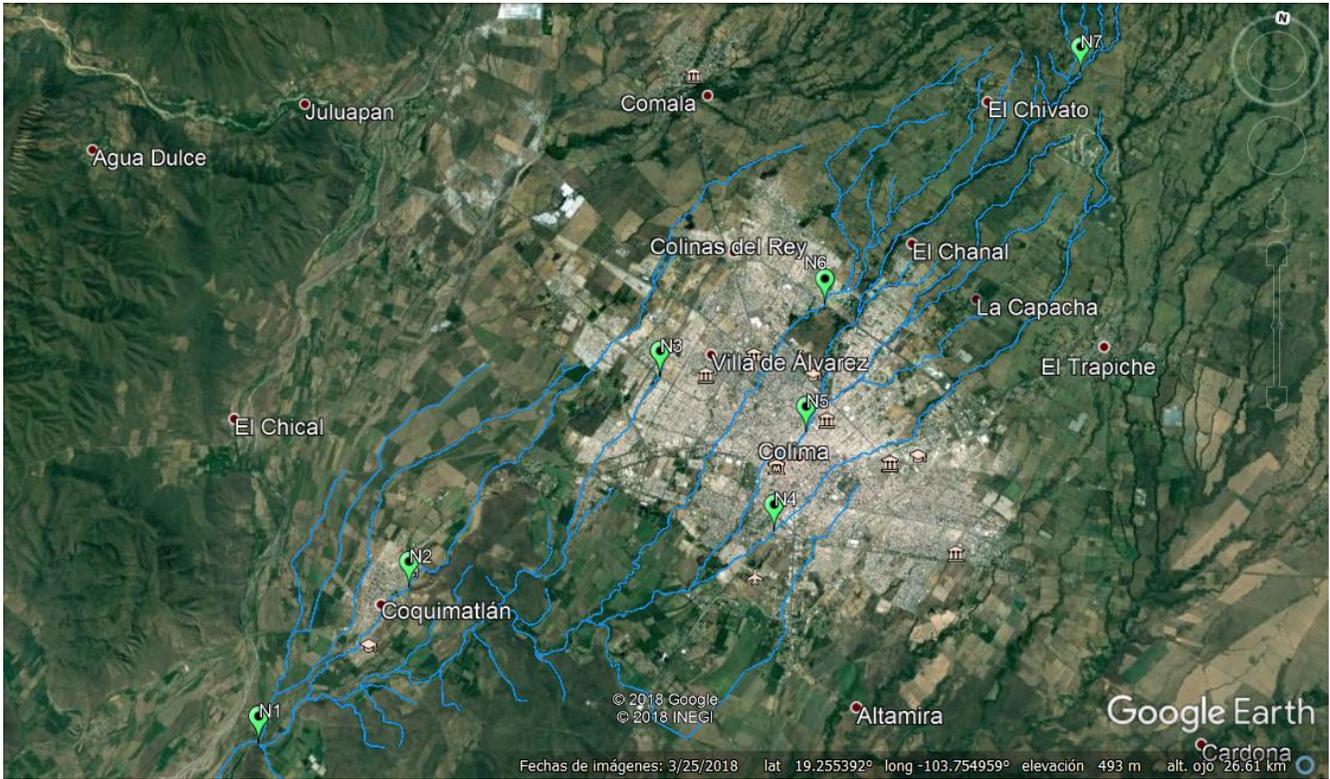


Figura 70. Ubicación de cada uno de los sensores así como también los ríos que se encuentran presentes en la Ciudad de Colima.

Posteriormente se analizó el nivel de intensidad de señal que se encuentra en cada uno de los sensores en ambos sistemas de telefonía celular (3G y 4G):

- Sensor 1.
 - Para el sistema de telefonía celular 4G en el punto donde será ubicado el sensor como se ve en la figura 71 se tiene el alcance de las radiobases siguientes:

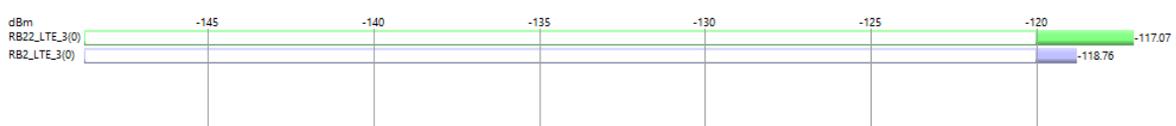


Figura 71. Señales emitidas por las radiobases 2 y 22.

En las figuras 72 y 73 se puede observar que no se cuenta con línea de vista.

Con la ayuda de amplificadores o repetidores se hace que la señal adquiera un nivel adecuado de tal manera que sea captada por el sensor y así establecer una comunicación entre las radiobases y el sensor.

➤ Radiobase 2 (RB2)



Figura 72. En esta figura se puede observar que el sensor no cuenta con línea de vista con el transmisor debido a la geografía presente en esta ciudad.

➤ Radiobase 22 (RB22)



Figura 73. En esta figura se puede observar que el sensor no cuenta con línea de vista con el transmisor debido a la geografía presente en esta ciudad.

- Para el sistema de telefonía celular 3G en el punto donde será ubicado el sensor se tiene el alcance de las radiobases mostradas en la figura 74 y 75:

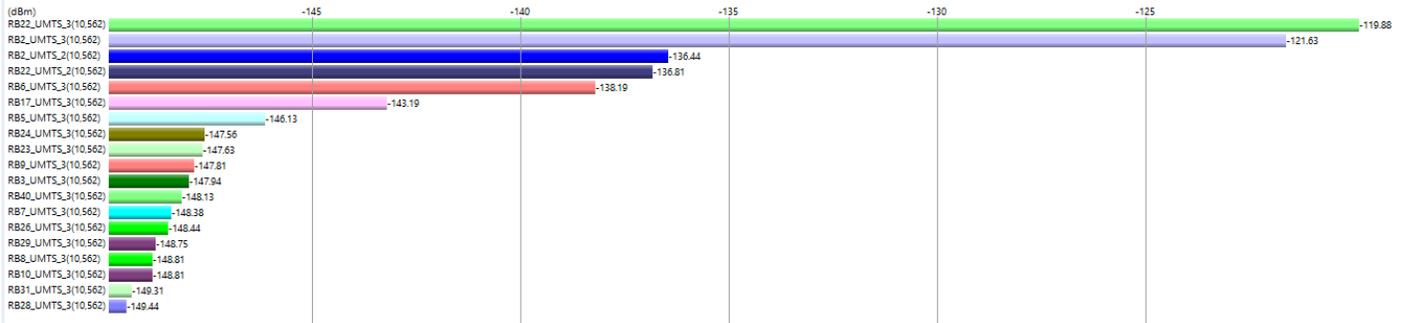


Figura 74. Señales emitidas por las radiobases, que pueden ser identificadas por el sensor.

Cell	Distance (m)	Path Loss (dB)	RSCP (dBm)
RB22_UMTS_3(10562)	4,611	170.88	-119.88
RB2_UMTS_3(10562)	4,560	172.63	-121.63
RB2_UMTS_2(10562)	4,560	187.44	-136.44
RB22_UMTS_2(10562)	4,611	187.81	-136.81
RB6_UMTS_3(10562)	8,407	189.19	-138.19
RB17_UMTS_3(10562)	12,369	194.19	-143.19
RB5_UMTS_3(10562)	12,362	197.13	-146.13
RB24_UMTS_3(10562)	9,616	198.56	-147.56
RB23_UMTS_3(10562)	9,462	198.63	-147.63
RB9_UMTS_3(10562)	14,430	198.81	-147.81

Figura 75. Características de las señales recibidas que son enviadas por las diferentes radiobases.

Como se puede ver en el punto donde estará localizado el sensor las señales emitidas por las radiobases 2 y 22 con ayuda de un amplificador o un repetidor se puede lograr que sean recibidas de forma correcta por el sensor debido a que en las figuras 72 y 73 se ven afectadas por la geografía de dicha zona.

- Sensor 2.
 - Para el sistema de telefonía celular 4G en el punto donde será ubicado el sensor número 2 se tiene el alcance de las radiobases mostradas en la figura 76.

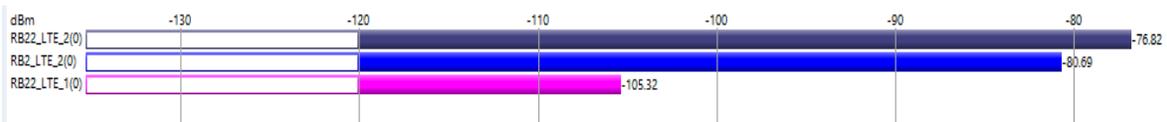


Figura 76. Señales emitidas por las radiobase 2 transmisor (2) y radiobase 22 transmisores (1 y 2) que pueden ser identificadas por el sensor.

Como se muestra en la figura 77 y 78, mismo caso que en el anterior debido a la geografía encontrada en esta zona con la ayuda de un amplificador o repetidor se puede lograr que las señales emitidas por la radiobase 2 transmisor (2) y radiobase 22 transmisor (1) puedan ser captadas por el sensor. En el caso de la señal emitida por la radiobase 22 transmisor (2) si cuenta con línea de vista, con lo que se tiene un nivel de intensidad de señal en el punto donde se localiza el sensor de aproximadamente -75 dBm que es un valor adecuado.

➤ Radiobase 22 (RB22)

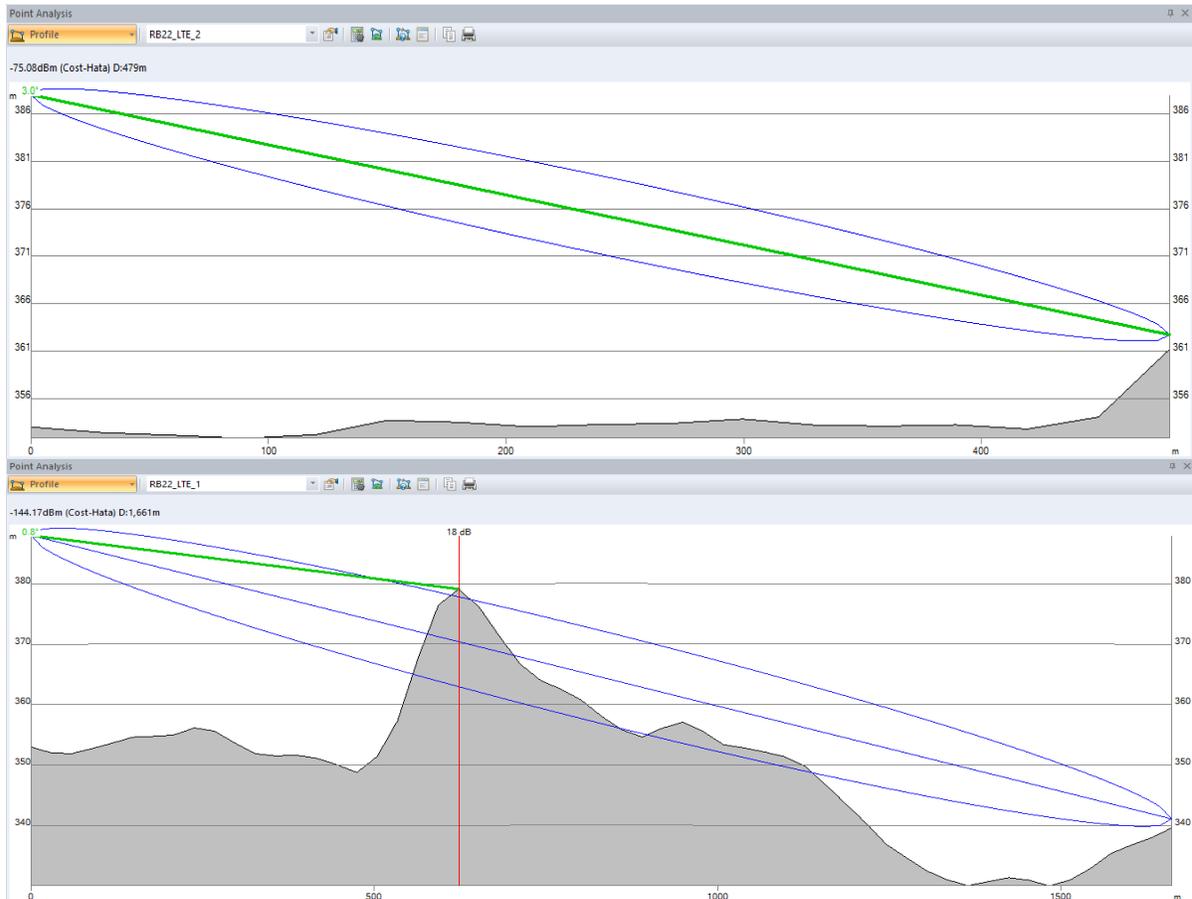


Figura 77. En esta figura se puede observar que el sensor número dos no presenta línea de vista con el radiobase 22 transmisor (1) y con el transmisor (2) si se presenta línea de vista.

➤ Radiobase 2 (RB2)



Figura 78. En esta figura se puede observar que el sensor número dos no presenta línea de vista con la radiobase 2 transmisor (2).

- Para el sistema de telefonía celular 3G en el punto donde será ubicado el sensor se tiene el alcance de las radiobases mostradas en la figura 79:

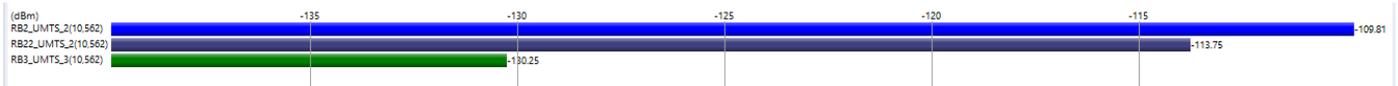


Figura 79. Señales emitidas por las radiobases que pueden ser identificadas por el sensor.

Cell	Distance (m)	Path Loss (dB)	RSCP (dBm)
RB2_UMTS_2(10562)	1,898	160.81	-109.81
RB22_UMTS_2(10562)	1,661	164.75	-113.75
RB3_UMTS_3(10562)	6,190	181.25	-130.25
RB4_UMTS_3(10562)	9,245	191.25	-140.25
RB23_UMTS_3(10562)	4,699	191.94	-140.94
RB24_UMTS_3(10562)	4,848	192.63	-141.63
RB5_UMTS_3(10562)	7,667	193.44	-142.44
RB7_UMTS_3(10562)	8,988	195.06	-144.06
RB2_UMTS_1(10562)	1,898	195.25	-144.25
RB30_UMTS_3(10562)	12,116	196.75	-145.75

Figura 80. Características de las señales recibidas que son enviadas por las diferentes radiobases.

En el punto en donde estará localizado el sensor las señales emitidas por la radiobase 22 transmisor (2) se cuenta con línea de vista (figura 77) y con un nivel adecuado de intensidad de señal. En el caso de las señales emitidas por la radiobase 2 transmisor (2) no se cuenta con línea de vista, pero con ayuda de un amplificador o repetidor como mencionamos anteriormente se puede lograr que la señal sea captada por el sensor y así poder establecer una conexión utilizando el sistema de telefonía celular 3G.

- Sensor 3.
 - Para el sistema de telefonía celular 4G en el punto donde será ubicado el sensor número 3 se tiene el alcance de las radiobases mostradas en la figura 81:

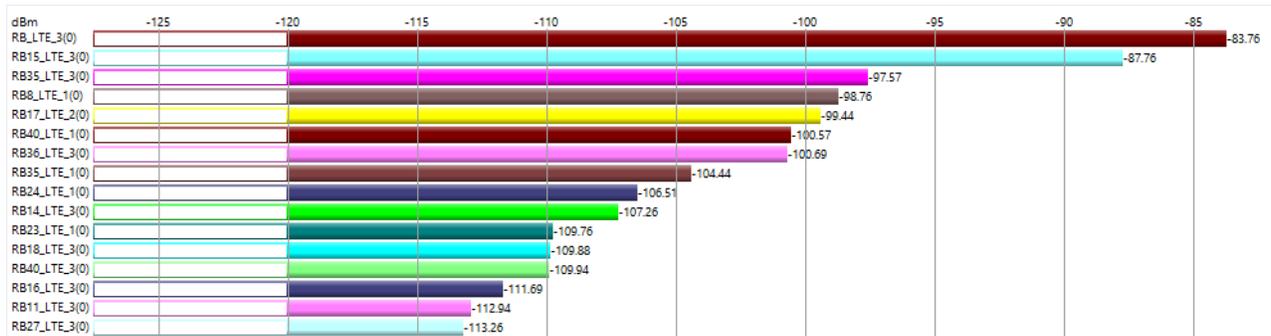


Figura 81. Señales emitidas por las radiobases que pueden ser identificadas por el sensor.

Este sensor está rodeado de múltiples radiobases cuyas señales emitidas son reconocidas sin ningún problema por el sensor. Lo ideal es ocupar un canal que sea transmitido por la radiobase 15 transmisor (3), radiobase 35 transmisor (3) y radiobase 0 transmisor (3). Aunque también se puede recurrir a la ayuda de un amplificador o repetidor para poder usar de igual manera los canales proporcionados por las radiobases restantes (figura 81). Esto se puede observar en la figuras 82, 83, 84, 85 y 86.

➤ Radiobase 0 (RB)



Figura 82. En esta figura se puede que el sensor número tres presenta línea de vista con la radiobase 0 transmisor (3).

➤ Radiobase 15 (RB15)

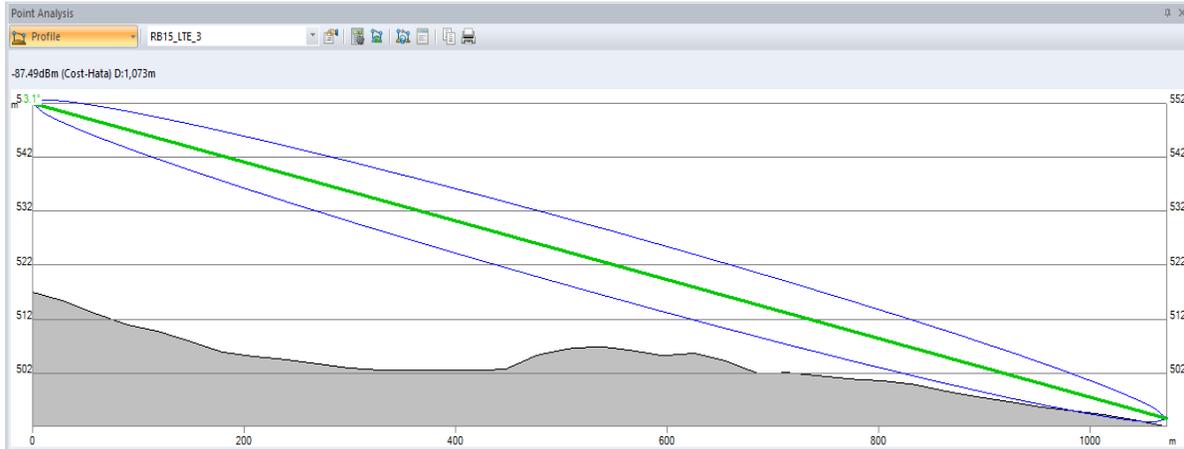


Figura 83. En esta figura se puede observar que el sensor número tres presenta línea de vista con la radiobase 15 transmisor (3).

➤ Radiobase 35 (RB35)



Figura 84. En esta figura se puede observar que el sensor número tres presenta línea de vista con la radiobase 35 transmisor (3). Pero la zona de fresnel se ve afectada por la geografía presente en esta ciudad.

➤ Radiobase 8 (RB8)



Figura 85. En esta figura se puede observar que el sensor número tres no presenta línea de vista con la radiobase 8 transmisor (1) al igual que la zona de fresnel se ve afectada por la geografía presente en esta ciudad.

➤ Radiobase 17 (RB17)



Figura 86. En esta figura se puede observar que el sensor número tres no presenta línea de vista con la radiobase 17 transmisor (2) al igual que la zona de fresnel se ve afectada por la geografía presente en esta ciudad.

- Para el sistema de telefonía celular 3G en el punto donde será ubicado el sensor se tiene el alcance de las radiobases mostradas en la figura 87 y 88:

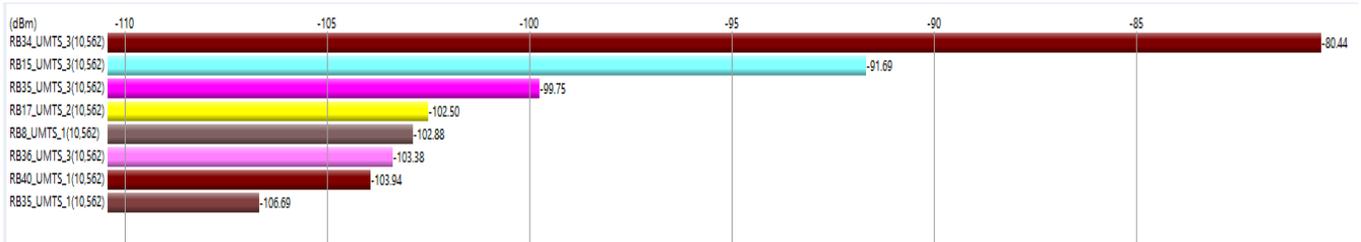


Figura 87. Señales emitidas por las radiobases que pueden ser identificadas por el sensor.

Cell	Distance (m)	Path Loss (dB)	RSCP (dBm)
RB34_UMTS_3(10562)	544	131.44	-80.44
RB15_UMTS_3(10562)	1,073	142.69	-91.69
RB35_UMTS_3(10562)	1,302	150.75	-99.75
RB17_UMTS_2(10562)	2,027	153.5	-102.5
RB8_UMTS_1(10562)	1,746	153.88	-102.88
RB36_UMTS_3(10562)	2,092	154.38	-103.38
RB40_UMTS_1(10562)	2,009	154.94	-103.94
RB35_UMTS_1(10562)	1,302	157.69	-106.69
RB14_UMTS_3(10562)	2,802	162.19	-111.19
RB24_UMTS_1(10562)	2,605	162.38	-111.38

Figura 88. Características de las señales recibidas que son enviadas por las diferentes radiobases.

En este caso los canales indicados a utilizar para establecer una conexión con el sensor número 3 son los proporcionados por las radiobases 34 transmisor (3), 15 transmisor (3) y 35 transmisor (3). Las radiobases restantes también pueden utilizadas siempre y cuando se haga uso de un amplificador o un repetidor para lograr tener línea de vista en la conexión.

- Sensor 4.
 - Para el sistema de telefonía celular 4G en el punto donde será ubicado el sensor número 4 se tiene el alcance de las radiobases mostradas en la figura 89:

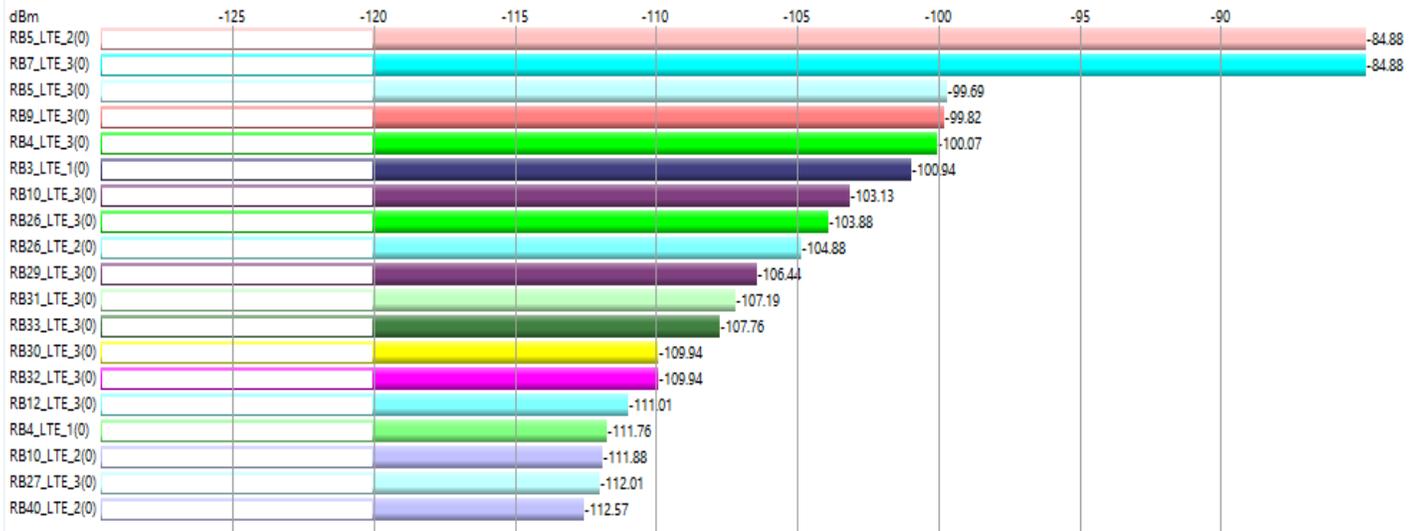


Figura 89. Señales emitidas por las radiobases que pueden ser identificadas por el sensor.

En la figuras 90, 91, 92 y 93 se muestra que este sensor está rodeado por múltiples canales que son proporcionados por diversas radiobases, que en su mayoría presentan línea de vista con nuestro sensor por lo que no habrá necesidad de utilizar amplificadores o repetidores para aumentar la intensidad de la señal.

➤ Radiobase 5 (RB5)

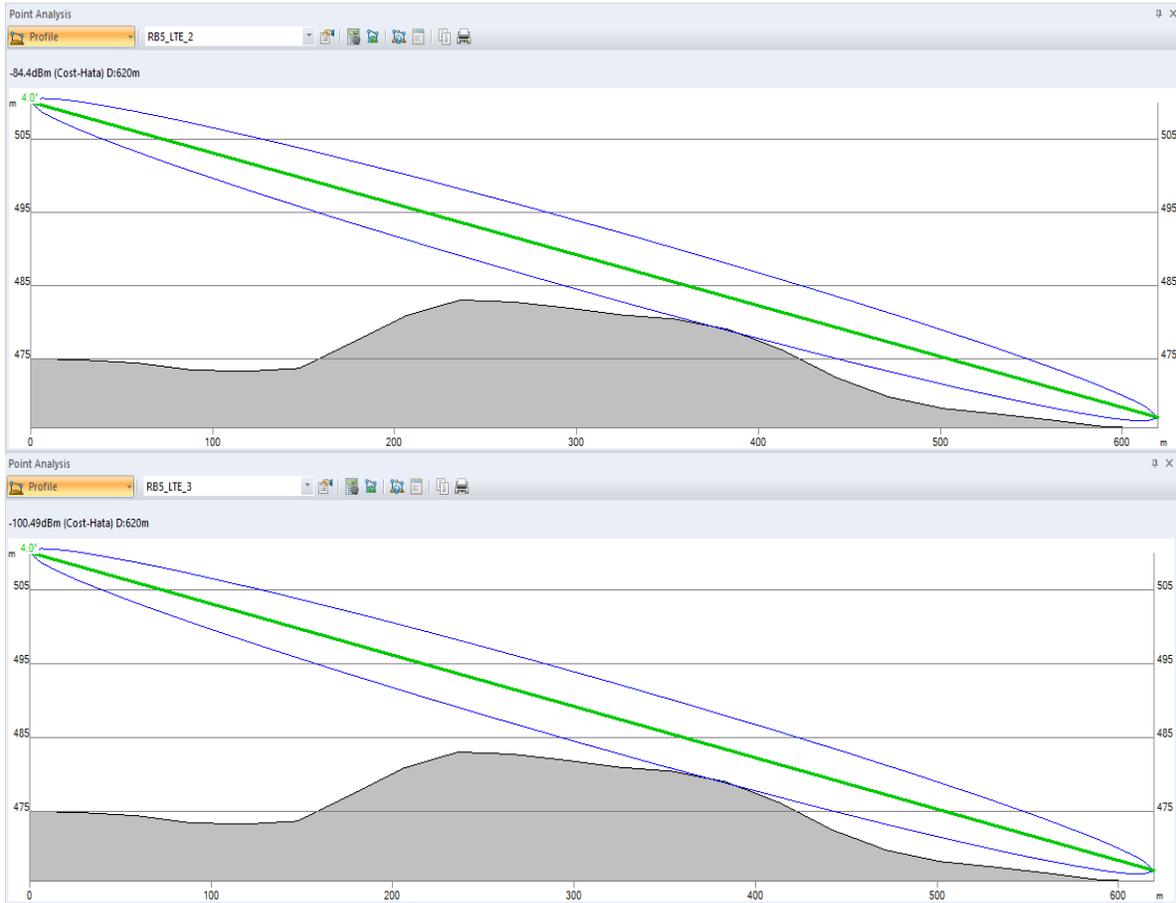


Figura 90. En esta figura se puede que el sensor número cuatro presenta línea de vista con la radiobase 5 transmisor (2) y transmisor (3).

➤ Radiobase 7 (RB7)



Figura 91. En esta figura se puede observar que el sensor número cuatro presenta línea de vista con la radiobase 7 transmisor (3). Pero se debe de considerar que la zona de fresnel se ve afectada por la geografía de la zona.

➤ Radiobase 9 (RB9)



Figura 92. En esta figura se puede observar que el sensor número cuatro no presenta línea de vista con la radiobase 9 transmisor (3).

➤ Radiobase 4 (RB4)



Figura 93. En esta figura se puede observar que el sensor número cuatro presenta línea de vista con la radiobase 4 transmisor (3).

- Para el sistema de telefonía celular 3G en el punto donde será ubicado el sensor se tiene el alcance de las radiobases mostradas en la figura 94 y 95.

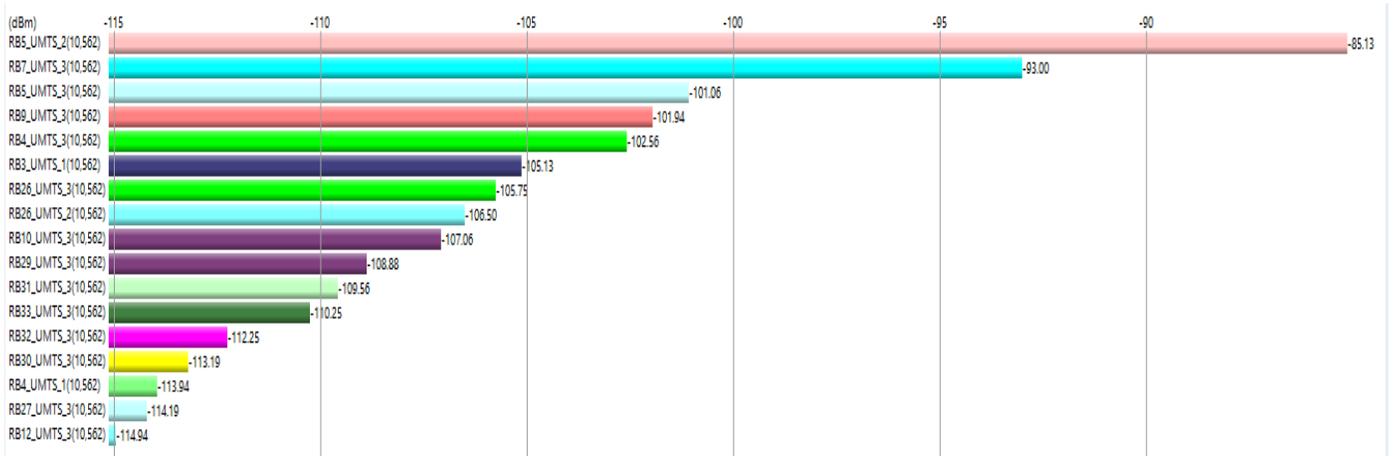


Figura 94. Señales emitidas por las radiobases que pueden ser identificadas por el sensor.

Cell	Distance (m)	Path Loss (dB)	RSCP (dBm)
RB5_UMTS_2(10562)	620	136.13	-85.13
RB7_UMTS_3(10562)	1,417	144	-93
RB5_UMTS_3(10562)	620	152.06	-101.06
RB9_UMTS_3(10562)	2,251	152.94	-101.94
RB4_UMTS_3(10562)	1,921	153.56	-102.56
RB3_UMTS_1(10562)	1,810	156.13	-105.13
RB26_UMTS_3(10562)	1,679	156.75	-105.75
RB26_UMTS_2(10562)	1,679	157.5	-106.5
RB10_UMTS_3(10562)	2,115	158.06	-107.06
RB29_UMTS_3(10562)	3,049	159.88	-108.88

Figura 95. Características de las señales recibidas que son enviadas por las diferentes radiobases.

En este caso los canales indicados a utilizar para establecer una conexión con el sensor número 4 son los proporcionados por las radiobases 5 transmisor (2), 7 transmisor (3), 5 transmisor (3), 9 transmisor (3), 4 transmisor (3), etc. Esto se debe a la ubicación de nuestro sensor, ya que se encuentran rodeado de radiobases que proporcionan canales cuya intensidad de señal es adecuada.

- Sensor 5.
 - Para el sistema de telefonía celular 4G en el punto en donde será ubicado el sensor número 5 se tiene el alcance de las radiobases mostradas en la figura 96.

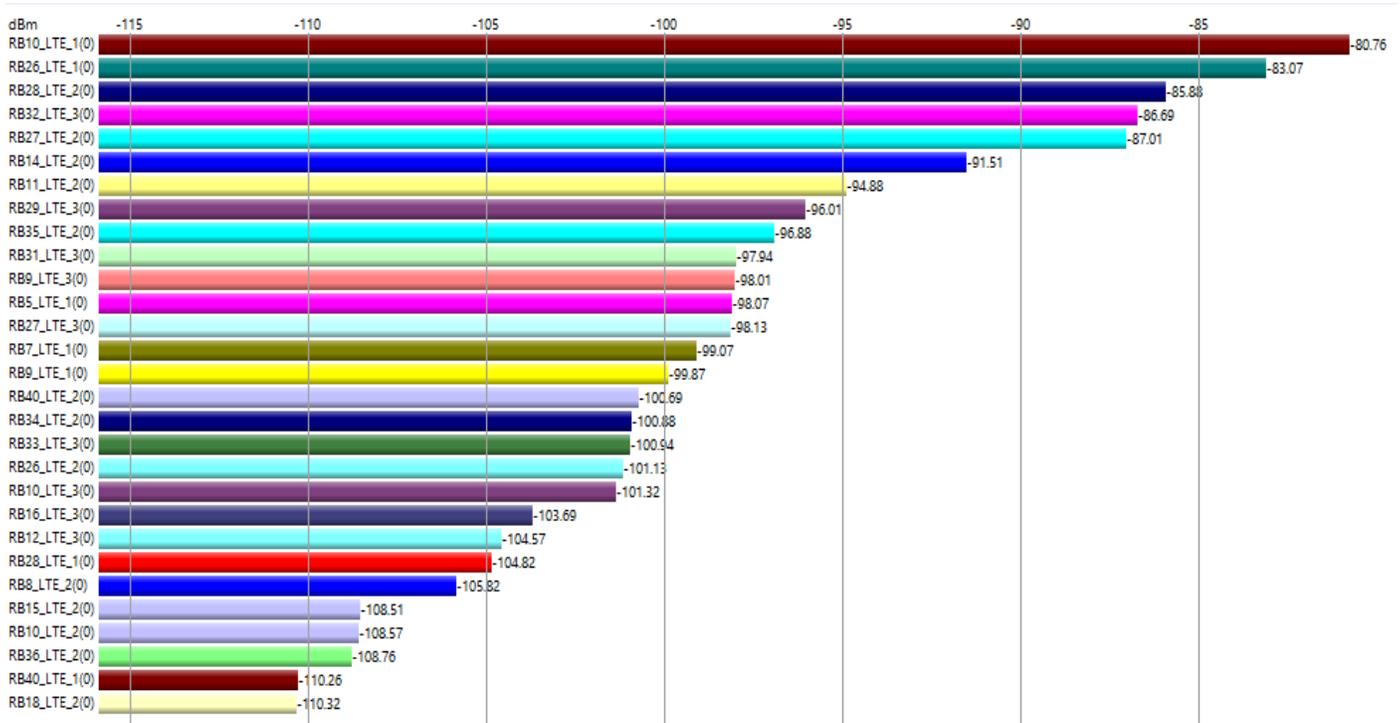


Figura 96. Señales emitidas por las radiobases que pueden ser identificadas por el sensor.

En las figuras 97, 98 y 99 se puede ver que al igual que el sensor número 4 este sensor tiene una ubicación que se encuentra rodeada de múltiples radiobases que tiene línea de vista y a su vez proporcionan varios canales que presentan un nivel de intensidad de señal adecuado con la que pueden ser identificados por el sensor y establecer una comunicación con las radiobases.

➤ Radiobase 10 (RB10)

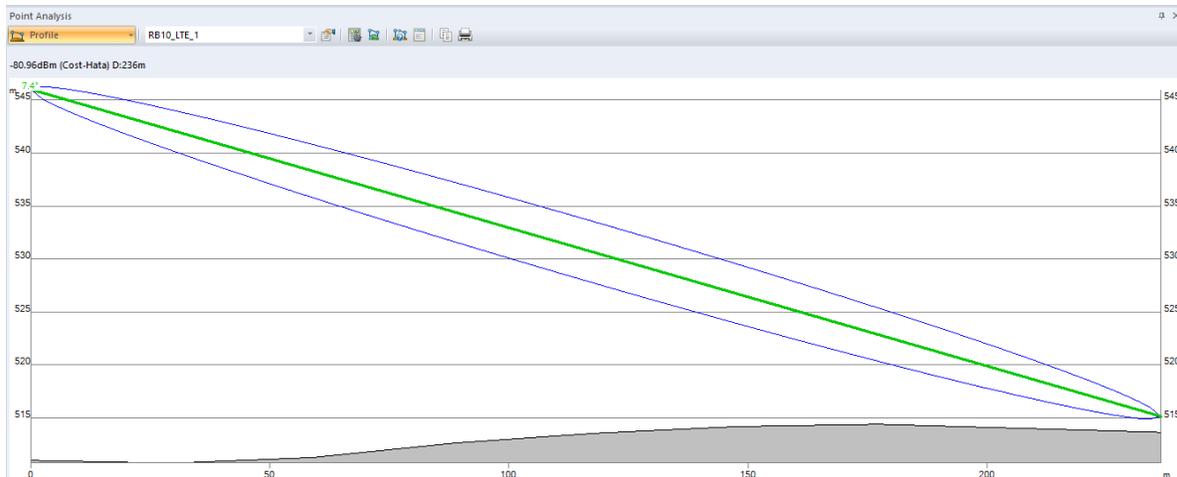


Figura 97. En esta figura se puede observar que el sensor número cinco presenta línea de vista con la radiobase 10 transmisor (1).

➤ Radiobase 26 (RB26)



Figura 98. En esta figura se puede observar que el sensor número cinco presenta línea de vista con la radiobase 26 transmisor (1).

➤ Radiobase 28 (RB28)



Figura 99. En esta figura se puede observar que el sensor número cinco presenta línea de vista con la radiobase 28 transmisor (2).

- Para el sistema de telefonía celular 3G en el punto donde será ubicado el sensor se tiene el alcance de las radiobases mostradas en la figura 100 y 101.

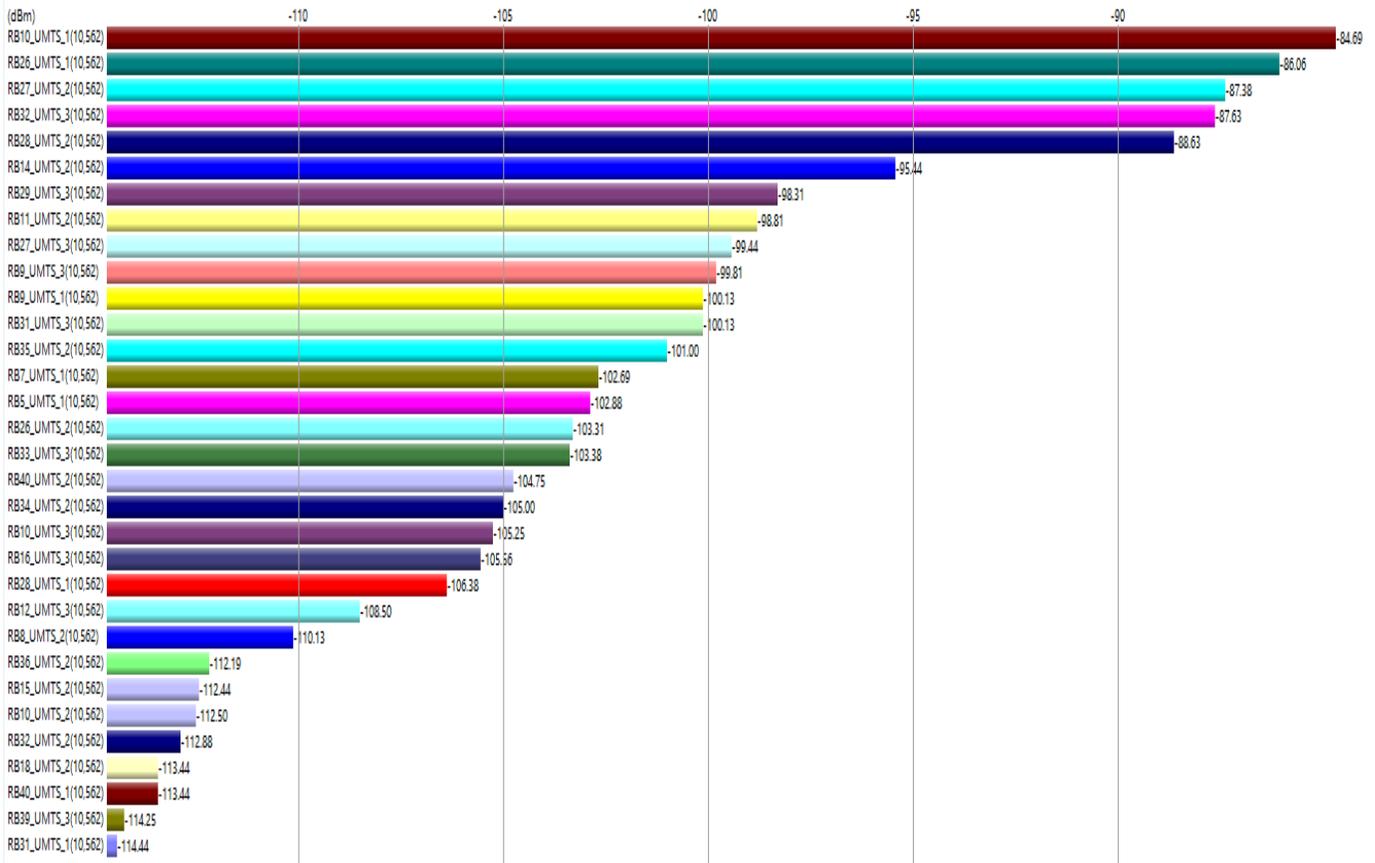


Figura 100. Señales emitidas por las radiobases que pueden ser identificadas por el sensor.

Cell	Distance (m)	Path Loss (dB)	RSCP (dBm)
RB10_UMTS_1(10562)	236	135.69	-84.69
RB26_UMTS_1(10562)	750	137.06	-86.06
RB27_UMTS_2(10562)	639	138.38	-87.38
RB32_UMTS_3(10562)	915	138.63	-87.63
RB28_UMTS_2(10562)	910	139.63	-88.63
RB14_UMTS_2(10562)	1,315	146.44	-95.44
RB29_UMTS_3(10562)	1,703	149.31	-98.31
RB11_UMTS_2(10562)	1,776	149.81	-98.81
RB27_UMTS_3(10562)	639	150.44	-99.44
RB9_UMTS_3(10562)	1,186	150.81	-99.81

Figura 101. Características de las señales recibidas que son enviadas por las diferentes radiobases.

En este caso los canales indicados a utilizar para establecer una conexión con nuestro sensor son todos los mostrados en la figura 100, debido a como se mencionó anteriormente la ubicación de este sensor permite tener línea de vista con un número considerable de radiobases.

- Sensor 6.
 - Para el sistema de telefonía celular 4G en el punto donde será ubicado el sensor número 6 se tiene el alcance de las radiobases mostradas en la figura 102.

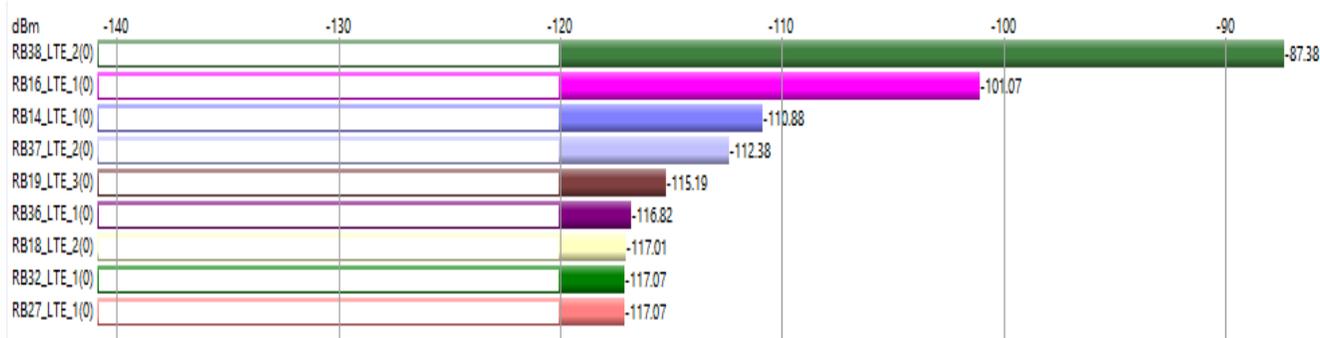


Figura 102. Señales emitidas por las radiobases que pueden ser identificadas por el sensor.

En las figuras 103 y 104 se puede ver que la ubicación de este sensor solamente nos permite tener línea de vista con la radiobase 38 transmisor (2) por lo que solamente es viable utilizar un canal de telefonía celular emitido por esta misma. También se puede ocupar un canal emitido por la radiobase 16 transmisor (1) si utilizamos un amplificador o repetidor.

➤ Radiobase 38 (RB38)



Figura 103. En esta figura se puede observar que el sensor número seis presenta línea de vista con la radiobase 38 transmisor (2). Aunque también se observa que se ve afectada nuestra zona de fresnel por la geografía de esta ciudad.

➤ Radiobase 16 (RB16)



Figura 104. En esta figura se puede observar que el sensor número seis no presenta línea de vista con la radiobase 16 transmisor (1).

- Para el sistema de telefonía celular 3G en el punto donde será ubicado el sensor se tiene el alcance de las radiobases mostradas en la figura 105 y 106.

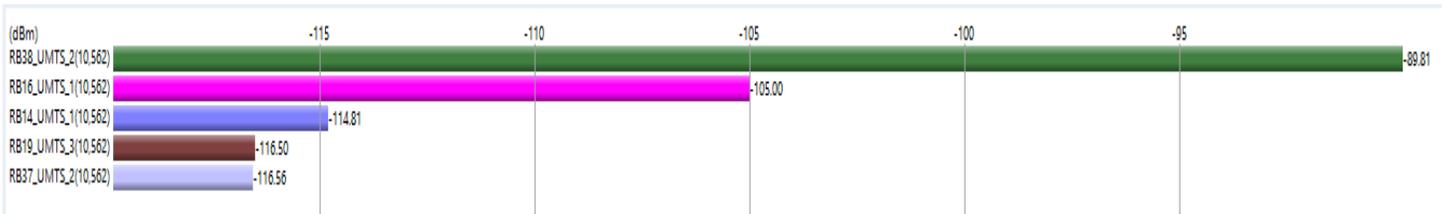


Figura 105. Señales emitidas por las radiobases que pueden ser identificadas por el sensor.

Cell	Distance (m)	Path Loss (dB)	RSCP (dBm)
RB38_UMTS_2(10562)	1,251	140.81	-89.81
RB16_UMTS_1(10562)	978	156	-105
RB14_UMTS_1(10562)	2,023	165.81	-114.81
RB19_UMTS_3(10562)	2,672	167.5	-116.5
RB37_UMTS_2(10562)	2,489	167.56	-116.56

Figura 106. Características de las señales recibidas que son enviadas por las diferentes radiobases.

Como se puede ver solamente es posible utilizar el canal emitido por la radiobase 38 transmisor (2) ya que con las radiobases restantes no se cuenta con línea de vista a menos se haga uso de un amplificador o un repetidor.

- Sensor 7.
 - Para el sistema de telefonía celular 4G en el punto donde será ubicado el sensor número 7 se tiene el alcance de las radiobases mostradas en la figura 107.

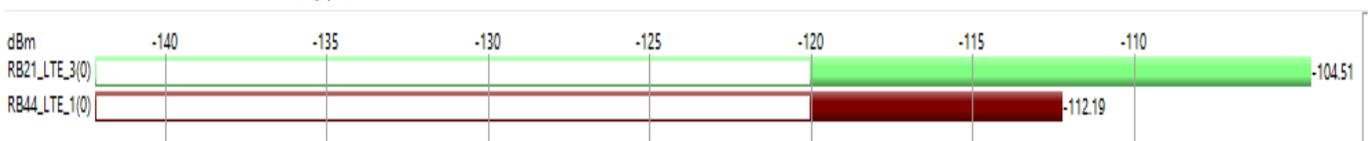


Figura 107. Señales emitidas por las radiobases que pueden ser identificadas por nuestro sensor.

En la figura 108 se observa que en este caso el sensor siete solamente puede utilizar un canal emitido por la radiobase 21 transmisor 3 con la ayuda de un amplificador o un repetidor ya que no se presenta línea de vista y la comunicación se puede ver afectada por la geografía presente en la zona.

➤ Radiobase 21 (RB21)



Figura 108. En esta figura se puede observar que el sensor número siete no presenta línea de vista con la radiobase 21 transmisor (3).

- Para el sistema de telefonía celular 3G en el punto donde será ubicado el sensor se tiene el alcance de las radiobases mostradas en la figura 109 y 110.

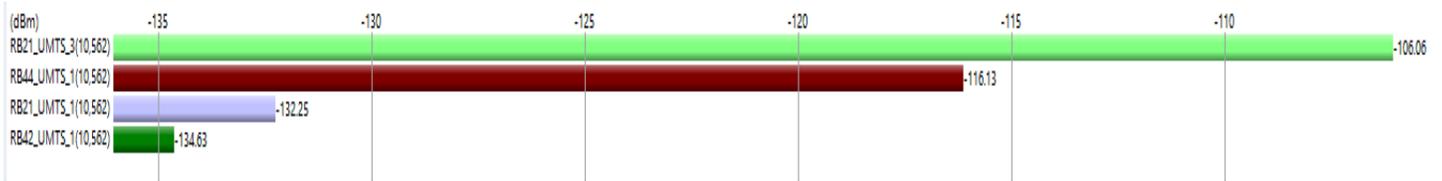


Figura 109. Señales emitidas por las radiobases que pueden ser identificadas por el sensor.

Cell	Distance (m)	Path Loss (dB)	RSCP (dBm)
RB21_UMTS_3(10562)	2,102	157.06	-106.06
RB44_UMTS_1(10562)	3,496	167.13	-116.13
RB21_UMTS_1(10562)	2,102	183.25	-132.25
RB42_UMTS_1(10562)	5,917	185.63	-134.63

Figura 110. Características de las señales recibidas que son enviadas por las diferentes radiobases.

Como mencionamos anteriormente también al utilizar el sistema de telefonía celular 3G solamente será posible que nuestro sensor identifique un canal emitido por la radiobase 21 transmisor (3) con ayuda de un amplificador o un repetidor ya que nuestra línea de vista se ve afectada por la geografía en esta zona y también la ubicación de dicho sensor se encuentra a una distancia considerable de las demás radiobases.

CONCLUSIONES

En los resultados se obtuvo un estudio de cobertura aproximado ya que al momento de realizar la simulación no fueron considerados diversos factores como son: la orientación real de los transmisores, los modelos reales de las antenas que son utilizadas, la potencia real de transmisión de cada uno de las radiobases, etc.

El tener las mediciones obtenidas por medio de la aplicación y las mediciones proporcionadas por la simulación se pudo realizar una comparación de ambos resultados. Posteriormente se hizo un ajuste a la simulación en cuanto al modelo de propagación utilizado ya que primeramente fue elegido el modelo Okumura-Hata y los resultados variaban de forma considerable comparándolos con las mediciones proporcionadas por la aplicación G-NetTrack Pro. Debido a esto el modelo Okumura-Hata se reemplazó por el modelo Cost-Hata. Y una vez realizada esta modificación en la simulación los resultados fueron similares a los obtenidos por la aplicación. El cambio en los resultados se debe a que cada uno de los modelos de propagación fueron desarrollados en entornos diferentes y con características independientes como por ejemplo frecuencia de operación, distancia entre la antena y el UE, la altura en ambas antenas, etc.

Una vez que fue obtenida nuestra simulación final se colocaron los sensores para verificar si se cuenta con cobertura de telefonía celular en los puntos que fueron elegidos para su ubicación. Con esto se puede observar mediante la intensidad de señal obtenida en cada uno de los sensores que efectivamente la geografía presente en la ciudad de Colima será un obstáculo para los sensores 1 y 7 (figura 70). También se debe considerar que los sensores 1 y 7 se encuentran alejados de las radiobases por lo que será necesario implementar repetidores o amplificadores para poder establecer una comunicación con cada uno de estos. En cuanto a los sensores restantes estos poseen una cobertura necesaria ya que se encuentran localizados en lugares donde se ubican radiobases cercanas.

Con lo antes mencionado se puede decir que se lograron los objetivos mostrados inicialmente en este trabajo ya que se tiene una idea de qué nivel de intensidad de señal es detectada por los sensores por parte de cada una de las radiobases localizadas en esta ciudad.

Gracias a este trabajo pude comprender cuales son los pasos generales para realizar un estudio de cobertura, aprendí a utilizar dos herramientas importantes (aplicación G-NetTrack Pro y el simulador ATOLL) que no solamente son utilizadas para fines académicos, sino que también son utilizadas en proyectos en los que se realiza el diseño de una red de telefonía celular y las empresas proveedoras de servicios de telefonía celular de igual manera utilizan estas herramientas para hacer crecer su infraestructura.

Finalmente estos fueron los pasos que se siguieron al momento de realizar el estudio de cobertura de telefonía celular. Primero se tuvo que realizar una investigación sobre el funcionamiento, arquitectura y componentes de los sistemas de telefonía celular 2G, 3G y

4G. Esta investigación me ayudó a profundizar y comprender de la mejor manera los temas que fueron abarcados en este trabajo.

Una vez realizada la investigación anterior se realizó una recolección de los datos que fueron utilizados al momento de realizar la simulación como son las bandas de frecuencia en las que operan los proveedores de servicios de telefonía celular, los parámetros utilizados para configurar los transmisores, ubicación de las radiobases en estado de Colima, etc.

Para continuar con la recolección de datos experimentales con ayuda de la aplicación G-NetTrack Pro se realizaron las pruebas en diversos lugares de la Ciudad de México, que ayudaron a familiarizarme con esta aplicación y así poder interpretar de mejor forma los resultados obtenidos. Así como también se comprobó la efectividad de la aplicación G-NetTrack Pro mediante la comparación de los valores de los parámetros mostrados en un analizador de espectros y esta misma aplicación.

Al iniciar con el desarrollo de la simulación para que se tuviera mayor facilidad al momento de interpretar los resultados se descargaron y agregaron las imágenes satelitales al simulador. Posteriormente se incorporaron cada una de las radiobases y se configuraron. Gracias a la realización de esta simulación se pudo corroborar cómo afecta el entorno a la señal emitida por cada una de la radiobases, la cobertura aproximada que se tiene en este estado, etc.

REFERENCIAS

- [1] Universidad de Colima Grupo de Análisis Evaluación, Gestión de Riesgos de la U. de C. (GAEGRUC), Betrán M., Ramírez J. J., Muñiz J. Jesús, González J.,... Ramírez J. D. (2016, 9 de Enero). Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Colima 2014. DEL GOBIERNO MUNICIPAL H. AYUNTAMIENTO CONSTITUCIONAL DE COLIMA, COL. Recuperado el día 13 de enero de 2019 de <http://www.periodicooficial.col.gob.mx/p/09012016/sup04/46010901.pdf>
- [2] Universidad de Colima (2014). Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Colima 2014 Recuperado el día 15 de enero de 2019 de <http://www.atlascolima.org/geoweb/>
- [3] Gutiérrez A. (2017). México y Reino Unido desarrollan modelo para predicción de inundaciones. Recuperado el día 28 de Abril de 2019 de <http://cienciamx.com/index.php/tecnologia/tic/15376-mexico-y-reino-unido-desarrollan-modelo-para-prediccion-de-inundaciones>
- [4] EWIN. RED DE EMERGENCIA DE INFORMACIÓN SOBRE EL AGUA. Recuperado el día 28 de Abril de 2019 de <http://ewin.corporativostr.com/>
- [5] Shootill Ltd (2014). Shootill GaugeMap. Recuperado el día 28 de Abril de 2019 de <https://www.gaugemap.co.uk/#!Map>
- [6] Universidad internacional de Valencia (2018). Evolución de la Red de la red de comunicación móvil del 1G al 5G. Recuperado el día 27 de Enero de 2019, de <https://www.universidadviu.com/evolucion-la-red-comunicacion-movil-del-1g-al-5g/>
- [7] Rodríguez O., Hernández R., Torno L., García L., Rodríguez R. (2010). Telefonía móvil celular: origen, evolución, perspectivas. Recuperado el día 27 de enero de 2019, de <https://www.redalyc.org/pdf/1815/181517913002.pdf>
- [8] Huidobro J. (2014). Comunicaciones Móviles. Sistemas GSM, UMTS y LTE. 3ª edición. Ciudad de México. ALFAOMEGA GRUPO EDITOR, S.A. DE C.V
- [9] UI I., Ur Z., Ali S., Faisal M. (2017). GSM Technology: Architecture, Security and Future Challenges. International Journal of Science Engineering and Advance Technology
- [10] Sector de Radiocomunicaciones de la UIT (2012). Vocabulario de términos de las telecomunicaciones móviles internacionales (IMT). Rec. UIT-R M. 1224-1 pp. 43
- [11] Fernández V. (2010). Ejemplo de diseño e implementación de una estación base GSM/UMTS.
- [12] Rey Eugenio. (1999). Telecomunicaciones Móviles. 2ª edición. Ciudad de México. ALFAOMEGA GRUPO EDITOR, S.A. DE C.V
- [13] Kaaranen H., Ahtainen A., Laitinen L., Naghian S., Niemi V. (2006). Redes UMTS. Arquitectura, movilidad y servicios. 2ª edición. Ciudad de México. ALFAOMEGA GRUPO EDITOR, S.A. DE C.V
- [14] Sector de Radiocomunicaciones de la UIT (2003). Disposiciones de frecuencias para la implementación de la componente terrenal de las telecomunicaciones móviles internacionales-2000 (IMT-2000) en las bandas* 806-960 MHz**, 1710-2025 MHz, 2110-2200 MHz y 2500-2690 MHz. RECOMENDACIÓN UIT-R M.1036-2. Recuperado el día 06 de febrero de 2019, de https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1036-2-200306-S!!PDF-S.pdf
- [15] Holma Harri, Toskala Antti (2006). HSDPA/HSUPA for UMTS. High Speed Radio Access for Mobile Communications. 1ª edición. England. Wiley.
- [16] Wannstrom J. HSPA. Recuperado el día 16 de febrero de 2019, de <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/99-hspa>
- [17] Briceño José (2005). Transmisión de datos. 3ª edición. Mérida Venezuela. Taller de Publicaciones de la Facultad de Ingeniería, ULA.
- [18] Bateman Andy (2003). Comunicaciones digitales diseño para el mundo real. 1ra edición. Marcombo.
- [19] Hernando J., Mendo L., Riera J. (1998). Comunicaciones Móviles. 3ra edición. España. Editorial Universitaria Ramón Areces.
- [20] Iglesias Rubén (2005). Instalación de equipos y sistemas de comunicación radioeléctrica. 1ª edición. España. Vigo.

- [21] Sallent O., Valenzuela J., Comes R. (2003). Principios de comunicaciones móviles. 1ra edición. Barcelona España. Edicions UPC.
- [22] Verdecia R. (2018). Desempeño de los métodos de detección de señales con modulación QPSK en sistema GFDM para 5G. Recuperado el día 17 de febrero de 2019 de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=\\$222718992018000300008&lng=pt&nrm=iso&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=$222718992018000300008&lng=pt&nrm=iso&tlng=es)
- [23] Tomasi W. (2003). Sistemas de comunicaciones electrónicas. 4ª edición. México. Prentice Hall
- [24] Cox Christopher (2014). An introduction to LTE. LTE, LTE-Advanced. SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications. 2da edición. United Kingdom. Wiley
- [25] Olsson M., Sultana S., Rommer S., Frid L., Mulligan C. (2009). SAE and the Evolved Packet Core. 1ra edición. USA. Elsevier
- [26] Michelle M. (2013). LTE: Identificadores de usuario-IMSI y GUTI. Recuperado el día 22 de febrero de 2019, de <https://www.netmanias.com/en/post/blog/5929/lte/lte-user-identifiers-imsi-and-guti>
- [27] Cardona N., Olmos J. J., García M., Monserrat j. (2011). 3GPP LTE: Hacia la 4G móvil. 1ra edición. MARCOMBO, S.A.
- [28] Gualda Javier (2016). Estudio de la arquitectura de protocolos LTE. Recuperado el día 03 de marzo de 2019 de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/98231/pfc_build.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [29] Schwartz Mischa (2004). Mobile Wireless Communications. 1ra edición. United States. Cambridge University Press
- [30] Ramírez Ramon (2015). Sistemas de Radiocomunicaciones. 1ª edición. Paraninfo. España.
- [31] Muñoz D., Lara D., Gaytán J. J., Vargas C., Aguilar A., Ramón J., Ortigoza L. (2002). Sistemas inalámbricos de Comunicación Personal. 1ra edición. México. Marcombo
- [32] Cesar V., Wilson E., Carlos F. (2007). Sistemas de Comunicación Inalámbrica MIMO – OFDM. [Figura]. Recuperado de http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?pid=S1683-07892007000200009&script=sci_arttext
- [33] Nutaq. Técnicas de reducción de PAPR en sistemas MIMO OFDM - Parte 1: Impacto de PAPR en el rendimiento de los sistemas MIMO OFDM. Recuperado el día 23 de Marzo de 2019 de <https://www.nutaq.com/blog/papr-reduction-techniques-mimo-ofdm-systems-part-1-impact-papr-performance-mimo-ofdm-systems>
- [34] Jiménez L., Parrado J., Quiza C., Suárez C. (2001). Modulación multiportadora OFDM. Recuperado el día 23 de Marzo de 2019 de <https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/revinq/article/view/2699/3891>
- [35] Dahlman E., Parkvall S., Skold J. (2016). 4G LTE-Advanced Pro and The Road to 5G. 3ª edición. United States. Elsevier
- [36] Yadav P., Sharma S., Tiwari P., Dey N. (2017). Una estructura híbrida modificada para la comunicación de super alta velocidad de próxima generación usando TDLTE y Wi-Max. Recuperado el día 24 de Marzo de 2019 de https://www.researchgate.net/publication/316600535_A_Modified_Hybrid_Structure_for_Next_Generation_Super_High_Speed_Communication_using_TDLTE_and_Wi-Max
- [37] Dahlman E., Parkvall S., Skold J. (2011). 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband. 1ª edición. Reino Unido. Elsevier
- [38] Furht B., Ahson S. (2009). 3GPP LTE Radio and Cellular Technology. 1ª edición. United States. CRC Press Taylor & Francis Group
- [39] Milos J., Hanus S. (2014). Performance Analysis of PCFICH and PDCCH LTE Control Channels. Recuperado el día 18 de Abril de 2019 de <https://core.ac.uk/download/pdf/30312143.pdf>
- [40] Zhang X., Zhou X. (2013). LTE. Advanced Air interface technology. 1ª edición. United States. CRC Press Taylor & Francis Group
- [41] Arévalo J., Gonzalez R. (2017). Análisis de Radio propagación de un eNodeB en un escenario Urbano. Recuperado el día 25 de Abril de 2019 de <http://fundacioniai.org/actas/Actas3/Actas3.16.pdf>
- [42] Carvajal W. (2018). GENERACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN MODELO PARA LA HOMOLOGACIÓN DE TERMINALES MÓVILES A TRAVÉS DEL DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN SOBRE EL SISTEMA OPERATIVO ANDROID. Recuperado el día 25 de Abril de 2019 de <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/13510/1/CarvajalPinzonWbeymar2018.pdf>

- [43] Gyokov Solutions (2010). G-NetTrack Pro Manual. Recuperado el día 19 de Abril de 2019 de http://www.gyokovsolutions.com/manuals/gnettrackpro_manual.php
- [44] IFT. Asignación de frecuencias. Recuperado el día 19 de Abril de 2019 de <http://ucsweb.ift.org.mx/vrpc/>
- [45] Top Optimized Technologies. Estudio sobre los requisitos técnicos que permitan caracterizar la cobertura con tecnología LTE necesaria para proporcionar determinados servicios de datos. Ministerio de Industria, Energía y Turismo.
- [46] Quintana A., Bordón R., Montejo S. (2013). Estudio comparativo de los modelos de propagación de canal inalámbrico. Recuperado el día 18 de Abril de 2019 de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59282013000100002
- [47] Forsk (2017). User manual for Radio Networks