

**ESTRATEGIAS Y PROCEDIMIENTOS PARA LA MIGRACIÓN A PRE
CUARTA GENERACIÓN EN COLOMBIA**



Santiago Adolfo Bravo Vidal
Andrés Homero Vásquez Bravo

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones
Línea de Investigación: Gestión Integrada de Redes, Servicios y
Arquitectura de Telecomunicaciones
Popayán, 2011

**ESTRATEGIAS Y PROCEDIMIENTOS PARA LA MIGRACIÓN A PRE
CUARTA GENERACIÓN EN COLOMBIA**



**Trabajo de Grado presentado como requisito para obtener el título
de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

Santiago Adolfo Bravo Vidal

Andrés Homero Vásquez Bravo

Director

M. Sc. Guefry L. Agredo Méndez

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de Telecomunicaciones

Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones

**Línea de Investigación: Gestión Integrada de Redes, Servicios y
Arquitectura de Telecomunicaciones**

Popayán, 2011

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos:

A Dios por darnos la vida, a nuestras familias por estar siempre a nuestro lado
brindándonos constante apoyo.

A nuestro director, por su dedicación, orientación y apoyo.

A los ingenieros del departamento de Telecomunicaciones por sus orientaciones y apoyo.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1. CARACTERIZACIÓN DE LAS REDES MÓVILES CELULARES EN COLOMBIA.....	3
1.1 GENERALIDADES	3
1.2 ASIGNACIÓN DE BANDAS DE ESPECTRO RADIOELÉCTRICO	4
1.3 TECNOLOGÍAS MÓVILES CELULARES ACTUALMENTE IMPLEMENTADAS	8
1.4 PENETRACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS	8
1.5 SERVICIOS PRESTADOS	9
1.6 INGRESO PROMEDIO POR USUARIO	10
1.7 EVOLUCIÓN.....	10
1.7.1. <i>LTE en Colombia</i>	12
2. DIFERENCIAS FUNCIONALES DETERMINANTES EN UN PROCESO DE MIGRACIÓN	13
2.1 GENERALIDADES	13
2.2 ARQUITECTURA	15
2.2.1. <i>Interfaces</i>	19
2.3 ASPECTOS TÉCNICOS	22
2.3.1. <i>Modulación y Codificación</i>	22
2.3.2. <i>Tecnologías de Acceso</i>	26
2.3.3. <i>Implementación de MIMO</i>	26
2.3.4. <i>Throughput</i>	27
2.3.5. <i>Comparación de los Canales</i>	28
2.3.6. <i>Latencia</i>	32
2.3.7. <i>Eficiencia Espectral</i>	33
2.3.8. <i>Tendencias Tecnológicas</i>	34
2.3.9. <i>Interoperabilidad</i>	35
2.3.10. <i>Red de Transporte</i>	35
2.3.11. <i>Servicios</i>	37
2.3.12. <i>Bandas de Operación y Anchos de Banda de Canal</i>	39
2.4 ANÁLISIS DE LAS DIFERENCIAS FUNCIONALES PARA UN PROCESO DE MIGRACIÓN	40

3.	ESTRATEGIAS Y PROCEDIMIENTOS PARA LA MIGRACIÓN A PRE 4G EN COLOMBIA CON LA TECNOLOGÍA LTE	42
3.1	GENERALIDADES	42
3.2	ALTERNATIVAS DE USO DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO PARA LA INTRODUCCIÓN DE PRE 4G EN COLOMBIA	42
3.2.1.	<i>Alternativas de Uso de Espectro Radioeléctrico</i>	42
3.2.2.	<i>Comparación de las Alternativas de Uso de Espectro Radioeléctrico..</i>	47
3.3	ESTRATEGIAS Y PROCEDIMIENTOS	51
3.3.1.	<i>Estrategia Uno: Gradual</i>	52
3.3.2.	<i>Estrategia Dos: Moderada</i>	57
3.3.3.	<i>Estrategia Tres: Agresiva</i>	59
3.3.4.	<i>Estrategia para el Desarrollo de LTE</i>	62
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	64
4.1	CONCLUSIONES	64
4.2	RECOMENDACIONES	65
	REFERENCIAS	66

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1. Abonados Prepago y Pospago.....	9
Figura 1.2. Comportamiento del Servicio de Voz.	9
Figura 1.3. Comportamiento Servicio de Mensajes.....	10
Figura 1.4. Ingreso Promedio por Usuario.....	10
Figura 1.5. Camino de Evolución del 3GPP.	11
Figura 2.1. Arquitectura de Red de HSDPA y LTE.	16
Figura 2.2. Interacción del eNB con los Elementos de la Red.	16
Figura 2.3. Interacción de la MME con los Elementos de la Red.....	17
Figura 2.4. Interacción de la S-GW con los Elementos de la Red.....	18
Figura 2.5. Interacción de la P-GW con los Elementos de la Red.....	19
Figura 2.6. Interfaces de HSDPA.....	20
Figura 2.7. Interfaces de LTE.	21
Figura 2.8. Esquemas de Modulación en LTE.....	23
Figura 2.9. Cadenas de Multiplexación y Codificación de HSDPA para el Enlace de Bajada y el Enlace de Subida.	24
Figura 2.10. Cadena de Codificación del Canal HS-DSCH.....	25
Figura 2.11. Procesamiento del Canal de Transporte DL-SCH.....	25
Figura 2.12. Comparación del Mapeo de Canales entre Tecnologías.	32
Figura 2.13. Latencia en las Tecnologías 3GPP.	33
Figura 2.14. Comparación de la Eficiencia Espectral en el Enlace de Bajada entre Tecnologías 3GPP.	33
Figura 2.15. Comparación de la Eficiencia Espectral en el Enlace de Subida entre Tecnologías 3GPP.	34
Figura 2.16. Tendencias Tecnológicas.....	35
Figura 2.17. Modelos de Costo de Red.....	36
Figura 2.18. Pasos de Evolución de la Red de Transporte.	37
Figura 3.1. Distribución de Frecuencias del Dividendo Digital.....	44
Figura 3.2. Ubicación de las Bandas en el Espectro Radioeléctrico.....	47
Figura 3.3. Cobertura de las Diferentes Bandas de Espectro Radioeléctrico.....	48
Figura 3.4. Comparación de la Cobertura de las Bandas de 700 MHz y de 2100 MHz.....	48

Figura 3.5. Relación del Incremento del CAPEX con la Banda de Espectro Radioeléctrico.....	49
Figura 3.6. Evolución Tecnológica Gradual.	52
Figura 3.7. Pasos de Actualización para HSPA+.	53
Figura 3.8. Evolución hacia <i>Single</i> RAN.....	55
Figura 3.9. Proceso de Migración de un Nodo B hacia LTE.....	56
Figura 3.10. Evolución Tecnológica Moderada.....	57
Figura 3.11. Despliegue Moderado.	59
Figura 3.12. Evolución Tecnológica Agresiva.	59
Figura 3.13. Despliegue Agresivo.....	61
Figura 3.14. Alternativas para el Desarrollo de Voz sobre LTE.	63

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.1.	Bandas de Espectro Radioeléctrico Asignadas a la Telefonía Móvil Celular.....	6
Tabla 1.2.	Bandas de Espectro Radioeléctrico en Estudio de Reorganización.	7
Tabla 1.3.	Tecnologías de Datos Implementadas en Colombia.....	8
Tabla 1.4.	Tecnologías de Voz Implementadas en Colombia.	8
Tabla 1.5.	Número de Abonados por Operador.....	8
Tabla 2.1.	Comparación de las Interfaces de HSDPA y LTE.....	22
Tabla 2.2.	Esquemas de Codificación de Canal en LTE.....	23
Tabla 2.3.	Tecnologías de Acceso.....	26
Tabla 2.4.	<i>Throughput</i> de las Tecnologías 3GPP.	27
Tabla 2.5.	Comparación Canales Lógicos.	29
Tabla 2.6.	Comparación Canales de Transporte.	30
Tabla 2.7.	Comparación Canales Físicos.....	31
Tabla 2.8.	Comparación de Servicios.....	38
Tabla 3.1.	Bandas de Espectro Radioeléctrico Candidatas para LTE en Colombia.....	43
Tabla 3.2.	Distribución de Canales Banda de 450 MHz.....	44
Tabla 3.3.	Disposición de Frecuencias para la Banda 700 MHz.	45
Tabla 3.4.	Disposición de Frecuencias para la Banda Celular 850.	45
Tabla 3.5.	Disposición de Frecuencias para la Banda PCS 1900.	46
Tabla 3.6.	Disposición de Frecuencias para la Banda IMT <i>Extension</i>	47
Tabla 3.7.	Estado Actual de las Bandas en Colombia.	50
Tabla 3.8.	Aspectos Reutilizables en el Despliegue de LTE.....	54

LISTADO DE ACRÓNIMOS

3GPP:	Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación <i>(3rd Generation Partnership Project)</i>
4G:	Cuarta Generación <i>(Fourth Generation)</i>
AMC:	Codificación y Modulación Adaptativa <i>(Adaptive Modulation and Coding)</i>
ANE:	Agencia Nacional de Espectro
ARPU:	Ingreso Promedio por Usuario <i>(Average Revenue Per User)</i>
ARQ:	Solicitud de Retransmisión Automática <i>(Automatic Repeat Request)</i>
AuC:	Centro de Autenticación <i>(Authentication Centre)</i>
AWS:	Servicios Inalámbricos Avanzados <i>(Advanced Wireless Services)</i>
BBU:	Unidad de Banda Base <i>(Base Band Unit)</i>
BER:	Tasa de Error de Bit <i>(Bit Error Rate)</i>
BCCH:	Canal de Control de Difusión <i>(Broadcast Control Channel)</i>
BCH:	Canal de Difusión <i>(Broadcast Channel)</i>
BMC:	Protocolo de Control de Broadcast/Multicast <i>(Broadcast/Multicast Control Protocol)</i>
CAPEX:	Costos de Capital <i>(Capital Expenditure)</i>

CCCH:	Canal de Control Común (<i>Common Control Channel</i>)
CN:	Núcleo de Red (<i>Core Network</i>)
CDMA	Acceso Múltiple por División de Código (<i>Code Division Multiple Access</i>)
CNABF:	Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia
CP:	Plano de Control (<i>Control Plane</i>)
CS:	Conmutación de Circuitos (<i>Circuit Switching</i>)
CSCF:	Función de Control del Estado de Llamada (<i>Call State Control Function</i>)
CTCH:	Canal de Tráfico Común (<i>Common Traffic Channel</i>)
DANE:	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DCCH:	Canal de Control Dedicado (<i>Dedicated Control Channel</i>)
DCH:	Canal Dedicado (<i>Dedicated Channel</i>)
DLSCH:	Canal Compartido en Enlace de Bajada (<i>Downlink Shared Channel</i>)
DS-CDMA:	CDMA por Secuencia Directa (<i>Direct Sequence CDMA</i>)
DSCH:	Canal Compartido en el Enlace de Bajada (<i>Downlink Shared Channel</i>)
DTCH:	Canal Dedicado de Tráfico (<i>Dedicated Traffic Channel</i>)

DwPCH:	Canal Piloto en el Enlace de Bajada (<i>Downlink Pilot Channel</i>)
EDGE:	Velocidad de Datos Mejorada para la Evolución de GSM (<i>Enhanced Data Rates for GSM of Evolution</i>)
eNB:	Nodo B Evolucionado (<i>Evolved Node B</i>)
EPC:	Núcleo de Paquetes Evolucionado (<i>Evolved Packet Core</i>)
EPS:	Sistema de Paquetes Evolucionado (<i>Evolved Packet System</i>)
E-UTRAN:	Red de Acceso Radio Terrestre UMTS Evolucionada (<i>Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>)
FACH:	Canal de Acceso hacia Adelante (<i>Forward Access Channel</i>)
FDD:	Duplexación por División de Frecuencia (<i>Frequency Division Duplex</i>)
FDM:	Multiplexación por División de Frecuencia (<i>Frequency Division Multiplexing</i>)
FEC:	Corrección de Errores hacia Adelante (<i>Forward Error Correction</i>)
FSF:	Desvanecimiento Selectivo en Frecuencia (<i>Frequency-Selective Fading</i>)
GAN:	Red de Acceso Genérico (<i>Generic Access Network</i>)
GGSN:	Nodo de Soporte de Pasarela GPRS (<i>Gateway GPRS Support Node</i>)
GPRS:	Servicio General de Paquetes vía Radio (<i>General Packet Radio Service</i>)
GSM:	Sistema Global para la Comunicación Móvil (<i>Global System for Mobile Communication</i>)

GSMA:	Asociación del Sistema Global para las Comunicaciones Móviles <i>(Global System for Mobile Communications Association)</i>
GTP:	Protocolo de túnel GPRS <i>(GPRS Tunneling Protocol)</i>
HARQ:	Solicitud de Retransmisión Automática Híbrida <i>(Hybrid Automatic Repeat Request)</i>
HLR:	Registro de Ubicación Local <i>(Home Location Register)</i>
HPA:	Amplificador de Alta Potencia <i>(High Power Amplifier)</i>
HSDPA:	Acceso a Paquetes en el Enlace de Bajada de Alta Velocidad <i>(High-Speed Downlink Packet Access)</i>
HS-DSCH:	Canal Compartido en el Enlace de Bajada de Alta Velocidad <i>(High Speed Downlink Shared Channel)</i>
HSPA:	Acceso a Paquetes de Alta Velocidad <i>(High Speed Packet Access)</i>
HSPA+:	Acceso a Paquetes de Alta Velocidad Evolucionado <i>(High Speed Packet Access Plus)</i>
HSS:	Servidor de Abonados Base <i>(Home Subscriber Server)</i>
HS-SCCH:	Canal de Control Compartido de Alta Velocidad <i>(High Speed Shared Control Channel)</i>
HS-SICH:	Canal de Información Compartido de Alta Velocidad <i>(High Speed Shared Information Channel)</i>
HSUPA:	Acceso a Paquetes en Enlace de Subida de Alta Velocidad <i>(High-Speed Uplink Packet Access)</i>
ICI:	Interferencia Inter-Portadora <i>(Inter-Carrier Interference)</i>

IFDMA:	FDMA Intercalado (<i>Interleaved FDMA</i>)
IP:	Potocolo Internet (<i>Internet Protocol</i>)
IP PoP:	Punto de Presencia IP (<i>Point of Presence IP</i>)
IMS:	Subsistema Multimedia IP (<i>IP Multimedia Subsystem</i>)
IMSI:	Identidad Internacional del Abonado Móvil (<i>International Mobile Subscriber Identity</i>)
IMT:	Comunicaciones Móviles Internacionales (<i>International Mobile Telecommunications</i>)
ISI:	Interferencia Inter-Simbólica (<i>Intersymbol Interference</i>)
ITU:	Unión Internacional de Telecomunicaciones (<i>International Telecommunication Union</i>)
ITU-R:	Sector de la Radiocomunicación de ITU (<i>ITU Radiocommunication Sector</i>)
LFDMA:	FDMA Localizado (<i>Localized FDMA</i>)
LTE:	Evolución a Largo Plazo (<i>Long Term Evolution</i>)
MAC:	Control de Acceso al Medio (<i>Medium Access Control</i>)
MBMS:	Servicio de Difusión y Multidifusión Multimedia (<i>Multimedia Broadcast y Multicast Service</i>)
MBSFN:	Red de Frecuencia Única Difusión/Multidifusión (<i>Multicast/Broadcast Single Frequency Network</i>)
MCCH:	Canal de Control de Multidifusión (<i>Multicast Control Channel</i>)

MCH:	Canal de Multidifusión (<i>Multicast Channel</i>)
MEF:	Foro de Metro-Ethernet (<i>Metro Ethernet Forum</i>)
MGCF:	Función de Control de la Gateway Multimedia (<i>Media Gateway Control Function</i>)
MIMO:	Sistema de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (<i>Multiple Input/Multiple Output System</i>)
MINTIC:	Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
MISO:	Sistema de Múltiples Entradas y Única Salida (<i>Multiple Input/Single Output System</i>)
MME:	Entidad de Gestión de Movilidad (<i>Mobility Management Entity</i>)
MMS:	Sistema de Mensajería Multimedia (<i>Multimedia Messaging System</i>)
MRF:	Función de Recursos Multimedia (<i>Media Resource Function</i>)
MS:	Milisegundo
MSC:	Centro de Conmutación Móvil (<i>Mobile Switching Center</i>)
MTCH:	Canal de Tráfico Multidifusión (<i>Multicast Traffic Channel</i>)
MU-MIMO:	Esquema de Usuario Múltiple MIMO (<i>Multiple Users MIMO</i>)
NGN:	Red de Próxima Generación (<i>Next Generation Network</i>)
OFDM:	Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>)

OFDMA:	Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales (<i>Orthogonal Frequency Division Multiple-Access</i>)
OPEX:	Costos Operacionales (<i>OPerating EXpenditures</i>)
OVSF:	Códigos de Factor de Ensanchamiento Variable Ortogonal (<i>Orthogonal Variable Spreading Factor</i>)
PAPR:	Relación de Potencia Pico a Promedio (<i>Peak-to-Average Power Ratio</i>)
PBCH:	Canal Físico de Difusión (<i>Physical Broadcast Channel</i>)
PCCH:	Canal de Notificación (<i>Paging Control Channel</i>)
P-CCPCH:	Canal Físico Primario de Control Común (<i>Primary Common Control Physical Channel</i>)
PCFICH:	Canal Físico de Control de Indicador de Formatos (<i>Physical Control Format Indicator Channel</i>)
PCH:	Canal de Notificación (<i>Paging Channel</i>)
PCS:	Servicio de Comunicación Personal <i>Personal Communications Service</i>
PDCCH:	Canal Físico de Control en el Enlace de Bajada (<i>Physical Downlink Control Channel</i>)
PDCH:	Canal Físico Dedicado en el Enlace de Bajada (<i>Physical Downlink Dedicated Channel</i>)
PDCP:	Protocolo de Convergencia de Paquetes de Datos (<i>Packet Data Convergence Protocol</i>)
PDG:	Pasarela de Red de Paquetes de Datos (<i>Packet Data Network Gateway</i>)
PDN:	Red de Paquetes de Datos (<i>Packet Data Network</i>)

PDU:	Unidades de Datos de Protocolo <i>(Protocol Data Unit)</i>
P/S-GW:	Pasarela de Red de Paquetes de Datos / Servicios <i>(Packet/Serving Gateway)</i>
PHICH:	Canal Físico Indicador de HARQ <i>(Physical Hybrid ARQ Indicator Channel)</i>
PICH:	Canal de Indicador de Notificación <i>(Paging Indicator Channel)</i>
POP:	Punto de Presencia <i>(Point Of Presence)</i>
PRACH:	Canal Físico de Acceso Aleatorio <i>(Physical Random Access Channel)</i>
PS:	Conmutación de Paquetes <i>(Packet Switching)</i>
PSTN:	Red Telefónica Pública Conmutada <i>(Public Switched Telephone Network)</i>
PUCCH:	Canal Físico de Control en el Enlace de Subida <i>(Physical Uplink Control Channel)</i>
PUSCH:	Canal Físico Común en el Enlace de Subida <i>(Physical Uplink Shared Channel)</i>
QAM:	Modulación de Amplitud en Cuadratura <i>(Quadrature Amplitude Modulation)</i>
QoS:	Calidad de Servicio <i>(Quality of Service)</i>
QPSK:	Desplazamiento de Fase en Cuadratura <i>(Quadrature Phase Shift Keying)</i>
RACH:	Canal de Acceso Aleatorio <i>(Random Access Channel)</i>

RAT:	Tecnología de Acceso Radio (<i>Radio Access Technology</i>)
RLC:	Control de enlace Radio (<i>Radio Link Control</i>)
RNAP:	Red de Acceso Radio – Parte de Aplicación (<i>Radio Access Network Application Part</i>)
RNC:	Controlador de la red de Radio (<i>Radio Network Controller</i>)
RRC:	Control de Recursos de Radio (<i>Radio Resource Control</i>)
RRU:	Unidad de Radio Remota (<i>Remote Radio Unit</i>)
S-CCPCH:	Canal Físico Secundario de Control Común (<i>Secondary Common Control Physical Channel</i>)
SC-FDMA:	FDMA de Portadora Única (<i>Single Carrier – FDMA</i>)
SCH:	Canal de Sincronización (<i>Synchronization Channel</i>)
SDU:	Unidades de Datos de Servicio (<i>Service Data Unit</i>)
SF:	Factor de Ensanchamiento (<i>Spreading Factor</i>)
SGSN:	Nodo de Soporte Servicio GPRS (<i>Serving GPRS Support Node</i>)
SIMO:	Sistema de Única Entrada y Múltiples Salidas (<i>Single Input/Multiple Output System</i>)
SIP:	Protocolo de Inicio de Sesión (<i>Session Initiation Protocol</i>)
SIUST:	Sistema de Información Unificado del Sector de las Telecomunicaciones

SMS:	Servicio de Mensajes Cortos (<i>Short Message Service</i>)
SNR:	Relación de Señal a Ruido (<i>Signal to Noise Ratio</i>)
SRS:	Señales de Referencia para Sondeo (<i>Sounding Reference Signals</i>)
SU-MIMO:	Usuario Único MIMO (<i>Single User MIMO</i>)
TA:	Área de Seguimiento (<i>Tracking Area</i>)
TCH:	Canal de Tráfico (<i>Traffic Channel</i>)
TDD:	Duplexación por División de Tiempo (<i>Time Division Duplex</i>)
TMC:	Telefonía Móvil Celular
TTI:	Intervalo de Tiempo de Transmisión (<i>Time Transmisión Interval</i>)
UE:	Equipo de Usuario (<i>User Equipment</i>)
ULSCH:	Canal Compartido en el Enlace de Subida (<i>Uplink Shared Channel</i>)
UMTS:	Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>)
UpPCH:	Canal Piloto en el Enlace de Subida (<i>Uplink Pilot Channel</i>)
USCH:	Canal Compartido en el Enlace de Subida (<i>Uplink Shared Channel</i>)
USIM:	Módulo de Identidad de Subscriptor UMTS (<i>UMTS Subscriber Identity Module</i>)

VPN:	Redes Virtuales Privadas <i>(Virtual Private Networks)</i>
VoIP:	Voz Sobre IP <i>(Voice Over IP)</i>
VoLTE:	Voz Sobre LTE <i>(Voice Over LTE)</i>
WCDMA:	Acceso Múltiple por División de Código de Banda Ancha <i>(Wideband Code Division Multiple Access)</i>
WiMAX:	Interoperabilidad mundial para acceso por microondas <i>(Worldwide Interoperability for Microwave Access)</i>
WRC:	Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones <i>(World Radiocommunication Conferences)</i>



INTRODUCCIÓN

Dentro de la economía mundial, el sector de las comunicaciones se ha consolidado como uno de los más dinámicos, en el que sobresale el servicio de telefonía móvil, caracterizado por su constante evolución. En los últimos 10 años, los servicios móviles han evolucionado de la comunicación básica de voz a los servicios móviles de banda ancha. Este tipo de servicios disponibles en todo el mundo deben su existencia a la evolución de la tecnología inalámbrica, lograda a través de mejoras en: velocidades de transmisión de datos, eficiencia espectral y Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*), además de la reducción de la latencia en el sistema, entre otros, dando lugar a ofertas de nuevos y mejores servicios a los operadores móviles.

La alta penetración del servicio de telefonía móvil, unido a la reducida capacidad de espectro radioeléctrico, lleva a la búsqueda de nuevas tecnologías, capaces de brindar una mejor eficiencia espectral. En consecuencia, los operadores móviles, respondiendo a la necesidad de garantizar la prestación del servicio, deben tomar la decisión de migrar hacia tecnologías que presten mejores beneficios. Este trabajo de grado se enfoca en proponer estrategias y procedimientos para la migración a Pre Cuarta Generación¹ (Pre 4G) de los operadores móviles de Colombia con la tecnología de Evolución a Largo Plazo (LTE, *Long Term Evolution*), con lo cual se busca brindar un aporte al proceso de migración en Colombia.

El trabajo de grado se inició con una encuesta dirigida a personas vinculadas laboralmente a los actuales operadores móviles colombianos. Con esta información y la suministrada por el MINTIC (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones) en su página web, se hizo la caracterización del entorno Colombiano, paso fundamental para identificar el inicio de los posibles caminos de migración hacia LTE en Colombia.

El estudio de la arquitectura y los aspectos técnicos de la tecnología de Acceso a Paquetes en el Enlace de Bajada de Alta Velocidad (HSDPA, *High Speed Downlink Packet Access*) y de LTE, permitieron identificar las diferencias funcionales existentes entre estas tecnologías que resultan determinantes para establecer un proceso de migración. Además, se identificaron las alternativas de uso de espectro radioeléctrico para la introducción de LTE en Colombia, para el planteamiento final de las estrategias y procedimientos para la migración.

El presente documento se encuentra estructurado en seis capítulos. El primer capítulo se enfoca en la caracterización del entorno colombiano, con el objetivo de establecer el estado actual de los operadores móviles, respecto a temas como las tecnologías implementadas, servicios prestados y planes de migración, entre otros, información obtenida por medio de encuestas a personal vinculado a los actuales operadores móviles del país, proceso arduo debido a la naturaleza confidencial de la información requerida,

¹ Esta expresión hace referencia a una tecnología intermediaria previa a 4G como lo es LTE. Para hacer referencia a cuarta generación se hablaría de LTE Avanzado la cual aun está en proceso de estandarización.



pero lograda finalmente, gracias al interés que en ellos despertó la realización de este trabajo en la Universidad del Cauca.

El segundo capítulo se centra en la descripción general de la tecnología HSDPA y sus principales características. El tercer capítulo se dirige hacia la descripción general de la tecnología LTE y sus principales características. En desarrollo de estos capítulos el lector debe notar la uniformidad que se ha buscado en gráficas y tablas que se han realizado, inspiradas en la información, figuras y tablas encontradas en las referencias.

En el capítulo cuatro se identifican las diferencias funcionales entre las tecnologías HSDPA y LTE que resultan determinantes en un proceso de migración. Como en los capítulos 2 y 3, este capítulo conserva la uniformidad en las tablas y figuras, con la salvedad que algunas de ellas han sido generadas en éste trabajo de grado, siendo un aporte original que no se encuentra en ninguna referencia disponible.

En el capítulo cinco, se plantean alternativas de uso del espectro radioeléctrico para la introducción de LTE en Colombia, proceso necesario para proponer estrategias y procedimientos para la migración a Pre 4G de los operadores móviles de Colombia con la tecnología LTE, bajo la premisa de maximizar el aprovechamiento de la infraestructura instalada por los mismos. Finalmente, se describen las conclusiones y recomendaciones.



1. CARACTERIZACIÓN DE LAS REDES MÓVILES CELULARES EN COLOMBIA

En este capítulo se realiza un análisis del estado actual de las redes móviles en Colombia, enfocado en analizar características como: tecnologías implementadas, planes de migración, servicios que se están prestando y que esperan prestar, y en especial, las posibles bandas de espectro radioeléctrico para la introducción de Pre 4G en Colombia y los procesos que el gobierno realizará para la reorganización de las bandas que ya han sido asignadas y sobre nuevas posibles bandas, buscando que en ellas operen nuevos sistemas móviles de comunicaciones.

1.1 GENERALIDADES

En Colombia, la alta penetración del servicio de telefonía móvil [1] conlleva un incremento en la demanda de servicios de datos y de voz por parte de los usuarios, haciendo que los operadores móviles examinen nuevas tecnologías capaces de utilizar de manera más eficiente el espectro radioeléctrico asignado por el gobierno. El proceso de asignación de nuevo espectro radioeléctrico para la telefonía móvil se encuentra en etapa de estudio por parte de las entidades gubernamentales colombianas, esperando trazar un plan de acción para un mediano plazo buscando brindar las condiciones necesarias para el despliegue de nuevas tecnologías que se adapten a la masificación de los servicios actuales y futuros [1].

Los operadores móviles colombianos en su camino de evolución, se encuentran actualmente con tecnología de tercera generación, específicamente con HSDPA o 3.5G, sobre la que se ofrecen diversos tipos de servicios, destacando el de voz, considerado el principal servicio de las redes móviles colombianas en la actualidad. Además, dentro de los servicios de datos se ofrecen los servicios típicos (Servicio de Mensajes Cortos (SMS, *Short Message Service*), el Sistema de Mensajería Multimedia (MMS, *Multimedia Messaging System*)) y las aplicaciones avanzadas (video llamada, descarga de videos, email, navegación en internet, otros), los que cada vez tienen mayor número de consumidores [1]. Como forma de pago a los servicios utilizados, los operadores ofrecen las opciones pospago y prepago, siendo este último el más acogido por los usuarios frente a un menor número de usuarios pospago.

Las prospectivas sobre el crecimiento en la demanda de los servicios de datos en los siguientes años hacen pensar que el siguiente paso, en el camino de evolución de los operadores en Colombia, será la adopción de la tecnología LTE [1] que con nuevas características, como el uso de Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales (OFDMA, *Orthogonal Frequency Division Multiple-Access*) y la utilización de múltiples antenas, permitirán un mejor aprovechamiento de los recursos radioeléctricos, aumentando la velocidad de transmisión de datos, eficiencia espectral y capacidad, mejorando la QoS y reduciendo la latencia, respecto a su tecnología antecesora. La posibilidad de realizar una migración en la tecnología móvil celular en Colombia, hace necesario determinar el estado actual de los operadores y sus redes en el país, la o las



tecnologías que tienen implementadas actualmente, los planes de migración (si los tienen) a corto o largo plazo, los servicios que están prestando y los que prestarían, en una eventual migración. Esto permite tener un panorama claro del entorno colombiano para, a partir de éste, plantear posibles estrategias y procedimientos para la migración a Pre 4G en Colombia.

Dentro del marco de las características del entorno, también se mencionan: la fuerte demanda de servicios móviles presentada en la actualidad, la revisión de los procesos de asignación de espectro radioeléctrico y las opciones tecnológicas con las que los operadores prestan sus servicios de datos y voz. Además, se muestran las clases de tecnologías incluidas en el proceso de evolución gradual propuesto por el Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación (3GPP, *3rd Generation Partnership Project*), sobre el que los operadores móviles adelantan estudios en procura de encontrar el siguiente paso evolutivo que se adapte a las necesidades presentes y futuras, mejorando la capacidad de respuesta al crecimiento de la demanda de servicios de banda ancha móvil.

Para llevar a cabo el análisis del estado actual de las redes móviles en Colombia, se acudió a una encuesta² como instrumento de recolección de datos, dirigida a personal vinculado a los actuales operadores móviles colombianos (Comcel, Movistar y Tigo). Vale la pena aclarar que la información requerida es considerada confidencial debido a las políticas de privacidad de cada operador, por esta razón hubo gran dificultad en obtenerla y demoras en hacerlo. Por estas razones, parte de la información suministrada a lo largo de este capítulo no contiene su respectiva citación de fuente. Los métodos empleados para la recolección de los datos fueron: solicitud por correo electrónico y de forma directa³, y sus resultados se presentan a lo largo de este capítulo.

1.2 ASIGNACIÓN DE BANDAS DE ESPECTRO RADIOELÉCTRICO

En un mundo globalizado como el actual, la implementación de tecnologías de banda ancha móvil es un motor de desarrollo de la sociedad, que exige una adecuada asignación de espectro radioeléctrico por parte de las entidades gubernamentales de cada nación. En Colombia, esta asignación se encuentra retrasada frente a los procesos ya implementados en algunos países de la región (Brasil, Chile, Mexico, Paraguay) [2], alcanzando en la actualidad una capacidad de espectro de 120 MHz [1] para todos los operadores que prestan este tipo de servicios.

La Asociación del Sistema Global para las Comunicaciones Móviles (GSMA, *Global System for Mobile Communications Association*) afirma [1] que en países en desarrollo, la capacidad de espectro radioeléctrico se encuentra en un rango de 450 MHz a 600 MHz para la implementación de las tecnologías de banda ancha móvil, sugiriendo que en un

² Remitirse al anexo A sección 1, para conocer la encuesta empleada como instrumento de recolección de datos.

³ Este método fue aplicado en el marco del “*Foro Tecnocimiento 2010 - Estrategia, Negocio y Tecnología en Servicios Móviles*” realizado en el mes de agosto por tigo y el Centro de Investigación de las Telecomunicaciones (CINTEL) en la ciudad de Bogotá.



periodo de 10 años a partir del 2010, los países deberán disponer de una capacidad de espectro de al menos 1.4 GHz para estas tecnologías, por lo que una primera situación que se encuentra es que en Colombia es insuficiente la propuesta de ampliar la capacidad espectral de 120 MHz a 220 MHz por parte del MINTIC, siendo necesario que la ANE⁴ (Agencia Nacional de Espectro) realice un proceso de reorganización de espectro radioeléctrico adecuado para brindar las condiciones necesarias en la evolución de las tecnologías y lograr una capacidad de espectro de, al menos, 450 MHz en un mediano plazo (3 años⁵).

Actualmente los operadores de telefonía móvil en Colombia cuentan con la asignación de las bandas: celular 850 (Celular 850) en 850 MHz y Servicio de Comunicación Personal (PCS, *Personal Communications Service*) en 1900 MHz, como se informa en el cuadro nacional de atribución de bandas de frecuencias del año 2010 [3]. La ANE dentro de su plan de acción de 2010 propone el proyecto CNABF (Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia) - año 2019, enfocado en el planteamiento de estrategias para las transiciones que se deben realizar en la atribución de espectro radioeléctrico, para los servicios móviles terrestres. Dentro de este proyecto se plantean los siguientes objetivos [5]:

- Planificación de la banda de 2500 MHz: con la expedición por parte del MINTIC de la Resolución 909 del 17 de Abril de 2009, se atribuyó y reservó la banda comprendida entre 2500 - 2690 MHz para servicios móviles terrestres, por lo que la ANE realiza un estudio que permita reubicar los concesionarios que no prestan este tipo de servicios, garantizando las condiciones necesarias para que nuevos operadores móviles puedan utilizar esta banda.
- Planificación de la banda de 1900 MHz: la fuerte demanda de servicios de datos y de voz que actualmente soportan los operadores de telefonía móvil en Colombia, ha llevado al límite la capacidad de espectro radioeléctrico asignado por parte del gobierno, haciendo necesario el planteamiento de un estudio de la redistribución de la banda por parte de la ANE para lograr un mejor aprovechamiento del espectro y satisfacer las necesidades de los operadores.
- Evaluación del uso de la banda de 850 MHz: el MINTIC plantea un estudio sobre esta banda ocupada en su totalidad por los operadores de Telefonía Móvil Celular (TMC), con el fin de reasignar el espectro de esta banda para que nuevos operadores de servicios móviles terrestres puedan utilizarlo, fomentando así la igualdad de condiciones, ya que las características de propagación en esta banda de frecuencia ofrecen ventajas técnicas y económicas. La ANE será la encargada de discutir este proceso con los operadores para llegar a posibles acuerdos.

⁴ Entidad encargada de brindar el soporte técnico al MINTIC para la gestión del espectro radioeléctrico como bien público [4].

⁵ Cifra promedio obtenida por encuestas realizadas a los operadores del país.



- Revisión de bandas adicionales, como: 700 MHz, Servicios Inalámbricos Avanzados (AWS, *Advanced Wireless Services*) y 450 MHz, en busca de atribuirlos a los servicios móviles terrestres, debido a las limitaciones anteriormente mencionadas y como parte de la prospectiva del espectro al año 2019.

En la Tabla 1.1 [3] se muestran las bandas de espectro radioeléctrico mencionadas en el plan de acción de la ANE. En ella se observan las que ya han sido atribuidas a los servicios móviles terrestres, mientras que en la Tabla 1.2 [3] se presentan las bandas en las que se realizará un estudio para evaluar las posibilidades de atribución, con características como: el rango espectral y los servicios que están operando en la actualidad.

Tabla 1.1. Bandas de Espectro Radioeléctrico Asignadas a la Telefonía Móvil Celular.

BANDA		2	5	7
IDENTIFICADOR		PCS 1900	850	IMT ⁶ EXTENSION
FRECUENCIAS (MHz)	Enlace de Bajada	1850 - 1910	824 - 849	2500 – 2570
	Enlace de Subida	1930 - 1990	869 - 894	2620 – 2690
ATRIBUIDA A LOS SERVICIOS DE RADIOCOMUNICACIONES		FIJO, MÓVIL, MÓVIL (PCS), MÓVIL POR SATELITE.	TELEFONÍA MÓVIL CELULAR.	FIJO, MÓVIL, MÓVIL (IMT)*, FIJO POR SATELITE, RADIODIFUSIÓN POR SATÉLITE, INVESTIGACIÓN ESPACIAL, RADIOASTRONOMIA.

* Servicio en funcionamiento a partir de junio de 2011 [6].

⁶ Comunicaciones Móviles Internacionales (IMT, *International Mobile Telecommunications*)



Tabla 1.2. Bandas de Espectro Radioeléctrico en Estudio de Reorganización.

IDENTIFICADOR	450	700	AWS
FRECUENCIAS (MHz)	450 - 470	698 - 806	1710 - 1755 2110 - 2155
ATRIBUIDA A LOS SERVICIOS DE RADIOCOMUNICACIONES	FIJO, MÓVIL, MÓVIL POR SATELITE, METEOROLOGÍA POR SATÉLITE.	FIJO, MÓVIL.	FIJO, MÓVIL, INVESTIGACIÓN ESPACIAL, MÓVIL POR SATELITE.

Los servicios implementados sobre las bandas en las que se realizará el estudio para evaluar una posible reorganización de espectro se describen a continuación [3]:

- Fijo: servicio de radiocomunicación entre puntos fijos determinados.
- Fijo por satélite: Servicio de radiocomunicación entre estaciones terrenas situadas en emplazamientos dados, cuando se utilizan uno o más satélites.
- Móvil: servicio de radiocomunicación entre estaciones móviles y estaciones terrestres o entre estaciones móviles.
- Móvil por satélite: este servicio de radiocomunicación presenta dos casos:
 - Entre estaciones terrenas móviles y una o varias estaciones espaciales o entre estaciones espaciales utilizadas por este servicio; o
 - Entre estaciones terrenas móviles por intermedio de una o varias estaciones espaciales.
- Radiodifusión por satélite: servicio de radiocomunicación en el cual las señales emitidas o retransmitidas por estaciones espaciales están destinadas a la recepción directa por el público en general.
- Investigación espacial: servicio de radiocomunicación que utiliza vehículos espaciales u otros objetos espaciales para investigación científica o tecnológica.
- Radio astronomía: estudio del universo a través de la captación y análisis de ondas de radiofrecuencia.



Meteorología por satélite: servicio de exploración de la tierra por satélite con fines meteorológicos.

1.3 TECNOLOGÍAS MÓVILES CELULARES ACTUALMENTE IMPLEMENTADAS

Actualmente, en Colombia, las demandas de servicios móviles están siendo soportadas por diferentes tecnologías de datos y de voz. Según la encuesta, del anexo A sección 1, utilizada para la caracterización del entorno actual, las tecnologías utilizadas son:

- TECNOLOGIAS DE DATOS

Tabla 1.3. Tecnologías de Datos Implementadas en Colombia.

GPRS ⁷	EDGE ⁸	HSDPA	HSUPA ⁹	HSPA+ ¹⁰
X	X	X		

- TECNOLOGIAS DE VOZ

Tabla 1.4. Tecnologías de Voz Implementadas en Colombia.

GSM ¹¹ - RELEASE	R99	R4

1.4 PENETRACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

Según datos obtenidos a través del Sistema de Información Unificado del Sector de las Telecomunicaciones (SIUST) [7], hasta el 30 de junio del 2010, la penetración de la telefonía móvil en Colombia alcanzó el 93,79 %¹², con un total de 42'682.645 abonados, distribuidos entre los operadores como lo muestra la Tabla 1.5[8].

Tabla 1.5. Número de Abonados por Operador.

OPERADOR	NÚMERO DE ABONADOS	PORCENTAJE DE PARTICIPACIÓN
COMCEL	28'288.501	66,28 %
MOVISTAR	9'537.552	22,35%
TIGO	4'856.592	11,38%

⁷ Servicio General de Paquetes vía Radio (GPRS, *General Packet Radio Service*).

⁸ Velocidades de Transmisión de Datos Mejoradas para la Evolución de GSM (EDGE, *Enhanced Data rates for GSM of Evolution*).

⁹ Acceso a Paquetes en Enlace de Subida de Alta Velocidad (HSUPA, *High-Speed Uplink Packet Access*).

¹⁰ Acceso a Paquetes de Alta Velocidad Evolucionado (HSPA+, *High Speed Packet Access Plus*)

¹¹ Sistema Global para las Comunicaciones Móviles (GSM, *Global System for Mobile Communications*).

¹² El cálculo de esta cifra es realizado a partir de proyecciones de población publicados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) [9].



Por su parte, en el anexo B¹³, se muestra la distribución geográfica de las tecnologías implementadas en el país, destacando que los operadores móviles están en las 32 capitales con las tecnologías GSM/GPRS/EDGE y aproximadamente en 24 capitales con la tecnología HSDPA.

1.5 SERVICIOS PRESTADOS

Los operadores ofrecen sus servicios móviles a partir de las formas: prepago y postpago, con porcentajes de usuarios de 83,92 % y 16,08 % respectivamente hasta el 30 de junio de 2010. Estos porcentajes se han mantenido durante el transcurso del año 2009 y del año 2010 hasta el segundo trimestre como se muestra en la Figura 1.1[10].

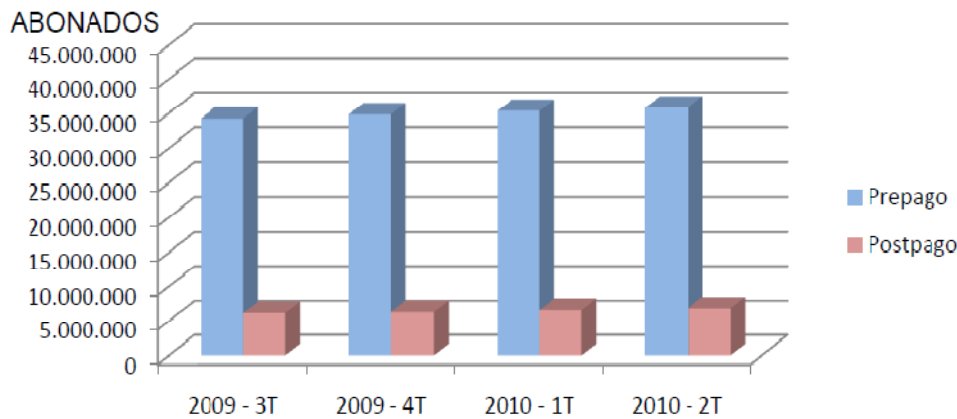


Figura 1.1. Abonados Prepago y Pospago.

La implementación y prestación de servicios móviles por parte de los operadores está directamente relacionada con la aceptación que éstos tienen dentro de los usuarios. En el caso colombiano, tanto en postpago como en prepago los servicios son: voz, SMS, internet y video, destacando que de este grupo de servicios, el de mayor demanda es el servicio de voz y su comportamiento, en los últimos cuatro trimestres, se muestra en la Figura 1.2[11].

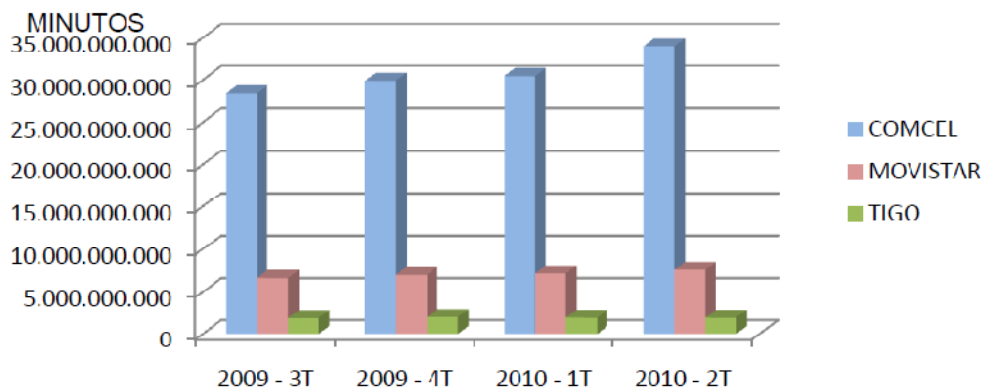


Figura 1.2. Comportamiento del Servicio de Voz.

¹³ Parte de esta información es suministrada por los operadores en sus páginas web y se complementó con la información recolectada por medio de las encuestas realizadas.



Por su parte, el que proporciona mayores utilidades requiriendo menores recursos tecnológicos es SMS y su comportamiento se muestra en la Figura 1.3 [12]. Según la encuesta, del anexo A sección 1, realizada a personal vinculado a los actuales operadores móviles, se proyecta que el servicio de voz se mantendrá como el servicio principal aproximadamente un periodo de 3 o 4 años más, el cual será remplazado por el servicio de datos¹⁴ que en la actualidad empieza a surgir dentro del mercado¹⁵ [1].

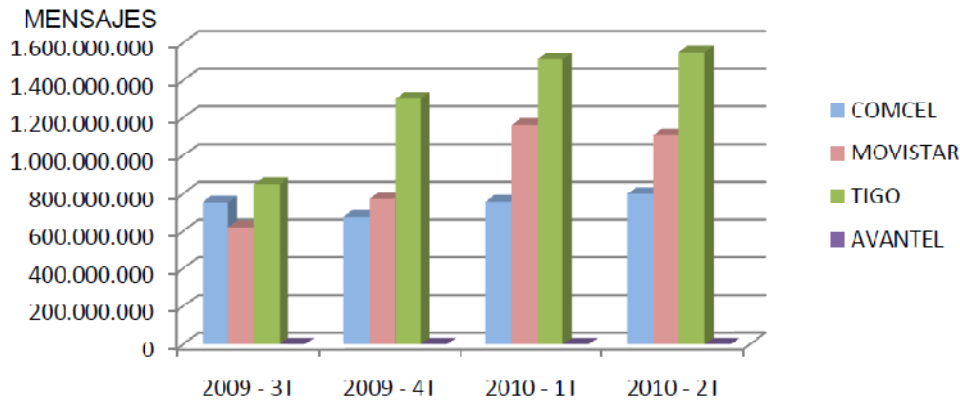


Figura 1.3. Comportamiento Servicio de Mensajes.

1.6 INGRESO PROMEDIO POR USUARIO

El Ingreso Promedio por Usuario (ARPU, *Average Revenue Per User*) es una media por usuario calculada por un operador en un determinado periodo de tiempo. En Colombia según el SIUST en el segundo trimestre del 2010, el ARPU de los operadores es aproximadamente de 32.737 pesos y su comportamiento se muestra en la Figura 1.4 [14].

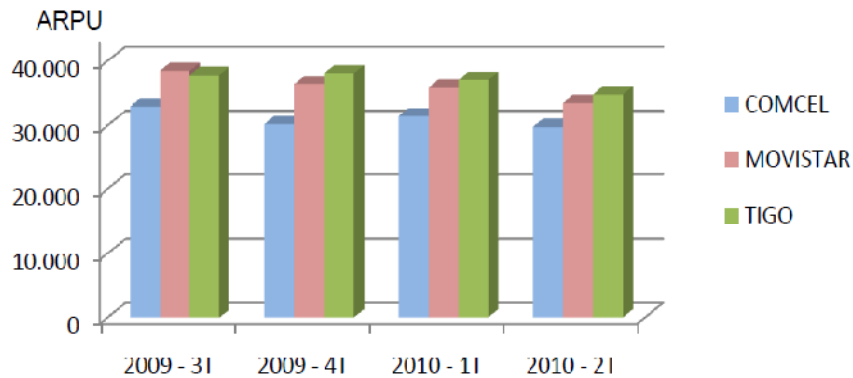


Figura 1.4. Ingreso Promedio por Usuario.

1.7 EVOLUCIÓN

En un medio tan versátil como el de las telecomunicaciones móviles, en el que actualmente se presenta un incremento en la demanda de servicios de datos, además de los existentes [1], los operadores se ven obligados a destinar mayor ancho de banda por

¹⁴ Según las encuestas, se considera que para los próximos años en Colombia la “killer application” será el servicio de Voz sobre IP (VoIP, *Voice Over IP*).

¹⁵ En Latinoamérica hasta el año 2014, se pronostica que la banda ancha móvil multiplicará su penetración y accesos por cinco y siete veces respectivamente [13].



suscriptor y a realizar actualizaciones periódicas a las tecnologías implementadas, para dar soporte a este tipo de servicios y así mantener o mejorar su competitividad en el medio.

En la Figura 1.5 [15] se presenta el camino de evolución propuesto por el 3GPP, que incluye una serie de tecnologías sucesivas que permiten desarrollar una evolución adaptable al plan tecnológico y económico de un operador. De esta manera, los operadores en Colombia se encuentran realizando el estudio de las posibles tecnologías sucesoras a las actuales, analizando sus ventajas y desventajas, destacando que el desafío que asume un operador al afrontar una migración, está enfocado en las actualizaciones que se deben realizar sobre la infraestructura de red para lograr incrementar las capacidades de la red y brindar el soporte necesario a el volumen de tráfico de datos generado por los nuevos servicios.

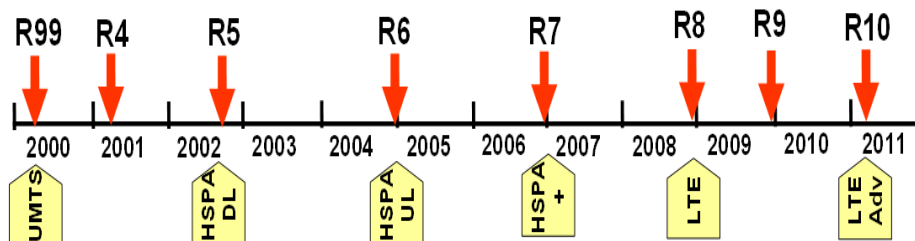


Figura 1.5. Camino de Evolución del 3GPP.

Además, los operadores destacan que se debe analizar el cumplimiento de diferentes factores que impulsan una migración hacia una nueva tecnología. A continuación se mencionan algunos de ellos:

- Garantías suficientes por parte los entes reguladores, para obtener los recursos necesarios para implementar satisfactoriamente una nueva tecnología.
- Existencia de la necesidad de nuevos servicios por parte de los usuarios y crear casos de negocios con los nuevos servicios que se usarán para la introducción de la nueva tecnología.
- Asegurar la recuperación del capital invertido en la tecnología actual y proyectar los ingresos adicionales que se continuarán percibiendo, para recaudar el Costo de Capital (CAPEX, *Capital Expenditure*) requerido para la implementación de la evolución planteada.
- Entorno del mercado, verificar las proyecciones de la competencia.

Respecto a las expectativas de los posibles servicios que se podrían implementar sobre las redes, los operadores hacen énfasis en algunos como: internet móvil de alta velocidad, televisión móvil, servicios de equipo a equipo y servicios del Sub-sistema Multimedia IP (IMS, *IP Multimedia Subsystem*). Se Espera, según los resultados de la encuesta, que en un mediano plazo (3 años), la utilidad del servicio de datos supere la obtenida por el servicio de voz.



1.7.1. LTE en Colombia

En Colombia, de acuerdo a la encuesta realizada al personal vinculado a los actuales operadores móviles, se destaca el inicio de diferentes estudios dirigidos a analizar los posibles caminos de evolución a nuevas tecnologías que les permitan brindar un mejor soporte frente al alto crecimiento en la demanda de servicios de banda ancha móvil, buscando la mejor opción de cambio de sus respectivas tecnologías tendiente a continuar un camino de evolución que los dirija hacia LTE¹⁶.

Por su parte, la empresa UNE EPM entra al mercado de los sistemas móviles de comunicaciones a partir del año 2011, luego de ganar la licitación que adjudica 50 MHz de espectro radioeléctrico en la banda de los 2500 MHz. Respecto a la tecnología a implementar, el presidente de la compañía asegura el despliegue de la tecnología LTE debido a que *“WiMAX ya no es la alternativa para 2500 MHz”* [16]. La empresa tendrá un plazo de nueve meses para iniciar la prestación de servicios y dos años para ofrecer cobertura en cada una de las capitales del país. El MINTIC asegura que con esta nueva adjudicación de espectro radioeléctrico, los más beneficiados son los usuarios de los sistemas móviles de comunicaciones en Colombia [17], debido a que se amplía el grupo de operadores, lo que se traduce en: más opciones para contratar servicios, mayor competencia, mejores precios, mejor velocidad y mejor cobertura.

El plan de reorganización de espectro que se encuentra desarrollando la ANE, con el propósito de ampliar el espectro radioeléctrico atribuido a los servicios móviles terrestres en el país, debe garantizar las condiciones necesarias para que nuevas tecnologías puedan ser implementadas por los operadores móviles, lo que garantice una migración hacia mejores tecnologías impulsada por la fuerte demanda de servicios, el alto número de usuarios y la competencia.

En este capítulo se ha realizado un análisis de la situación actual de los operadores móviles en Colombia, resaltando las características sobre las que sustentará el proceso de migración a LTE, tales como: tecnologías implementadas, planes de migración, servicios que se están prestando y los que esperan prestar, y en especial, las posibles bandas de espectro radioeléctrico para la introducción de Pre 4G en Colombia.

¹⁶ Para mayor información acerca de esta tecnología remitirse al anexo D.



2. DIFERENCIAS FUNCIONALES DETERMINANTES EN UN PROCESO DE MIGRACIÓN

En el presente capítulo se consigna el resultado del análisis de las diferencias funcionales que resultan determinantes en un proceso de migración de HSDPA a LTE, tales como: arquitectura, interfaces y aspectos técnicos más relevantes a ser tenidos en cuenta, a fin de establecer la compatibilidad de LTE con la tecnología existente en el país, así como la determinación de los servicios que pueden ser ofrecidos y las diferencias funcionales determinantes en un proceso de migración en Colombia

2.1 GENERALIDADES

Dentro de la economía mundial, el sector de las telecomunicaciones se ha consolidado como uno de los más dinámicos, en el que sobresale el servicio de telefonía móvil, caracterizado por su constante evolución a través del tiempo. Distintas generaciones de telefonía móvil han sido desarrolladas en determinadas épocas a partir de necesidades de los operadores y los usuarios.

Durante los últimos años, los servicios móviles han progresado de la comunicación básica de voz a los servicios móviles multimedia de banda ancha. Las aplicaciones móviles de banda ancha y servicios comercialmente disponibles en todo el mundo deben su existencia a la evolución de los avances de la tecnología inalámbrica, logrados a través del aumento en la capacidad de la red, mayores velocidades de transmisión de datos, QoS óptima y menor latencia, entre otros. Dando lugar a ofertas de nuevos y mejores servicios para los operadores móviles [21].

Tal como evolucionan las tecnologías móviles celulares, los servicios que presentan este tipo de redes, también lo hacen, dando respuesta a las crecientes exigencias de los usuarios, en cuanto a contenido y a calidad para servicios multimedia en todos los ambientes. Cabe anotar que el progreso de los dispositivos contribuye a creciente tráfico de datos.

Una forma de asegurar que el usuario pueda disfrutar de los servicios multimedia en movilidad y con altas velocidades, consiste en el aumento de la capacidad de las redes móviles. Lo que se traduce en el desarrollo de LTE, descrito en el anexo D. Esta tecnología ofrece mayores velocidades de transmisión, cercanas a los 100 Mbps contra 14 Mbps de HSDPA, menores latencias, y en consecuencia mejor calidad de servicio en banda ancha móvil. Cualquier servicio que maneje contenidos multimedia (juegos, vídeo, televisión, etcétera), y alta definición, se beneficiará de esta tecnología [21].

Todas las ventajas ofrecidas por LTE, se derivan del uso de nuevas tecnologías y de los cambios introducidos por esta tecnología, analizados en este capítulo, en el cual, se realiza la comparación de las diferencias funcionales frente a HSDPA y los factores técnicos más importantes a tener en cuenta para que un operador decida pasar de



HSDPA a LTE, resaltando la reducción de la latencia, las mejoras en el *throughput* y la eficiencia espectral.

La tecnología HSDPA, ha sido diseñada para aumentar la capacidad de la red en el enlace de bajada y es de la que se partirá en el proceso de migración, por ser la que actualmente se emplea en el país, como se describió en el capítulo 1.

Las mejoras en el enlace de bajada, a través de HSDPA, fueron los primeros pasos de actualización disponibles para los operadores móviles que buscaban desplegar servicios de banda ancha. Generalmente se requiere una actualización *software* para la mayoría de las redes de Acceso Múltiple por División de Código de Banda Ancha (WCDMA, *Wideband Code Division Multiple Access*).

Gracias a las características introducidas y tecnologías clave usadas por HSDPA, ésta no solo proporciona acceso de banda ancha sino que permite aprovechar la infraestructura ya desarrollada para WCDMA (UMTS¹⁷) [18]. Los detalles de HSDPA, así como los cambios introducidos, las tecnologías clave de la misma y los conceptos más importantes que deben ser tenidos en cuenta para un proceso de migración se amplían en el anexo C, con el propósito de brindar al lector la base teórica para un mejor entendimiento de la comparación de HSDPA con LTE, las mejoras tecnológicas (tratadas en este capítulo) y las estrategias y procedimientos de migración (presentadas en el capítulo 3).

Por su parte, LTE es un estándar del 3GPP especificado a partir del *Release 8*, el cual aparece debido a la necesidad de mejorar características como: velocidad de transmisión de datos, calidad de servicio, reducción de Costos Operacionales (OPEX, *Operating Expenditures*) y complejidad de la red [19].

LTE se fundamenta en la utilización de OFDMA en el enlace de bajada y el Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Única Portadora (SC-FDMA, *Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) en el enlace de subida, mejorando la eficiencia espectral obtenida por las redes 3G [20], generando así las condiciones adecuadas para soportar una mayor velocidad en un determinado ancho de banda, permitiendo brindar más y mejores servicios de banda ancha. Se destaca también, la utilización de MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), para aumentar la velocidad efectiva de comunicación de datos (*throughput*), mientras se preserva el ancho de banda [19].

Los detalles de LTE, así como los conceptos más importantes de la misma, a ser tenidos en cuenta para un proceso de migración a ésta tecnología, dentro de los cuales se encuentran las bandas de frecuencia, la arquitectura del sistema con las entidades que la componen y los aspectos técnicos más importantes se amplían en el anexo D.

¹⁷ Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS, *Universal Mobile Telecommunications System*).



2.2 ARQUITECTURA

En el camino de evolución planteado por el 3GPP, las tecnologías antecesoras a LTE se fundamentan en el uso de los dominios de conmutación de paquetes y de conmutación de circuitos sobre el núcleo de la red. A diferencia de lo anterior LTE, funciona bajo el principio de la convergencia entre los servicios de datos y de voz, soportados por la implementación de una arquitectura basada totalmente en IP (*ALL IP*), en la que, gracias a la eliminación del dominio de conmutación de circuitos, se desarrolla una red “plana” [22].

A partir de las funciones pertenecientes a las tecnologías HSDPA y LTE descritas en los anexos C y D respectivamente, se confirma que la distribución de la mayoría de las funciones dentro de la red de acceso y el núcleo de red, se mantienen de igual forma en los dos sistemas, destacando que LTE fue desarrollada con el objetivo de reducir el número de nodos de red en busca de ofrecer mejores tiempos de respuesta hacia el usuario. En la Figura 2.1¹⁸, se muestran las arquitecturas generales de las tecnologías HSDPA y LTE, en las que se incluyen cada una de las interfaces que permiten la comunicación de las entidades de cada sistema, pudiéndose observar la reducción en el número de nodos en LTE.

La red de acceso radio, en HSDPA, se compone principalmente por el Nodo B y el Controlador de la Red de Radio (RNC, *Radio Network Controller*), los que por medio de la interfaz I_{ub} establecen una conexión para el intercambio de información y prestación de servicios. La interfaz I_{ur} es el puente de comunicación entre dos RNCs donde se da soporte a los procesos de traspaso, además, el RNC se conecta al núcleo de red del sistema mediante las interfaces I_{u-PS} e I_{u-CS} de los dominios conmutación de paquetes y de conmutación de circuitos, respectivamente. Por su parte, la RAN LTE está compuesta simplemente por los Nodos B Evolucionados (eNB, *Evolved Node B*), que se encuentran unidos por medio de la interfaz X2, encargada de brindar la conectividad para algunas funciones de gestión de movilidad. La conexión al núcleo de red del sistema se realiza gracias a las interfaces S1-U y S1-C (ó S1-MME) para los planos de usuario y control, respectivamente.

El núcleo de la red, en HSDPA, está formado de manera general por los dominios de conmutación de circuitos y de conmutación de paquetes, donde el primero se compone por la MSC y su pasarela de medios conectados al RNC por medio de la interfaz I_{u-CS} , el segundo dominio se compone por el Nodo de Soporte Servicio GPRS (SGSN, *Serving GPRS Support Node*) Y el Nodo de Soporte de Pasarela GPRS (GGSN, *Gateway GPRS Support Node*), los que se comunican por medio de la interfaz G_n para el flujo de servicios IP, además el SGSN entrega información al RNC por medio de la interfaz I_{u-PS} y el GGSN usa la interfaz G_i para la transferencia de información con otras Redes de Paquetes de Datos (PDN, *Packet Data Network*). Por su parte, el núcleo de LTE está compuesto principalmente por la S-GW y la P-GW unidas por medio de la interfaz S5 que

¹⁸ Construida a partir de los anexos C y D



al igual que la interfaz Gn transfiere el flujo de servicios de datos, además, la S-GW se comunica con el eNB por medio de la interfaz S1-U para la entrega de datos de enlace de subida y de bajada, mientras que por su parte la P-GW utiliza la interfaz SGi para establecer la transferencia de información con las PDN.

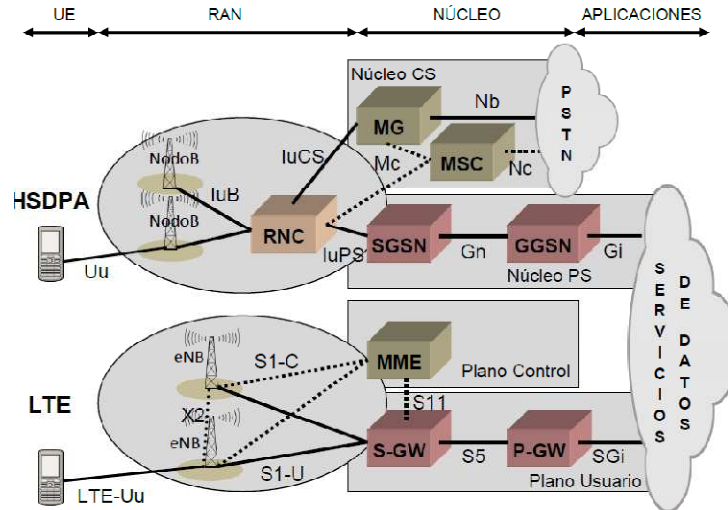


Figura 2.1. Arquitectura de Red de HSDPA y LTE.

Como se muestra en la Figura 2.1, generada a partir de lo mencionado en los anexos C y D, en la RAN de LTE se excluye la entidad RNC de HSDPA, encargada de cumplir funciones principales como: el control de admisión, la reserva de recursos y el control del proceso de traspaso. Estas funciones y las prestadas por la entidad Nodo B, son asignadas a la entidad eNB en la Figura 2.2 [23]. De esta manera es como la tecnología LTE reduce el número de entidades dentro de la arquitectura (logrando una arquitectura más sencilla), lo que genera una reducción en el procesamiento de la información ofreciendo mejores tiempos de respuesta hacia los servicios de usuario, reduciendo así la latencia y aumentando el throughput del sistema, el impacto sobre estos indicadores del desempeño se muestra en la Figura 2.13 (reducción de la latencia) y Tabla 2.4 (aumento del throughput).

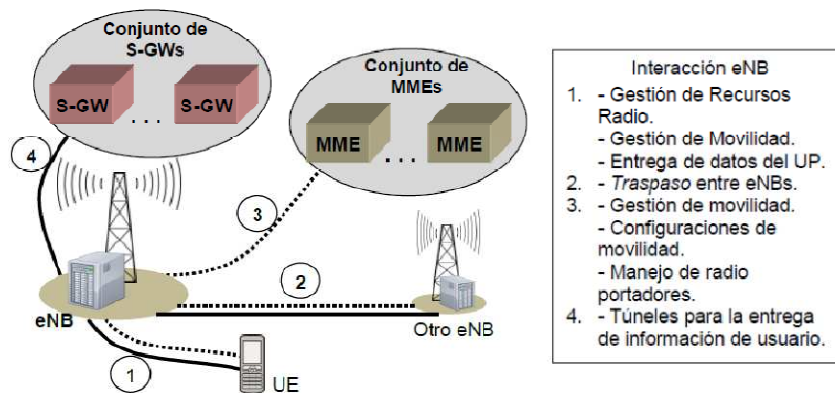


Figura 2.2. Interacción del eNB con los Elementos de la Red.



En el núcleo de red de HSDPA, la entidad SGSN está encargada de cumplir funciones principales como la entrega de paquetes de datos al Equipo de Usuario (UE, *User Equipment*), el enrutamiento y transferencia de paquetes hacia el RNC, la gestión de movilidad y de las funciones de autenticación a través de un registro de ubicación. Estas funciones, son heredadas a las Entidades de Gestión de Movilidad (MME, *Mobility Management Entity*) y S-GW del núcleo de red de LTE.

La entidad MME, el elemento principal de control en el Núcleo de Paquetes Evolucionado (EPC, *Evolved Packet Core*), tiene una conexión lógica directa al UE utilizada como canal de control principal. Además, está encargada de cumplir funciones principales como autenticación y seguridad. Cuando el UE se registra en la red por primera vez, se inicia la autenticación y se efectúa un seguimiento de la ubicación de todos UE en su área de servicio. Esta entidad también participa en el control del traspaso del UE entre eNBs, S-GWs o MMEs. En cada cambio de eNB cuando el móvil se está desplazando entre éstos, cumple funciones de gestión de la movilidad, ya que no existe un RNC para monitorear estos eventos. También realiza la gestión del perfil de suscripción y servicio de conectividad. El MME recupera el perfil de suscripción en la red local y almacena esta información durante el tiempo en que el UE se encuentre en servicio. En la Figura 2.3 [23] se muestra la interacción de una MME con los elementos de la red, y se enumeran las funciones principales.

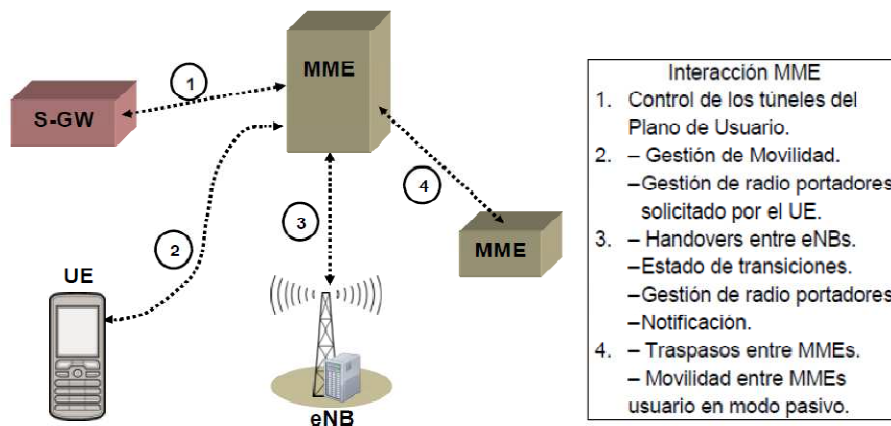


Figura 2.3. Interacción de la MME con los Elementos de la Red.

La entidad S-GW solo es responsable de sus propios recursos, y los asigna basándose en las peticiones del MME, P-GW o del PCRF, que a su vez actúan sobre la necesidad de crear, modificar o eliminar recursos para el UE. Durante la movilidad del UE entre los eNB, el S-GW actúa como punto de anclaje de la movilidad local, también da seguimiento de los datos en los túneles, organización del tráfico, reenvío de paquetes y recolección de datos necesarios para la tarificación y el cobro del usuario. En la Figura 2.4 [23] se muestra la interacción de la S-GW con los elementos de la red y se enumeran sus principales funciones.

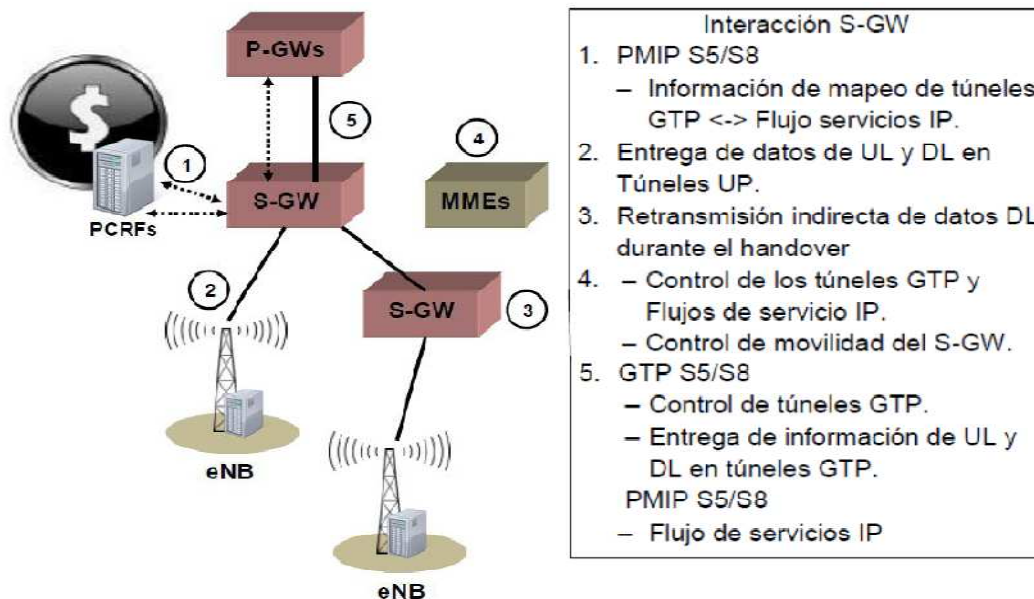


Figura 2.4. Interacción de la S-GW con los Elementos de la Red.

La S-GW se conecta a cualquier P-GW en toda la red, ya que la P-GW no va a cambiar, mientras que el S-GW si podrá variar, cuando se mueve el UE.

En el núcleo de red de HSDPA, la entidad GGSN está encargada de cumplir funciones principales como la conversión de paquetes de datos de usuario provenientes de la SGSN al formato apropiado y su transmisión a la red externa correspondiente. De igual forma realiza esta función para los paquetes de datos que vienen de la red externa. Esta entidad constituye la interfaz lógica a otras PDNs, como otras redes GPRS (2.5G y 3G), IP y X25. Realiza la asignación dinámica de direcciones de red, como direcciones IP y almacena información del usuario para encapsular el tráfico de datos hacia el móvil. Estas funciones, son heredadas a la entidad P-GW, la que se encarga de realizarlas siendo el enrutador entre el Sistema de Paquetes Evolucionado (EPS, *Evolved Packet System*) y otras PDNs, realizando funciones de filtrado, además de ser configurado para trabajar con IPv4, IPv6 o ambos protocolos, según la necesidad. Las conexiones del P-GW a los nodos vecinos y las funcionalidades de sus interfaces se muestran en la Figura 2.5 [23].

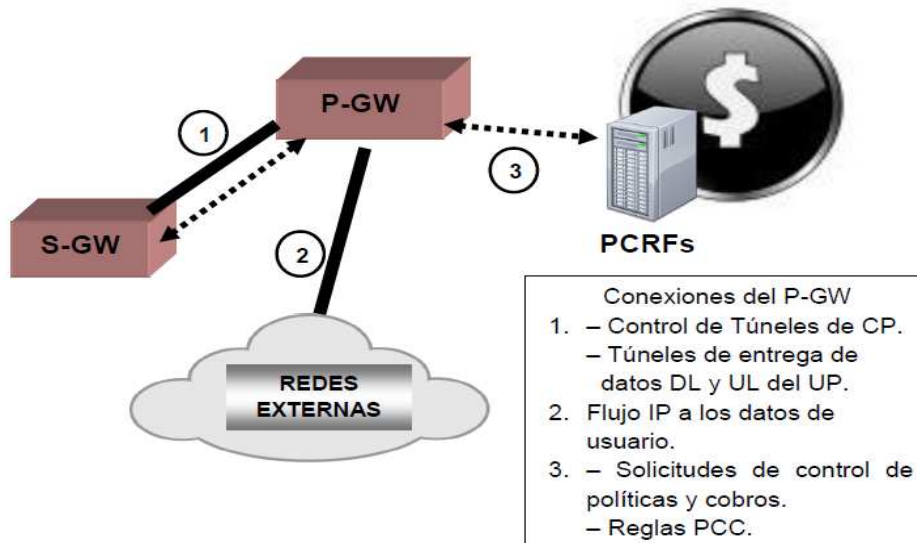


Figura 2.5. Interacción de la P-GW con los Elementos de la Red.

2.2.1. Interfaces

Como se indicó en la sección 2.2 la arquitectura de las tecnologías HSDPA y LTE tienen diferencias que se ven reflejadas en las interfaces que conectan las entidades pertenecientes a cada arquitectura.

En la Figura 2.6 [21], se muestran las interfaces más importantes pertenecientes a HSDPA, como:

- Uu : esta interfaz se encarga de comunicar al equipo del usuario y a la red de acceso. La interfaz Uu tiene funciones como la gestión de la información de difusión, manejo de la conexión (establecimiento, mantenimiento y finalización), manejo de los radio portadores (establecimiento, mantenimiento y finalización y la correspondiente movilidad de conexión) y el control del cifrado, entre otras.
- Iur : esta interfaz proporciona señalización específica para la UTRAN, además de permitir el traspaso suave. También realiza funciones como: gestión de enlaces radio, de los enlaces físicos, notificación, medidas de los recursos dedicados, y proporciona funciones de macro-diversidad.
- Iu : se encuentra entre el RNC y la MSC ($Iu-CS$) o SGSN ($Iu-PS$). El protocolo de señalización que utiliza es el RNAP (*Radio Access Network Application Part*) y realiza funciones como la gestión general de la portadora y el intercambio de información sobre la ubicación del UE entre el RNC y el núcleo de red.
- Iub : interfaz entre los nodos B y el RNC que permite el transporte de las tramas radio desde el UE hasta el RNC. Realiza funciones como la gestión de canales, recursos comunes y enlaces de radio, gestión de la configuración (como de la celda) y presentación de informes de error.



- **Gn**: esta interfaz se encuentra presente en el GGSN y en el SGSN, permitiendo que se comuniquen entre sí. La interfaz **Gn** usa el Protocolo de túnel GPRS (GTP, *GPRS Tunneling Protocol*), basado en IP para transportar los datos de usuario y la señalización.
- **Gi**: interfaz presente solo en el GGSN. Es la interfaz mediante la cual se accede a otras PDN.

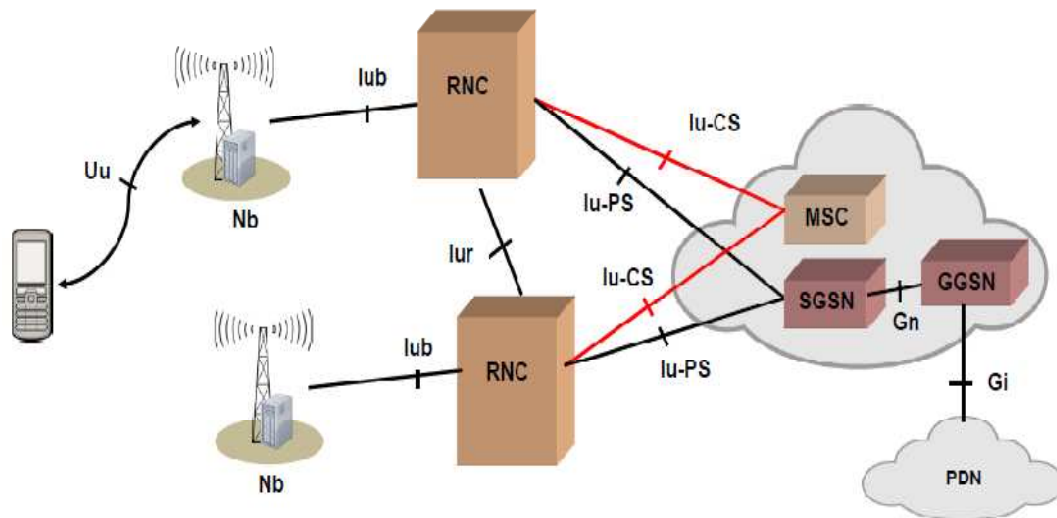


Figura 2.6. Interfaces de HSDPA.

En la Figura 2.7 [24], se muestran las interfaces demás importantes pertenecientes a LTE tales como:

- **LTE-Uu**: esta interfaz se encarga de comunicar al equipo del usuario y a la red de acceso. La interfaz **LTE-Uu** tiene funciones como el manejo de la conexión (establecimiento, mantenimiento y finalización), manejo de los radio portadores (establecimiento, mantenimiento y finalización de la conexión, así como la movilidad de la misma) y el control del cifrado, entre otras.
- **x2**: mediante la interfaz **x2** se interconectan los eNBs adyacentes para permitir el traspaso del UE y la transferencia de la información de señalización. Esta interfaz realiza funciones como el control de los túneles en el plano de usuario entre el eNB de origen y el eNB al cual se va a pasar, cancelación del traspaso y funciones generales de gestión y manejo de errores.
- **s1**: esta interfaz se divide en **s1-MME** y **s1-U** para el plano de control y el plano de usuario respectivamente. Todos los eNB son conectados a, por lo menos, un MME a través de la interfaz lógica **s1-MME**. Esta interfaz es el punto de referencia para el plano de control entre la EUTRAN y el MME. Por su parte, el S-GW se interconecta a los eNBs a través de la interfaz **s1-U** y esta interfaz es el punto de referencia entre EUTRAN y el S-GW.



- **s11**: es el punto de referencia para la conexión entre MME y el S-GW. La señalización del plano de control entre el MME y el S-GW se realiza usando la interfaz **s11**, la cual es una de las interfaces más importantes ya que, entre otras cosas, es usada para establecer la conexión IP de los usuarios LTE a través de la interconexión de pasarelas y estaciones base y además brinda soporte para movilidad cuando los usuarios se mueven entre los diferentes eNBs.
- **s5**: el S-GW y la P-GW usan la interfaz **s5** (si no se encuentran usando itinerancia) o **s8** (si el usuario se encuentra en una red ajena, es decir en itinerancia), para conectarse entre sí. También se usa en la relocalización de S-GWs dada la movilidad del UE.
- **sg-i**: esta interfaz interconecta al P-GW a otras PDNs. Es el punto de referencia entre la P-GW y la PDN, que puede ser un operador público externo o una PDN privada.

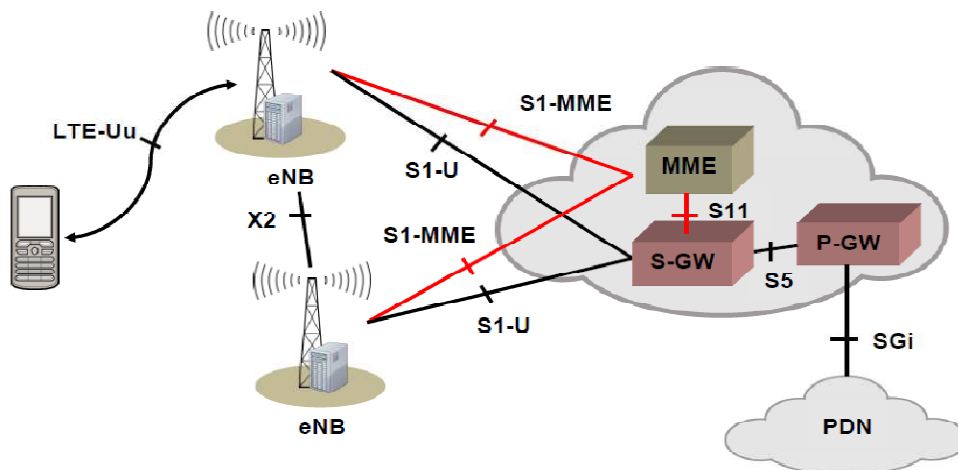


Figura 2.7. Interfaces de LTE.

Como se muestra en la Figura 2.6 y Figura 2.7, existen diferencias y similitudes en la ubicación y en las funciones de las interfaces en las arquitecturas de HSDPA y LTE. En la Tabla 2.1, construida a partir de dichas figuras, se realiza una comparación de las mismas, dependiendo de su ubicación en las arquitecturas.



Tabla 2.1. Comparación de las Interfaces de HSDPA y LTE.

HSDPA	LTE	Funciones y ubicación en la arquitectura
Uu	LTE-Uu	Se ubica entre el UE y el Nodo B o eNB respectivamente y se encarga principalmente de interconectar al usuario con la red de acceso.
Iur	x2	La interfaz Iur se ubica entre RNCs y la interfaz x2 entre eNBs, y permiten principalmente traspaso y transferencia de información.
Iub	s1	Al eliminar el RNC de la arquitectura se suprime una de las interfaces usada en HSDPA por tanto solo se hace necesaria la interfaz s1 para interconectar los eNB al núcleo de red y al igual que la interfaz Iu estaba compuesta de las interfaces Iu-CS y Iu-PS, la interfaz s1 se compone de las interfaces s1-U y s1-MME, para el plano de usuario y el plano de control respectivamente.
Iu		
Gn	s5	Se usan principalmente para interconectar SGSN con GGSN y la S-GW con la P-GW respectivamente y es la parte de la arquitectura donde tanto HSDPA y LTE usan IP.
Gi	SGi	Son las interfaces mediante las cuales se accede a otra PDNs.
	s11	Aunque esta interfaz no tiene una correspondencia directa en la arquitectura de HSDPA, es muy importante ya que se usa para establecer la conexión IP de los usuarios LTE a través de la interconexión de pasarelas y estaciones base y además brinda soporte para movilidad cuando los usuarios se mueven entre los diferentes eNBs.

En la Tabla 2.1 se observa la correspondencia de algunas de las interfaces en sus funciones y ubicaciones, como las interfaces Uu y Gi de HSDPA con las interfaces LTE-Uu y SGi de LTE. También existen interfaces que aunque no tengan correspondencia directa en HSDPA, son de gran importancia en LTE como la interfaz s1 de LTE que soporta las funciones de las interfaces Iub e Iu de HSDPA. La interfaz s11 no tiene una interfaz de comparación en HSDPA pero cumple la función de establecer la conexión IP de los usuarios LTE, siendo de gran importancia para el sistema.

2.3 ASPECTOS TÉCNICOS

2.3.1. Modulación y Codificación

La tecnología LTE plantea la implementación de un esquema de modulación de orden superior frente a la tecnología HSDPA, obteniendo mayores velocidades de transmisión de datos en un determinado ancho de banda, gracias al incremento en los bits de información por cada símbolo de modulación. De esta manera LTE puede hacer uso de los esquemas QPSK¹⁹, 16 QAM²⁰ y 64 QAM dependiendo directamente de las

¹⁹ Desplazamiento de Fase en Cuadratura (QPSK, *Quadrature Phase Shift Keying*).



condiciones del canal. La implementación de modulaciones como 16 QAM y 64 QAM, hacen que la robustez frente a interferencias y ruido²¹ se vea disminuida, requiriendo en el receptor una mayor relación de señal a ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*) para una probabilidad de error dada. En la Figura 2.8 [23] se muestra cada uno de los diagramas de constelación de los esquemas de modulación empleados por LTE (la tecnología HSDPA emplea los esquemas QPSK y 16 QAM como se menciona en el anexo C).

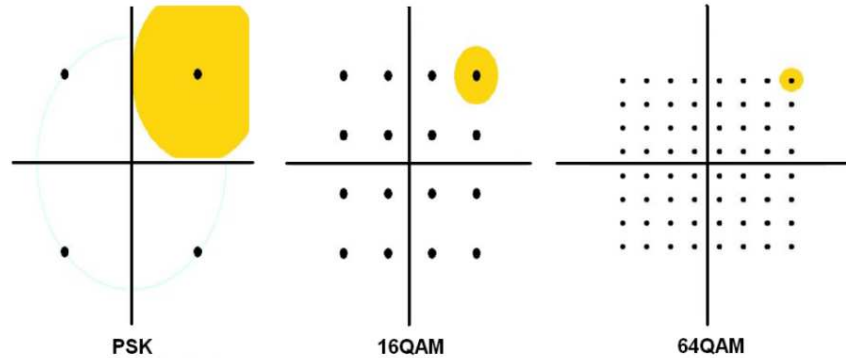


Figura 2.8. Esquemas de Modulación en LTE.

Para HSDPA se han definido dos métodos de codificación de canal: la codificación convolucional de tasas 1/2 y 1/3 utilizada para bajas velocidades de datos y la codificación turbo de tasa 1/3 para altas velocidades de datos[26]. LTE, al igual que la tecnología HSDPA usa AMC y varía las tasas de codificación según las condiciones del canal, por razones de compatibilidad con los *Releases* anteriores y por la posibilidad de reutilizar parte del *hardware* de decodificación, también hace uso de codificación convolucional y turbo.

Los principales esquemas de codificación de canal usados por los diferentes canales de transporte en LTE se muestran en la Tabla 2.2 [27]. La codificación turbo se usa para la transmisión de datos en el enlace de bajada y en el enlace de subida, notificación, y transmisiones de difusión y multidifusión. La codificación convolucional de tasa 1/3 se usa para el control del enlace de bajada y el control del enlace de subida, así como el Canal de Control de Difusión (BCH, *Broadcast Control Channel*) [27].

Tabla 2.2. Esquemas de Codificación de Canal en LTE.

Codificación	Canal
Codificación Turbo (1/3)	DL- SCH, UL-SCH, PCH y MCH
Codificación Convolucional (1/3)	BCH, Control del Enlace de Bajada y Control del Enlace de Subida.
Bloque de Códigos con Velocidad Variable	Control del Enlace de Subida.

²⁰ Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM, *Quadrature Amplitude Modulation*).

²¹ El 3GPP a partir del *Release 5* implementó la modulación y codificación adaptativa (AMC, *Adaptive Modulation and Coding*), con el fin de mejorar el desempeño del sistema y mantener una baja tasa de errores [25].



En la Figura 2.9 [28] se muestran las cadenas de multiplexación y codificación de HSDPA para el enlace de bajada y el enlace de subida, las cuales conservan las características del *Release 99*. Sin embargo para la codificación del Canal Compartido de Enlace de Bajada de Alta Velocidad (HS-DSCH, *High Speed Downlink Shared Channel*) se tienen algunas simplificaciones respecto al *Release 99*, pues, al haber solo un canal de transporte activo en él, los bloques relacionados con la multiplexación del canal para los mismos usuarios pueden excluirse. Además, el entrelazado solo se extiende por un periodo de 2 ms y finalmente la codificación turbo es el único esquema de codificación que se usa para este canal; sin embargo, al variar el tamaño del bloque de transporte, el esquema de modulación y el número de multi-códigos, se tienen disponibles otras tasas efectivas de código como la de 1/3.

Adicional a lo anterior se tiene la funcionalidad HARQ, como se muestra en la Figura 2.10 [26]. Cuando se emplea QPSK, se usa el entrelazador de canal del *Release 99* y cuando se utiliza 16 QAM se aplican dos entrelazadores de canal (idénticos) en paralelo.

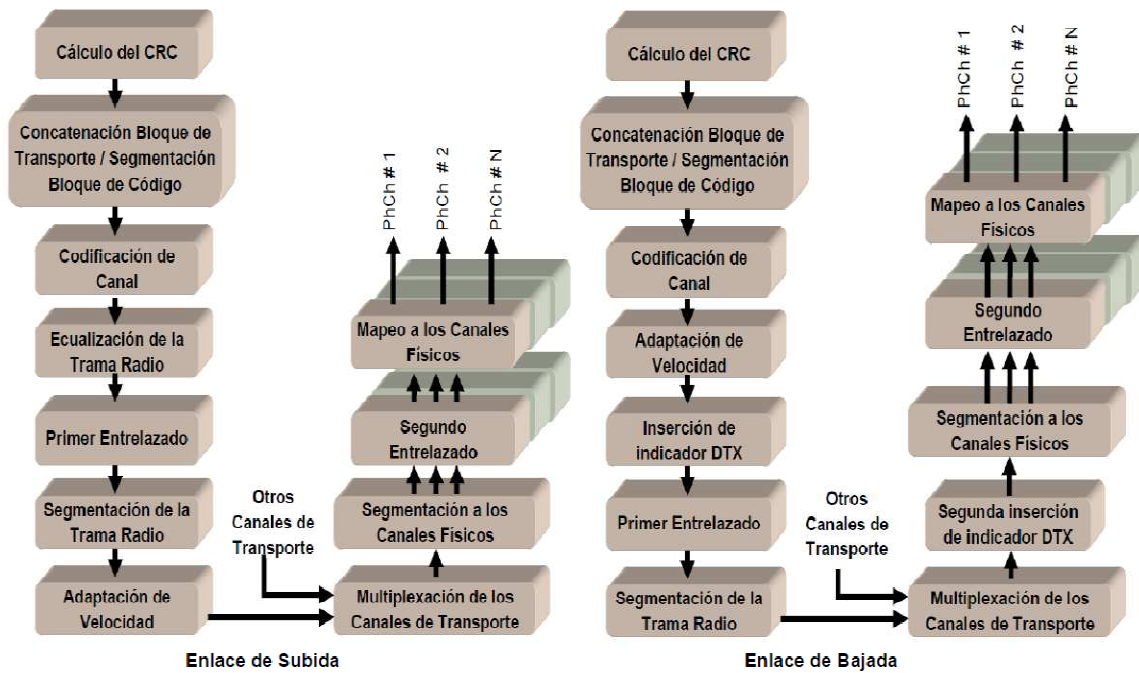


Figura 2.9. Cadenas de Multiplexación y Codificación de HSDPA para el Enlace de Bajada y el Enlace de Subida.

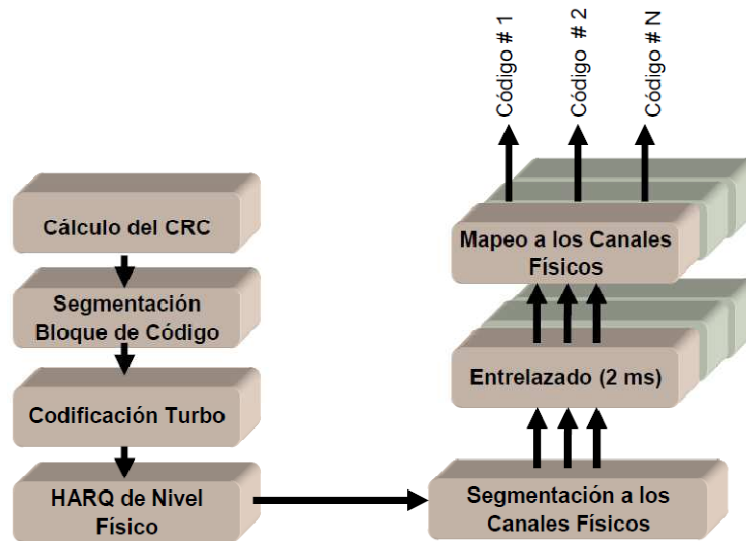


Figura 2.10. Cadena de Codificación del Canal HS-DSCH.

Luego de describir las diferencias existentes entre el *Release 99* y el *Release 5*, en la Figura 2.11 se muestra la cadena de codificación de canal para LTE. El análisis indica, que la diferencia entre las cadenas de codificación entre la tecnología HSDPA y LTE se fundamenta en la existencia de varios canales físicos en la primera, mientras que para la segunda existe un único canal físico para el mapeo de la información de usuario, como se analizó en el anexo D. De esta manera, en LTE no se incluyen algunos procesos como la segmentación a los canales físicos ni su posterior entrelazado, lo que finalmente hace la cadena de LTE más sencilla frente a la implementada en HSDPA [23] [27].

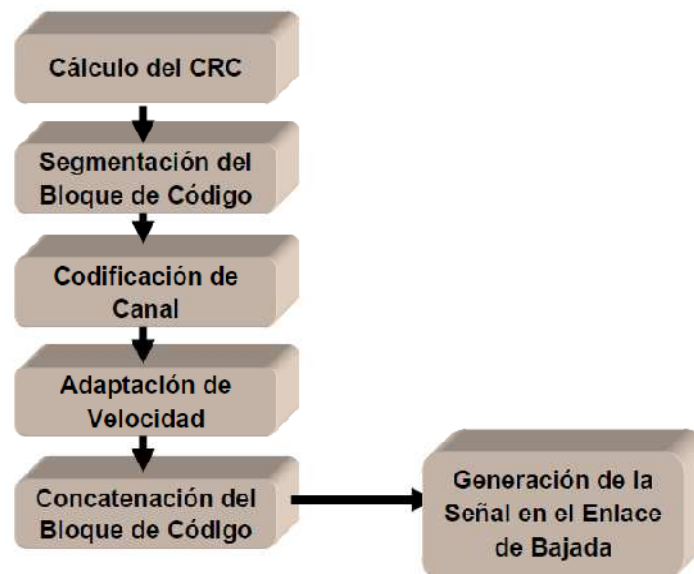


Figura 2.11. Procesamiento del Canal de Transporte DL-SCH.

El uso de AMC y 64 QAM, junto a las otras técnicas implementadas por la tecnología LTE hace que ésta tenga una mayor eficiencia espectral como se mostrará en la sección 2.3.7



2.3.2. Tecnologías de Acceso

Al realizar el proceso de migración de HSDPA a LTE, uno de los cambios más notables que se introducen, es el cambio en la tecnología de acceso, al pasar de WCDMA, al esquema de multiplexación OFDMA (para el enlace de bajada) y la técnica de acceso SC-FDMA (para el enlace de subida), en LTE. WCDMA está basado en la técnica de transmisión de espectro ensanchado por secuencia directa (DS-SS, *Direct Sequence CDMA*) y soporta una velocidad de transmisión de datos que va de 144 hasta 512 Kbps para áreas de amplia cobertura o de hasta 2 Mbps para áreas locales.

Por su parte, OFDM es una tecnología que transmite múltiples señales simultáneamente sobre el medio de transmisión ofreciendo una alta eficiencia en el ancho de banda. Por este beneficio y algunos otros, como se menciona en el anexo D, LTE utiliza las tecnologías OFDMA, la cual es una versión multiusuario de OFDM, empleada para conseguir que un conjunto de usuarios de un sistema de telecomunicaciones puedan compartir el espectro de un cierto canal para aplicaciones de baja velocidad y SC-FDMA la cual se puede interpretar como un sistema OFDMA linealmente pre-codificado, en este sistema los símbolos se transmiten secuencialmente y en el mismo período de tiempo. Después de la transmisión se deja el tiempo para evitar que se presenten traslapes.

En la Tabla 2.3 se realiza una comparación de las tecnologías de acceso, así como del acceso múltiple de HSDPA y de LTE y la forma como éstos se realizan.

Tabla 2.3. Tecnologías de Acceso.

	HSDPA	LTE	
Tecnología de Acceso	WCDMA	Enlace de Bajada	OFDMA
		Enlace de Subida	SC-FDMA
Acceso Múltiple	El esquema de acceso empleado en WCDMA está basado en la técnica de transmisión de Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DS-SS). El ensanchamiento se consigue multiplicando la señal digital en banda base por una secuencia de códigos conocida. Consiguiendo así una señal cuyo ancho de banda es mucho mayor que el ancho de banda original.	El acceso múltiple es conseguido al dividir el ancho de banda de un canal en un grupo de sub-portadoras ortogonales, a cada una se le mapea parte de la carga útil, es decir, el sistema divide el flujo de información principal en N flujos de información y asigna el mismo número de sub-portadoras para su transmisión.	

El cambio de tecnología de acceso, permite a LTE tener ventaja sobre HSDPA y ofrecer una mayor eficiencia espectral, mejora que se detallará en la sección 2.3.7.

2.3.3. Implementación de MIMO

Los operadores móviles celulares, en la actualidad, afrontan limitaciones en la asignación del espectro radioeléctrico, lo que los lleva a buscar nuevas tecnologías capaces de



ofrecer un manejo más eficiente de este recurso. Como respuesta a este objetivo, surge el sistema MIMO, desarrollado con el fin de aumentar la eficiencia espectral a partir de la implementación de múltiples antenas y sin la necesidad de incrementar el ancho de banda disponible o la potencia de transmisión. La utilización del sistema MIMO incrementa notablemente el desempeño del sistema, gracias al envío simultáneo de información por varias trayectorias, soportadas por el uso de múltiples antenas en transmisión y recepción, tanto en los eNBs como en los UEs, teniendo en sus inicios un sistema MIMO 2X2 para el enlace de bajada y un sistema SIMO para el enlace de subida.²²

La tecnología HSDPA no incluye en el *Release 5* la implementación de MIMO en su sistema, haciendo de esta consideración, una de las principales desventajas que ésta tiene frente a las nuevas tecnologías que si la utilizan, como es el caso de LTE. A partir de esto, en un proceso de migración de la tecnología HSDPA hacia LTE, se debe considerar la implicación tecnológica que genera el sistema MIMO con su introducción en una red móvil, considerando que éste brinda un mejor uso del espectro radioeléctrico. En las siguientes secciones se realizan comparaciones sobre características como el *throughput* y la eficiencia en el uso del espectro radioeléctrico, destacando los beneficios que ofrece el uso de MIMO.

2.3.4. Throughput

El *throughput* es una medida de gran importancia en las redes móviles, utilizada para la cuantificación de la velocidad de transmisión de datos que alcanza una tecnología. El desempeño del *throughput* de las redes 3GPP (a partir de la tecnología UMTS hasta LTE) se muestra en la Tabla 2.4 [29], considerando las mejores condiciones de transmisión, esta medida se evalúa en términos del *throughput* pico²³ de la red y del usuario.

Tabla 2.4. *Throughput* de las Tecnologías 3GPP.

Tecnología	Enlace de Bajada		Enlace de Subida	
	<i>Throughput</i> pico de red	<i>Throughput</i> pico de usuario	<i>Throughput</i> pico de red	<i>Throughput</i> pico de usuario
WCDMA (UMTS) <i>Release</i> 99 (Teórico)	2,048 Mbps		768 Kbps	
WCDMA (UMTS) <i>Release</i> 99 (Terminal Práctico)	384 Kbps	350 Kbps	384 Kbps	350 Kbps
HSDPA (Inicios - 2006)	1,8 Mbps	> 1 Mbps	384 Kbps	350 Kbps
HSDPA (Teórico)	14,4 Mbps		384 Kbps	
HSPA (Inicios)	7,2 Mbps	> 5 Mbps	2 Mbps	> 1,5 Mbps

²² Para mayor información remitirse al anexo D.

²³ Esta métrica mide la transmisión más rápida lograda sobre el enlace radio, a partir de la utilización de la modulación de mayor orden disponible y la codificación más eficiente.



HSPA (Teórico)	14,4 Mbps		5,76 Mbps	
HSPA+ DL 64 QAM, UL 16 QAM	21,6 Mbps		11,5 Mbps	
HSPA+ DL 64 QAM, UL 16 QAM, MIMO 2x2	42 Mbps		11,5 Mbps	
LTE (MIMO 2x2)	173 Mbps	>10 Mbps teórico esperado	58 Mbps	> 5 Mbps teórico esperado
LTE (MIMO 4x4) (Teórico)	326 Mbps		86 Mbps	

Este es otro de los aspectos clave que hacen que LTE pueda ofrecer mejoras en el desempeño y la transferencia de datos sobre los ofrecidos por HSDPA.

2.3.5. Comparación de los Canales

Como se trata en el anexo C y D de las tecnologías HSDPA y LTE respectivamente, en estos sistemas existen canales encargados de prestar diferentes tipos de servicios, entre los niveles inferiores y los superiores, de la siguiente manera: el nivel MAC ofrece servicios al nivel RLC en forma de canales lógicos. El nivel MAC a su vez, utiliza los servicios del nivel físico por medio de los canales de transporte, definidos por las características de transmisión de la información sobre la interfaz radio. Por último, en el nivel físico los canales de transporte son mapeados a los canales físicos y son transmitidos por radio frecuencia.

A continuación se realiza una descripción comparativa, enfocada en los cambios realizados en el grupo de canales que implementa LTE respecto al implementado por HSDPA, destacando que la tecnología LTE, simplifica la estructura de canales reduciendo el número de éstos.

2.3.5.1. Canales Lógicos

Este tipo de canales, en las dos tecnologías, se definen por el tipo de información que transportan. Existen los canales lógicos de control, encargados de transportar información de control necesaria para el funcionamiento del sistema, y existen los canales lógicos de tráfico, encargados de transportar la información de los usuarios. A partir de las tablas (de HSDPA) C.2 y C.3 del anexo C y las tablas (de LTE) D.1 y D.2 del anexo D, en las que se describió cada uno de los canales lógicos, se genera la Tabla 2.5, enfocada en mostrar los cambios en estos canales, entre los dos sistemas.



Tabla 2.5. Comparación Canales Lógicos.

CANALES EN HSDPA	CANALES QUE SE MANTIENEN PARA LTE	CANALES QUE SE ELIMINAN PARA LTE	CANALES QUE SE AGREGAN PARA LTE
DTCH	✓		MTCH MCCH
CTCH		X	
BCCH	✓		
PCCH	✓		
CCCH	✓		
DCCH	✓		
SHCCH		X	

Como se muestra en la Tabla 2.5, los canales DTCH, BCCH, PCCH, CCCH, DCCH se mantienen dentro de la tecnología LTE, mientras que los canales CTCH y SHCCH se eliminan de ésta. CTCH es un canal de tráfico en el enlace de bajada, que utiliza una conexión punto a multipunto para realizar la transferencia de información para todos los usuarios o para un grupo específico. Por su parte, el canal SHCCH es encargado de transmitir información de control del canal compartido en el enlace de bajada y el enlace de subida, entre la red y los UEs. Por otra parte, LTE adiciona dos nuevos canales respecto a HSDPA, MTCH y MCCH, que por su funcionalidad pueden ser comparados con el canal CTCH, ya que estos se enfocan en los servicios de difusión y multidifusión multimedia, dirigidos hacia todos los usuarios o a un grupo en especial, donde el canal MTCH se dedica a la transmisión de tráfico de datos, mientras que el canal MCCH se encarga de la información de control y la planificación de este tipo de servicios, entre la red y los usuarios.

2.3.5.2. Canales de Transporte

Este tipo de canales son el medio usado por el nivel MAC para acceder al nivel físico. La tecnología HSDPA implementa los canales de transporte en dos grupos: canales dedicados y comunes, mientras que LTE, emplea un solo grupo con el objetivo de evitar conmutaciones innecesarias entre varios tipos de canales [23]. A partir de las tablas (de HSDPA) C.4 y C.5 del anexo C y la tabla (de LTE) D.3 del anexo D, en las que se describió cada uno de los canales de estas tecnologías, se genera la Tabla 2.6, enfocada en presentar los cambios en los canales de transporte, entre los dos sistemas.



Tabla 2.6. Comparación Canales de Transporte.

CANALES EN HSDPA	CANALES QUE SE MANTIENEN PARA LTE	CANALES QUE SE ELIMINAN PARA LTE	CANALES QUE SE AGREGAN PARA LTE
DCH		X	MCH DLSCH ULSCH
BCH	✓		
PCH	✓		
FACH		X	
DSCH		X	
USCH		X	
HS-DSCH		X	
RACH	✓		

Como se muestra en la Tabla 2.6, LTE posee únicamente los canales de transporte compartidos y de difusión/multidifusión, eliminando el uso de canales dedicados hacia usuarios específicos, aumentando la eficiencia en la interfaz de acceso al medio gracias a que el sistema ya no debe asignar recursos fijos a cada usuario, por el contrario, los recursos son asignados de acuerdo a la demanda que exista en un momento determinado (cada TTI) [23]. En LTE se mantienen los canales BCH, PCH y RACH, mientras que canales como: DCH, FACH, DSCH, USCH y HS-DSCH son excluidos de la tecnología, en gran parte por la iniciativa de evitar las conmutaciones innecesarias entre varios tipos de canales eliminando los canales dedicados.

Los canales FACH, DSCH y HS-DSCH son utilizados para el enlace de bajada, donde el primero se emplea para transmitir información de control y datos de usuario, además, sobre él se puede transmitir una cantidad relativamente pequeña de datos. El segundo canal, es compartido por varios UEs, se utiliza para el transporte de información de usuario y/o información de control. Finalmente el tercer canal, al igual que el segundo es compartido entre UEs y es utilizado para la asignación de los códigos individuales, desde un conjunto común establecido. Por su parte LTE adiciona tres nuevos canales de transporte: MCH, DLSCH y ULSCH.

El canal DLSCH se utiliza en el enlace de bajada y se define como el canal que transporta toda la información destinada a un usuario, es decir tanto información de control como información de usuario, además, este canal tiene la posibilidad de emplear la Solicitud de Retransmisión Automática Híbrida (HARQ, *Hybrid Automatic Repeat Request*) y adaptación de enlace mediante la variación de la modulación, codificación y potencia de transmisión. En caso de una transmisión en una única celda, el canal lógico MTCH permite ser mapeado sobre DLSCH [30] [31]. Por su parte, el canal MCH de enlace de bajada, brinda el transporte a los servicios de multidifusión (MBMS), soportando la combinación de transmisiones MBMS en varias celdas (Red de Frecuencia Única



Difusión/Multidifusión (MBSFN, *Multicast/Broadcast Single Frequency Network*), por lo que en este caso, MTCH es mapeado sobre éste canal de transporte [31].

Por lo anterior, en especial por las funcionalidades que el canal DLSCCH presta, más el objetivo de reducir el número de canales de transporte, se considera que el canal DLSCCH, es el encargado de soportar las funciones de los canales eliminados en cuanto al enlace de bajada se refiere, apoyado por el canal MCH que se encarga de brindar el soporte a el servicio MBSFN. De igual forma, en el enlace de subida, LTE implementa un único canal conocido como ULSCCH, que tiene la posibilidad de emplear HARQ, adaptación de enlace mediante la variación de la modulación, codificación y potencia de transmisión.

2.3.5.3. Canales Físicos

En las dos tecnologías, el nivel físico mapea los canales de transporte a los canales físicos para finalmente transmitirlos por radio frecuencia. A partir de la tabla (de HSDPA) C.6 del anexo C y tabla (de LTE) D.4 del anexo D, en las que se describió cada uno de los canales de estas tecnologías, se desarrolla la Tabla 2.7, enfocada en mostrar la eliminación, mantenimiento y agregación de los canales físicos entre los dos sistemas.

Tabla 2.7. Comparación Canales Físicos.

CANALES EN HSDPA	CANALES QUE SE MANTIENEN PARA LTE	CANALES QUE SE ELIMINAN PARA LTE	CANALES QUE SE AGREGAN PARA LTE
PDCH		X	PBCH PMCH PCFICH PDCCH PHICH PUCCH
P-CCPCH		X	
S-CCPCH		X	
PICH		X	
HS-SCCH		X	
HS-PDSCH		X	
PRACH	✓		
SCH		X	
DwPCH		X	
UpPCH		X	
PUSCH	✓		
PDSCH	✓		
HS-SICH		X	

Como se muestra en la Tabla 2.7, los canales PRACH, PUSCH y PDSCH se mantienen dentro de la tecnología LTE, mientras que los canales PDCH, P-CCPCH, S-CCPCH, PICH, HS-SCCH, HS-PDSCH, SCH, DwPCH, UpPCH y HS-SICH son eliminados de ésta.

En la Figura 2.12 se muestra una comparación del mapeo entre algunos canales de transporte y físicos de las tecnologías. El canal físico PDSCH es uno de los canales que se mantiene en LTE, considerando que en esta tecnología, el nivel físico mapea sobre PDSCH, el canal de transporte DLSCCH, mientras que, en la tecnología HSDPA, el nivel



físico mapea únicamente el canal DSCH sobre el canal PDSCH. Partiendo de esto, los canales HS-PDSCH y S-CCPCH, son reemplazados por el canal PDSCH, el que asume, todas las funciones de estos, por ejemplo sobre éste, se mapea el canal PCH como se muestra en la Figura 2.12. Además, el canal PDCH también es excluido de la tecnología LTE, debido a que se encarga del transporte de los datos dedicados del nivel 2 y niveles superiores, es decir, en PDCH se mapea el canal de transporte dedicado (DCH), eliminado también por las razones mencionadas en la sección anterior.

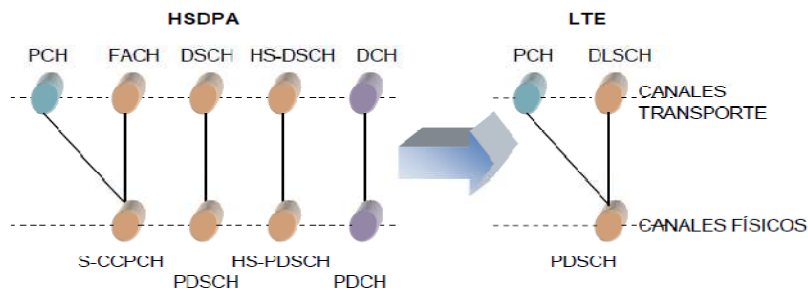


Figura 2.12. Comparación del Mapeo de Canales entre Tecnologías.

La tecnología LTE implementa diferentes canales de transporte encargados de llevar toda la información de control necesaria para la transmisión de datos de usuario en el enlace de bajada. Adicional a los mostrados en la Figura 2.12, existen tres tipos de canales: PCFICH, PDCCH y PHICH, detallados en el anexo D. Por su parte, en el enlace de subida, LTE utiliza el canal de control PUCCH, utilizado para indicar si un paquete del enlace de bajada fue correctamente recibido o no, además, se encarga de transmitir los reportes del indicador de calidad del canal.

El canal P-CCPCH de HSDPA, es reemplazado por el canal PBCH en LTE, destacando que estos canales cumplen la misma función en sus tecnologías, mapeando el bloque de transporte BCH sobre él. En LTE, el canal PMCH es implementado únicamente para difusión de servicios MBMS, ya que en él se mapea el canal MCH.

Esta reducción en el número de canales, hace que se minimicen las conmutaciones innecesarias, siendo otro de los aspectos clave que hacen que LTE pueda ofrecer mejoras en el desempeño y la transferencia de datos sobre los ofrecidos por HSDPA, obteniendo mejores valores de latencia como ñpa se muestra a continuación.

2.3.6. Latencia

La latencia se define como el tiempo de ida y vuelta que emplea un paquete de información en recorrer la red y junto con el ancho de banda, son determinantes para la velocidad de la misma. Con cada desarrollo de nuevas tecnologías se ha conseguido reducir la latencia en el sistema, llevándola de valores cercanos a los 600 ms en EDGE del Release 99 a unos 70 ms en redes HSDPA y a una latencia aún más baja en LTE de 50 ms, con tendencia futura a disminuir a valores cercanos a los 10 ms. En la Figura 2.13 se muestran los valores de latencia en las tecnologías 3GPP.

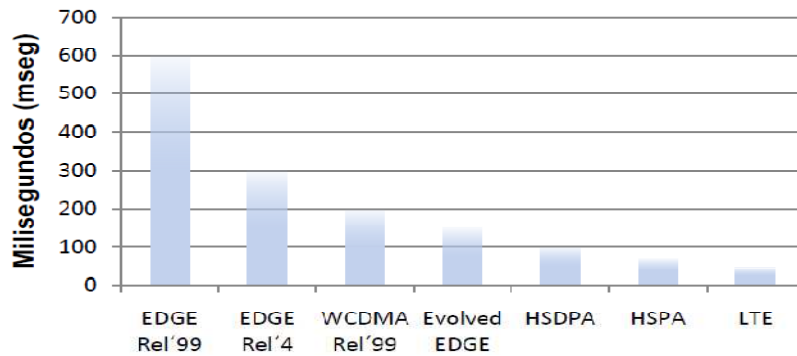


Figura 2.13. Latencia en las Tecnologías 3GPP.

Debido a la reducción de las conmutaciones innecesarias y el objetivo de disminución de nodos de LTE, se consigue reducir la latencia de valores de 70 ms en HSDPA hasta llegar a los valores actuales de 50 ms.

2.3.7. Eficiencia Espectral

La eficiencia espectral hace referencia al grado de aprovechamiento del espectro por una red inalámbrica, y es de gran utilidad para mejorar la capacidad, aumentar la potencia de la señal y reducir la interferencia. El desarrollo y despliegue de tecnologías inalámbricas, con una eficiencia espectral alta, se hace necesario y de gran importancia, debido al creciente mercado de los servicios de datos, caracterizado por un constante incremento en el número de usuarios que ejercen una mayor demanda de banda ancha. En la Figura 2.14 y Figura 2.15 [29] se compara la eficiencia espectral de las tecnologías 3GPP en enlace de bajada y el enlace de subida, respectivamente, mostrando la continua evolución de las capacidades tecnológicas.

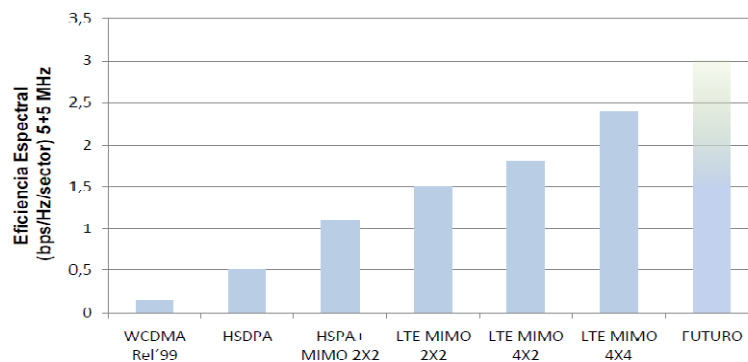


Figura 2.14. Comparación de la Eficiencia Espectral en el Enlace de Bajada entre Tecnologías 3GPP.

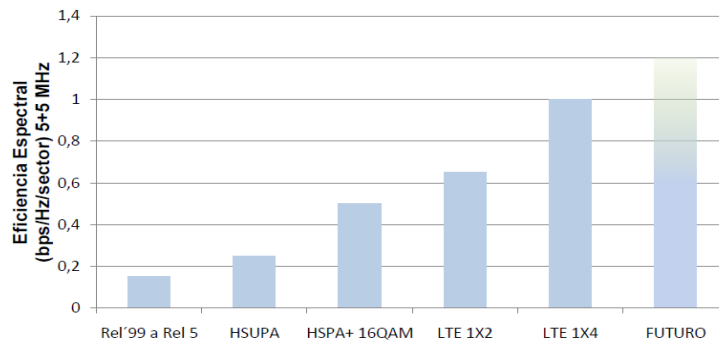


Figura 2.15. Comparación de la Eficiencia Espectral en el Enlace de Subida entre Tecnologías 3GPP.

Algunas de las mejoras son de más fácil despliegue que otras, por ejemplo, las mejoras tales como 64 QAM, son más fáciles de desarrollar para los operadores que otras como MIMO 2x2, ya que en el primero se puede realizar una actualización del software, mientras que en el segundo se requiere de implementación de hardware en la estación base. Así, la Figura 2.14 y la Figura 2.15 muestran los datos representativos en la mejora continua de la eficiencia espectral, sin embargo los operadores para aumentar la eficiencia espectral puede tener diferentes combinaciones de las características disponibles.

Gracias al uso del esquema de multiplexación OFDM, del sistema MIMO y de la modulación 64 QAM en LTE, hace que esta tecnología brinde mejores valores de eficiencia espectral que la tecnología HSDPA como se mostró en la Figura 2.14 y Figura 2.15, siguiendo la tendencia de la introducción de nuevas tecnologías del 3GPP.

2.3.8. Tendencias Tecnológicas

En la actualidad, la alta penetración del servicio de telefonía móvil en mercados maduros y el crecimiento de ésta en mercados emergentes, han sido la base para el incremento del número de usuarios de banda ancha móvil, que buscan satisfacer sus necesidades de comunicación [1]. Debido a esto, diferentes firmas consultoras buscando proporcionar información a los inversionistas y orientar a los fabricantes y operadores móviles, por medio del análisis de: mercados, evolución tecnología y competitividad de las tecnologías; realizan estudios sobre las tendencias en la demanda de las tecnologías móviles, como se muestra en la Figura 2.16 [32]. La cual es el resultado de uno de los sondeos realizados por la firma consultora *Rysavy Research* [33], en la que se espera que la tecnología LTE inicie un amplio crecimiento a nivel mundial a partir del año 2015, mientras que, tecnologías como GSM/EDGE y UMTS/HSPA, se espera que detengan su crecimiento a partir de 2015 y 2017, respectivamente.

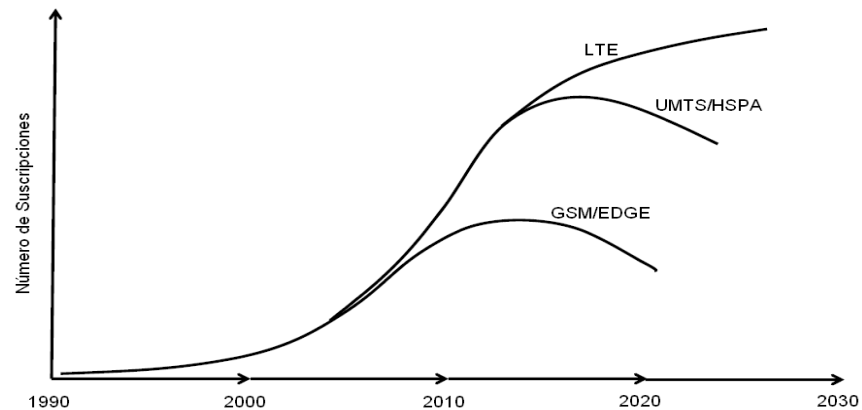


Figura 2.16. Tendencias Tecnológicas.

Al tener en cuenta lo mostrado en la Figura 2.16, se comienza a entender la importancia que tiene para LTE y para los operadores la interoperabilidad de ésta con las redes antecesoras. A continuación se verá el manejo de la interoperabilidad de LTE con las redes anteriores.

2.3.9. Interoperabilidad

En LTE existe el traspaso entre sistemas o traspaso entre Tecnologías de Acceso Radio (RATs, *Radio Access Technology*), que hace referencia al traspaso entre la Red de Acceso Radio Terrestre UMTS Evolucionada (E-UTRAN, *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*) y GERAN, UTRAN o CDMA 2000. Por lo tanto la SAE de LTE interconecta diversas redes de acceso, teniendo así interoperabilidad con redes de acceso 3GPP y no-3GPP [34]. Para más información acerca de estos procesos, remitirse al anexo E.

2.3.10. Red de Transporte

El elevado aumento de las suscripciones de banda ancha móvil desde el año 2009, como se muestra en la Figura 2.16, es un fenómeno impulsado por la masificación de dispositivos terminales como: *smartphones, netbooks, laptops, smartbooks* entre otros [35], lo cual es generado por la disminución en los precios de este tipo de dispositivos, gracias a la competencia que existe entre los fabricantes de los mismos. Con la puesta en funcionamiento de este tipo de terminales sobre la red de cualquier operador móvil, se produce un incremento en la utilización de aplicaciones multimedia, por lo cual se pronostica, un crecimiento exponencial en el tráfico de datos (a medida que las suscripciones aumentan), que debe ser soportado por la red de transporte, destacando que en la actualidad, este tipo de redes transportan el tráfico de voz sin ningún inconveniente, pero cuando además de este, se agrega el creciente tráfico de datos, aparecen las dificultades, lo que genera la necesidad de una evolución inevitable en esta red de transporte.

Según el estudio relacionado con las proyecciones del crecimiento del tráfico de datos móviles publicado por la compañía CISCO [35], se destacan las siguientes tendencias:



- A nivel mundial, el tráfico de datos móviles se duplicará cada año hasta 2014, aumentando 39 veces entre 2009 y 2014, alcanzando 3,6 Ebytes²⁴ por mes en 2014.
- En el año 2014, se espera que aproximadamente el 66% del tráfico de datos móviles a nivel mundial sea de video, debido a que este servicio desde el año 2009, tiene la mayor tasa de crecimiento frente a cualquier tipo de aplicación y se espera continúe igual según el estudio de CISCO.

A partir de los resultados de este tipo de estudios, los operadores móviles que desean masificar servicios de banda ancha móvil sobre sus redes, deben iniciar una etapa de evaluación respecto a la viabilidad de un proceso de migración en la red de transporte, debido a que sus actuales redes de transporte, se encuentran compuestas por líneas E1/T1, diseñadas para tráfico TDM, y ante un elevado crecimiento de tráfico de datos, el incremento de líneas E1/T1 no es una solución efectiva en términos de inversión [35] [36], como se muestra en la Figura 2.17, gracias a que este tipo de redes manejan un esquema lineal respecto al crecimiento de la red y los costos que conlleva, por esto, con el incremento en la utilización de este tipo de servicios, se debe pensar en tecnologías diseñadas para el transporte de datos, que ofrezcan un margen de rentabilidad atractivo para los operadores.

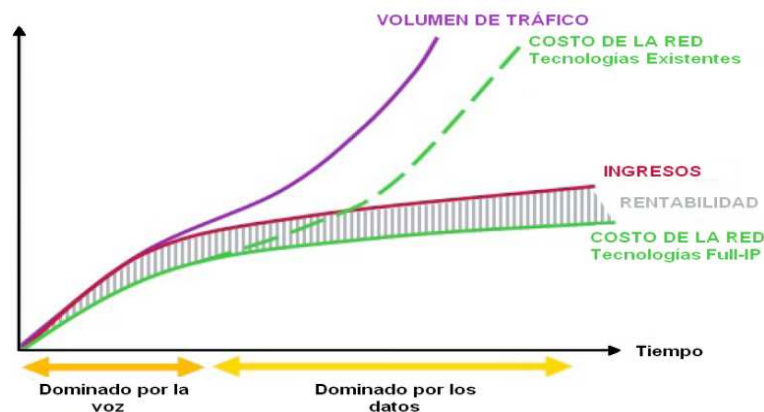


Figura 2.17. Modelos de Costo de Red.

En la Figura 2.18 [36] se muestra la red de transporte compuesta, únicamente, por líneas E1/T1, y un camino de evolución²⁵ hacia una red de transporte móvil basada totalmente en paquetes. A partir de esto, un operador móvil iniciara su camino de evolución de la red de transporte; partiendo de una red basada en líneas E1/T1 para el transporte TDM, para luego, ir hacia una red híbrida, que brinda la posibilidad de transportar el tráfico de la red según su naturaleza, es decir, la red TDM se utiliza para el transporte del tráfico de la voz, mientras que la red Ethernet se encarga del flujo de datos [36]. Este tipo de configuración

²⁴ En el sistema Internacional de Unidades se indica que el símbolo E, pertenece al prefijo Exa y representa un factor de 10^{18} .

²⁵ Iniciativa propuesta por parte de empresas fabricantes según estudios [37] [38] realizados por un portal multimedia del sector de las telecomunicaciones (telesemana.com [39]) y la firma consultora especializada en redes de datos (*Infonetics Research*) [40].



ayuda a los operadores en el sentido que continúan utilizando sus redes desplegadas con anterioridad, mientras, inician el soporte de los servicios de datos. La operación de un sistema con dos redes de transporte paralelas lo hace más complejo, pero al ser comparado con un sistema donde el incremento en el tráfico de datos se sigue soportando por medio de el aumento de líneas E1/T1, sus costos son menores [37].

Finalmente, al desplegar una red totalmente Ethernet, se transportaran altos volúmenes de tráfico de manera económicamente eficiente [37], ofreciendo servicios móviles de la actualidad y garantizando una red de transporte preparada para la llegada de nuevas tecnologías como HSPA+ y LTE. El *Metro Ethernet Forum* (MEF²⁶) asegura que esta nueva tecnología será la adecuada para la red de transporte móvil, gracias a atributos como: servicios estandarizados, escalabilidad, QoS, confiabilidad y manejo de servicios, lo cual es respaldado por los principales operadores móviles del mundo, según una encuesta realizada por la firma consultora norteamericana *Infonetics Research* [38].

Este es un factor que cobra importancia al plantear las estrategias y procedimientos para la migración a LTE, pues debe adaptarse al permanente incremento del tráfico de información y evolucionar a medida que éste aumenta.

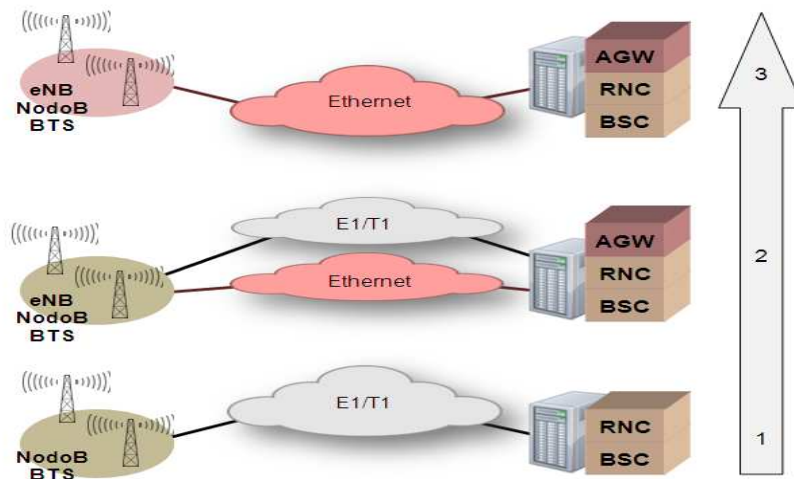


Figura 2.18. Pasos de Evolución de la Red de Transporte.

2.3.11. Servicios

Los servicios móviles basados en paquetes han evolucionado de la mano de las tecnologías móviles celulares que los soportan, iniciando en servicios de datos de baja velocidad ofrecidos a partir de la segunda generación de telefonía móvil 2G, evolucionado luego a 2.5G, logrando aumentar las velocidades de datos con tecnologías como GPRS/EDGE. Posterior a éstas, viene el despliegue de las tecnologías 3G, donde se brindan mejores capacidades de transmisión de datos, logrando prestar nuevos servicios y mejorar los existentes.

²⁶ Organismo dedicado a definir Ethernet como servicio metropolitano [41].



Luego del camino anterior y continuando con el propuesto por el 3GPP, se seguirá ofreciendo nuevas mejoras en el aumento de la velocidad de descarga y disminución de la latencia para servicios basados en paquetes, a través de tecnologías como HSDPA, LTE y tecnologías futuras, lo que permite servicios más atractivos para los usuarios finales. En la Tabla 2.8 [42] se muestra una comparación entre las categorías de servicios prestados en una red 3G básica y las mejoras que puede ofrecer un sistema LTE sobre ellas, considerando que con la evolución a través de las tecnologías 3G, antecesoras a LTE, se pueden conseguir algunas de las mejoras propuestas.

Tabla 2.8. Comparación de Servicios.

CATEGORIA	ENTORNO ACTUAL	ENTORNO LTE
Voz Enriquecida	Audio en Tiempo Real	VoIP, Video Conferencia de Alta Calidad
Mensajería	SMS, MMS, e-mails	Mensajes multimedia, mensajería instantánea, correo electrónico móvil y mensajería de video.
Navegación	Acceso a servicios de información <i>on-line</i> , para usuarios con tarifa estándar. Actualmente se limita a navegación y carga de contenido a sitios de redes sociales, a través de tecnologías de datos en redes móviles.	Navegación y carga de contenido a sitios de redes sociales con mayores velocidades
Información paga	Contenido para usuarios que pagan un cargo adicional. Principalmente información basada en texto	Periódicos electrónicos, y audio de alta calidad de flujo multimedia (<i>streaming</i>)
Personalización	Especialmente <i>ringtones</i> , protectores de pantalla y <i>backtones</i>	Tonos reales (grabaciones originales e artistas), sitios web para móviles personalizados
Juegos	Juegos <i>online</i> y para descargar	Mayor calidad de experiencia en el uso de juegos <i>online</i>
TV/Video sobre demanda	Contenidos de video reproducible y descargable	Servicios de radiodifusión de televisión, y sobre demanda, video de alta calidad de flujo multimedia (<i>Streaming</i>)
Música	Descarga de canciones completas y servicios de radio sobre internet.	Almacenamiento y descarga de música de alta calidad
Mensajes de contenido y cruce de medios	Mensajería <i>peer-to-peer</i> usando el contenido de terceros, así como la interacción con otros medios	Distribución a gran escala de video clips, servicios de karaoke y publicidad móvil basada en video
Comercio Móvil	Comisiones por transacciones (incluyendo juegos de azar) y	Teléfonos móviles como dispositivos de pago, con los



	facilidades de pago realizadas a través de redes móviles	detalles del pago realizado a través de redes de alta velocidad.
Redes móviles de datos	Acceso a redes corporativas internas y bases de datos, y el uso de aplicaciones como la gestión de relaciones con los clientes (CRM, <i>Customer Relationships Management</i>)	Transferencia de archivos P2P. Aplicaciones de negocios, uso compartido de aplicaciones

Con la implementación de LTE, se impulsarán las capacidades de los operadores de la red, permitiéndoles proporcionar una banda ancha móvil con mayores velocidades y a más usuarios, con lo que revolucionarán el mercado de las telecomunicaciones móviles y permitiría llevar la banda ancha móvil a las regiones menos pobladas y contribuir a la reducción de la brecha digital que existe entre las zonas rurales y urbanas.

Gracias a las prestaciones de LTE y menores latencias en cargas y descargas, permitirá que los proveedores de servicios ofrezcan velocidades más altas de datos, incrementen la adopción de servicios de datos móviles y mejoren su ARPU, dado que el incremento esperado en el tráfico de datos móviles impulsado principalmente por el video tiene una gran expectativa pasando de los 500.000 TB por mes para el 2011 a los casi 3´500.000 TB por mes para el 2014 [43]. Esto debido no solo a la evolución de las redes, sino también a la de los dispositivos que habilitaran en conjunto la entrega de nuevos servicios que aumenten la calidad de la experiencia de los usuarios.

Estos nuevos servicios abarcarán diferentes tipos de mercados, generando nuevos ingresos (gracias a la transferencia de datos, soluciones de almacenamiento y comercio electrónico) y nuevos clientes, que pueden ser usuarios en busca de conectividad y contenidos como: video llamada o video compartido, acceso a música HD, video vigilancia móvil o servicios basados en localización y la publicidad, juegos y pagos móviles [43]. También están las nuevas capacidades para los usuarios empresariales donde el compartir información en tiempo real puede traducirse en una mayor productividad de los empleados dentro y fuera de la oficina, gracias a servicios como: video colaboración (bidireccional o múltiple), guías de viaje y transferencia de archivos sin importar el tamaño. Adicional a esto existen otro tipo de aplicaciones que pueden ser ofrecidas por LTE, como son: seguridad en casa (videocámaras y alarmas) e información del estado del automóvil (como mantenimiento preventivo y/o correctivo) [43], con lo cual LTE busca brindar nuevas y completas experiencias a los usuarios.

2.3.12. Bandas de Operación y Anchos de Banda de Canal

El impacto generado en un operador por la masificación de servicios de datos y voz, se ve reflejado en la necesidad de implementar nuevas tecnologías capaces de soportar la creciente demanda de servicios e incrementar el espectro radioeléctrico disponible. El 3GPP, en su camino de evolución, ha dispuesto de nuevas bandas de operación para dar soporte a los requerimientos e implementación de nuevas tecnologías. En la Tabla C.7



del anexo C y la Tabla D.6 del anexo D, se muestran las bandas de operación para las tecnologías HSDPA y LTE respectivamente, destacando que, a partir del *Release 5* se han agregado 12 nuevas bandas de operación para el modo FDD y 3 más para el modo TDD.

Con la asignación de varias bandas de operación para la tecnología LTE, (en total 23 bandas de operación, 15 y 8 para los modos FDD y TDD respectivamente) ésta ofrece la posibilidad de soportar servicios empleando agregación de recursos sobre una o diferentes bandas radioeléctricas para el funcionamiento del enlace de subida y de bajada de un operador, además, LTE a diferencia de HSDPA²⁷ ofrece diferentes opciones en la asignación de los anchos de banda de canal sobre el enlace de subida y de bajada, distribuyendo el espectro radioeléctrico de un operador de acuerdo a las necesidades específicas de cada uno de los servicios soportados. Para más información acerca de los anchos de banda de canal soportados por LTE consúltese la Tabla D.5 del anexo D.

2.4 ANÁLISIS DE LAS DIFERENCIAS FUNCIONALES PARA UN PROCESO DE MIGRACIÓN

Para junio de 2010, más de 4.4 billones²⁸ de usuarios utilizaban las tecnologías GSM-HSPA, y se espera que para el año 2014 las tecnologías 3G aumenten en 3.3 billones el número de suscripciones, destacando que dentro de ese grupo, se espera que 2.7 billones de usuarios se comuniquen por medio de tecnologías 3GPP [44]. Es así como se demuestra la gran acogida que presentan las tecnologías 3GPP, en especial, tecnologías como WCDMA (UMTS) y HSPA que han conseguido establecerse en el mercado celular como una solución global de banda ancha móvil, en gran parte, gracias al éxito de la tecnología GSM.

El sistema móvil UMTS de 3G, surgió como respuesta a la especificación IMT-2000 [45], pero a pesar de los avances ofrecidos por esta tecnología, aparece la necesidad por parte del 3GPP de incorporar el concepto ALL-IP en nuevos sistemas, por lo que el desarrollo de este nuevo objetivo, se inicia con la actualización de la red de acceso. De esta manera, a partir de un estudio realizado en el *Release 4*, se evaluaron una serie de técnicas para ofrecer altas velocidades de transmisión, obteniendo como resultado la tecnología HSDPA, especificada finalmente en el *Release 5* [46].

Debido al creciente mercado de los servicios de datos y requerimientos de un mayor ancho de banda y mejores capacidades, por parte los usuarios, hacia las redes móviles, surgen nuevos desafíos para los operadores, dirigidos al aumento de la eficiencia espectral, las velocidades de transmisión, además de la reducción de los tiempos de latencia [47], dando como resultado la necesidad de avance en un entorno tecnológico, promoviendo la llegada de la tecnología LTE, que presenta en general, un sistema de paquetes optimizado y una red de acceso radio evolucionada, capaz de remplazar la UTRAN [15] y competir con otras soluciones de banda ancha inalámbricas como lo es la

²⁷ Esta tecnología ofrece un ancho de banda de canal fijo de 5 MHz como mencionó el capítulo 2.

²⁸ Este prefijo se utilizará a lo largo de este documento, bajo la escala corta del Sistema Internacional.



Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas (WiMAX, *Worldwide Interoperability for Microwave Access*).

Por otra parte, LTE surge como una nueva tecnología totalmente basada, en la conmutación de paquetes (ALL-IP), que la presenta como una buena solución a los desafíos que deben afrontar los operadores respecto al nuevo modelo de costos que presenta el mercado de datos móviles, gracias a que esta tecnología ofrece una reducción en el costo total por megabyte de tráfico [47], como se muestra en la Figura 2.17.

Por lo tanto, el incremento de la eficiencia espectral y *throughput* al mismo tiempo que se disminuye la latencia del sistema, hace que LTE desarrolle un mejor desempeño de red, permitiéndole habilitar mejores servicios de datos. La reducción de la latencia permite una rápida adaptación de canal, promoviendo la prestación de servicios en tiempo real, además, el aumento de la velocidad de transmisión de datos proporciona las capacidades para soportar aplicaciones enriquecidas en contenido, teniendo en cuenta, que también surgen nuevas aplicaciones con mayor complejidad al requerir tanto tiempo real como altas velocidades de transmisión de datos [43]. Todas estas clases de servicios son mostradas en la sección 2.3.11. Finalmente, LTE brinda más cobertura y una experiencia de banda ancha personalizada gracias a estos avances.

Otras características que hace a LTE una tecnología completa y adecuada para ser escogida en un proceso de migración se relacionan con la flexibilidad en el uso del ancho de banda como se mostró en la sección 2.3.12, la interoperabilidad con redes 3GPP y no 3GPP como se mostró en la sección 2.3.9, el soporte multimodo; FDD y TDD, y que es una tecnología que se beneficia de las economías de escala, gracias a la adopción de las tecnologías 3GPP, antecesoras, a nivel mundial.

De esta manera, cuando un operador desea actualizar su tecnología móvil, LTE se presenta como una buena opción por las características tecnológicas que presenta su funcionamiento, teniendo en cuenta que, además, en este proceso es necesaria la actualización de la red de transporte para soportar los altos flujos de información que los nuevos servicios de datos pueden generar como se mencionó en la sección 2.3.10.

A partir del desarrollo de éste capítulo y las comparaciones generadas, se da cumplimiento a las fases de preparación y descripción en su totalidad y a las actividades número 6 y 8 de la fase de construcción teórica global propuestas en el modelo de investigación documental; de esta manera se cumple con el primer objetivo específico referente a la identificación de las diferencias funcionales de las tecnologías HSDPA y LTE que resultan determinantes en un proceso de migración y se avanza hacia el cumplimiento del objetivo general.



3. ESTRATEGIAS Y PROCEDIMIENTOS PARA LA MIGRACIÓN A PRE 4G EN COLOMBIA CON LA TECNOLOGÍA LTE

En el presente capítulo se identifican posibles alternativas de espectro radioeléctrico y se proponen estrategias y procedimientos para la migración a Pre 4G por parte de los operadores móviles colombianos con la tecnología LTE.

3.1 GENERALIDADES

Los sistemas de comunicación móvil ofrecen en la actualidad una gran cobertura sobre todos los municipios de país, aproximadamente un 99,1% y 85,65% con tecnologías 2G y 3G, respectivamente [48]. HSDPA empieza a ofrecer a los usuarios a una nueva ola de servicios como las redes sociales y la mensajería instantánea. A medida que se realiza la masificación de este tipo de servicios, las entidades gubernamentales deben realizar un proceso de búsqueda de nuevas bandas, para aumentar la cantidad de espectro radioeléctrico asignado a los sistemas de comunicación móvil.

Por otra parte, la implementación de nuevas tecnologías de banda ancha, es un paso importante que deben realizar los operadores móviles, en busca de mejorar la eficiencia espectral y otras características que brindan la oportunidad de ofrecer una mejor experiencia del usuario en la red. Por lo tanto, los operadores móviles deben plantear estrategias de migración hacia nuevas tecnologías bajo la premisa de aprovechar la infraestructura que tienen instalada y las posibles alternativas para uso del espectro radioeléctrico.

3.2 ALTERNATIVAS DE USO DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO PARA LA INTRODUCCIÓN DE PRE 4G EN COLOMBIA

3.2.1. *Alternativas de Uso de Espectro Radioeléctrico*

El crecimiento de la demanda de servicios de banda ancha móvil, genera consecuencias tecnológicas a los operadores móviles como las mencionadas en el capítulo 2, especialmente, existe un factor determinante en el proceso de migración de un operador, relacionado con la necesidad de asignación de nuevas bandas de frecuencia por parte de las entidades gubernamentales, para que se generen las garantías necesarias que permitan un proceso de despliegue y operación de nuevos sistemas de banda ancha móvil.

A continuación, en la Tabla 3.1 se define el grupo de bandas de espectro radioeléctrico que podrían ser utilizadas en la implementación de la tecnología LTE en Colombia, propuestas en este trabajo de grado a partir del análisis de algunos factores como:

- Bandas de frecuencia definidas para las IMT en Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones (WRC, *World Radiocommunication Conferences*) como: WRC-92, WRC-2000 y WRC-07.



- Atribución de rangos de espectro radioeléctrico para las tecnologías de banda ancha móvil realizada en mercados desarrollados internacionales que por su trayectoria cuentan con mayor madurez tecnológica, fomentando el uso de estas bandas a nivel mundial en busca de la armonización del espectro, lo que además, lleva a conseguir beneficios gracias a la economía de escala que ofrecen las tecnologías 3GPP.
- Estudio por parte de la ANE conocido como CNABF- 2019, enfocado en el análisis de posibles atribuciones de bandas para las tecnologías móviles celulares en Colombia, además de contemplar la redistribución de las bandas que ya han sido asignadas para estos servicios.
- Recomendación realizada por la organización 3G Américas, donde se realizan sugerencias para la implementación de LTE en Latinoamérica [49].

Tabla 3.1. Bandas de Espectro Radioeléctrico Candidatas para LTE en Colombia.

IDENTIFICADOR		450	700	Celular 850	AWS
FRECUENCIAS (MHz)	Enlace de Subida	450 - 470	698 - 806	824 - 849	1710 - 1755
	Enlace de Bajada			869 - 894	
IDENTIFICADOR		PCS 1900	2.3 TDD	IMT Extension	
FRECUENCIAS (MHz)	Enlace de Subida	1850 - 1990	2300 - 2400	2500 - 2690	
	Enlace de Bajada				

3.2.1.1. Bandas de Frecuencia Menores a 1 GHz

- **Banda 450 – 470 MHz**

En Colombia, esta banda se encuentra atribuida a servicios como: fijo, móvil, meteorología por satélite y móvil por satélite. La Comisión Interamericana de Telecomunicaciones (CITEL) en su recomendación CCP.II/Rec. 10 (V-05)²⁹, expresa que el uso de esta banda es adecuado donde el espectro necesario esté disponible y puedan coexistir los sistemas radioeléctricos nuevos y los existentes sin causar interferencia perjudicial.

En la recomendación de CITEL se expresa que la utilización de la banda de 450 MHz, se constituye en una herramienta útil para que las comunicaciones y el acceso a la información lleguen a todas las comunidades, especialmente a zonas remotas y se

²⁹ Actualmente, a partir de la reunión realizada en octubre de 2010 la CITEL CCP.II Brasil propuso definir disposiciones de frecuencias armonizados para las Américas, para actualizar la Recomendación CCP.II/REC. 10 (V-05), para mayor información remitirse a los informes finales – CCP.II [50].



convierta en elemento de integración social, como una de las prioridades más importantes de los gobiernos de países en desarrollo.

En esta banda se pueden realizar asignaciones pares dúplex en frecuencia cercanas a los 5 MHz de ancho de banda. La distribución de canales según la distribución NMT-450 (*Nordic Mobile Telephony - 450*), se muestra en la Tabla 3.2 [51].

Tabla 3.2. Distribución de Canales Banda de 450 MHz.

Sub-banda	Terminal (MHz)	Red de acceso (MHz)	Ancho de banda (MHz)
A	452.500 a 457.475	462.500 a 467.475	4,957 X 2
B	452.000 a 456.475	462.000 a 466.475	4,475 X 2
C	450.000 a 454.800	460.000 a 464.800	4,800 X 2
D	411.675 a 415.850	421.675 a 425.850	4,175 X 2
E	415.500 a 419.975	425.500 a 429.975	4,475 X 2
F	479.000 a 483.480	489.000 a 493.480	4,480 X 2
G	455.230 a 459.990	465.230 a 469.990	4,760 X 2
H	451.310 a 455.730	461.310 a 465.730	4,420 X 2

- **Banda de 700 MHz**

La banda 700 MHz conocida como “Dividendo Digital”, se muestra en la Figura 3.1 [2], resulta un espectro importante para desarrollar los servicios de banda ancha móvil en América latina y contribuir de este modo a la reducción de la Brecha Digital, principalmente como solución más económica para las áreas rurales y de baja densidad poblacional, al presentar muy buenas características de propagación [52].

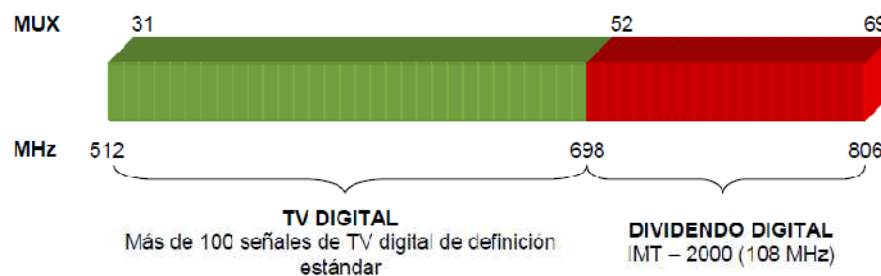


Figura 3.1. Distribución de Frecuencias del Dividendo Digital.

Actualmente existen varias opciones de canalización en debate. En la Tabla 3.3 [53] se muestran las propuestas de Asia Pacífico (FDD y TDD) y Estados Unidos. A partir de éstas, se plantea el reto de alcanzar una posición común a fines de 2010 o principios de 2011 [52].



Tabla 3.3. Disposición de Frecuencias para la Banda 700 MHz.

Disposiciones de frecuencias	Estación móvil transmisora (MHz)	Separación central (MHz)	Estación base transmisora (MHz)	Separación dúplex (MHz)
Asia – Pacífico FDD	701 - 748	10	758 - 803	57
Asia – Pacífico TDD	701 - 803			
FCC	698 – 746		746 - 806	48

- **Banda Celular 850**

Esta banda está comprendida entre los 824 – 894 MHz. En Colombia, el servicio de telefonía móvil celular se encuentra implementado en la actualidad sobre esta banda.

Esta banda se compone de la banda inferior comprendida entre los 824 – 849 MHz y la banda superior comprendida entre los 869 – 894 MHz. La disposición de frecuencias se muestra en la Tabla 3.4 [54], según la recomendación de la ITU-R 1036-3.

Tabla 3.4. Disposición de Frecuencias para la Banda Celular 850.

Disposición de frecuencias	Estación móvil transmisora (MHz)	Separación central (MHz)	Estación base transmisora (MHz)	Separación dúplex (MHz)
A1	824 - 849	20	869 - 894	45

3.2.1.2. Bandas de Frecuencia Menores a 3 GHz

- **AWS**

Teniendo en cuenta el concepto de la armonización internacional, se plantea el uso la banda AWS, la cual tiene una distribución de frecuencias de 1710 – 1755 MHz para la banda inferior, componente que coincide con parte de la banda inferior de la banda GSM 1800; y la banda superior, comprendida entre los 2110 – 2155 MHz, que coincide con la banda superior de la banda UMTS Core, con la opción de usar portadoras de 5, 10 o 15 MHz, dependiendo de la disponibilidad del espectro y la competencia del mercado. En Colombia, el espectro de AWS se encuentra atribuido una serie de servicios como: fijo, móvil, investigación espacial y móvil por satélite.

Las bandas GSM 1800 y UMTS Core las cuales comparten parte de sus espectros radioeléctricos con AWS, no son alternativas para el caso colombiano debido a que parte de sus rangos de espectro ya han sido atribuidos en la banda PCS 1900 mencionada a continuación en esta sección.



- **Banda PCS 1900**

Esta banda está comprendida entre los 1850 – 1990 MHz. En Colombia, se ha atribuido a una serie de servicios como: fijo, móvil, móvil (PCS) y móvil por satélite.

Esta banda se compone en: banda inferior, comprendida entre los 1850 – 1910 MHz y banda superior, comprendida entre los 1930 – 1990 MHz. Entre estas 2 bandas se encuentra un espacio en el cual se ubica la banda denominada PCS *central Gap* comprendida entre los 1910 – 1930 MHz, para el modo TDD, como se muestra en la Tabla 3.5 [54] según la recomendación de la ITU-R 1036-3.

Tabla 3.5. Disposición de Frecuencias para la Banda PCS 1900.

Disposiciones de frecuencias	Estación móvil transmisora (MHz)	Separación central (MHz)	Estación de base transmisora (MHz)	Separación dúplex (MHz)	Espectro no apareado (TDD) (MHz)
B3	1850 - 1910	20	1930 - 1990	80	1910 – 1930

- **Banda 2300 MHz**

Esta banda conocida también como China TDD, es una de las nuevas bandas propuestas para los servicios IMT, donde se busca fomentar el concepto de neutralidad tecnológica gracias a que en tecnologías como LTE o WiMAX, los UEs son desarrollados con la capacidad de operar tanto en el modo FDD como en TDD. Por otra parte, la organización 3G Américas realizó una recomendación para la implementación de LTE TDD en Latinoamérica denominada “*3GPP LTE for TDD Spectrum in the Americas*” [49], en busca de brindar nuevas opciones de espectro radioeléctrico. En esta banda, se encuentran implementados en la actualidad en Colombia, servicios como fijo y radio aficionados.

- **Banda IMT Extension**

En Colombia, esta banda ha sido atribuida a una serie de servicios como: fijo, móvil, móvil (IMT)³⁰, fijo por satélite, radiodifusión por satélite, investigación espacial, radioastronomía. En junio de 2010, el operador UNE EMP ganó la licitación de 50 MHz para prestar servicios móviles terrestres, este espectro se encuentra actualmente en proceso de liberación y se tiene previsto entregarla a inicios del 2011.

La banda de 2500 MHz, tiene la opción de usar portadoras de 5, 10, 15 o 20 MHz, dependiendo de la disponibilidad del espectro y la competencia del mercado.

Esta banda tiene una disponibilidad de 190 MHz, de los cuales 140 MHz pueden usarse para el modo FDD y 50 MHz para el modo TDD. Las opciones de disposición

³⁰ Servicio en funcionamiento a partir de junio de 2011.



de frecuencias se muestran en la Tabla 3.6 [54] según la recomendación del Sector de la Radiocomunicación de ITU (ITU-R, *ITU Radiocommunication Sector*) 1036-3.

Tabla 3.6. Disposición de Frecuencias para la Banda IMT *Extension*.

Disposiciones de frecuencias	Estación móvil transmisora (MHz)	Separación central (MHz)	Estación de base transmisora (MHz)	Separación dúplex (MHz)	Utilización de la separación central
C1	2500 - 2570	50	2620 - 2690	120	TDD
C2	2500 -2570	50	2620 - 2690	120	DL de FDD (externo)
C3	FDD/TDD flexible				

A partir de las bandas mencionadas anteriormente, se generó la Figura 3.2 en la cual se muestra la ubicación de estas en el espectro radioeléctrico.

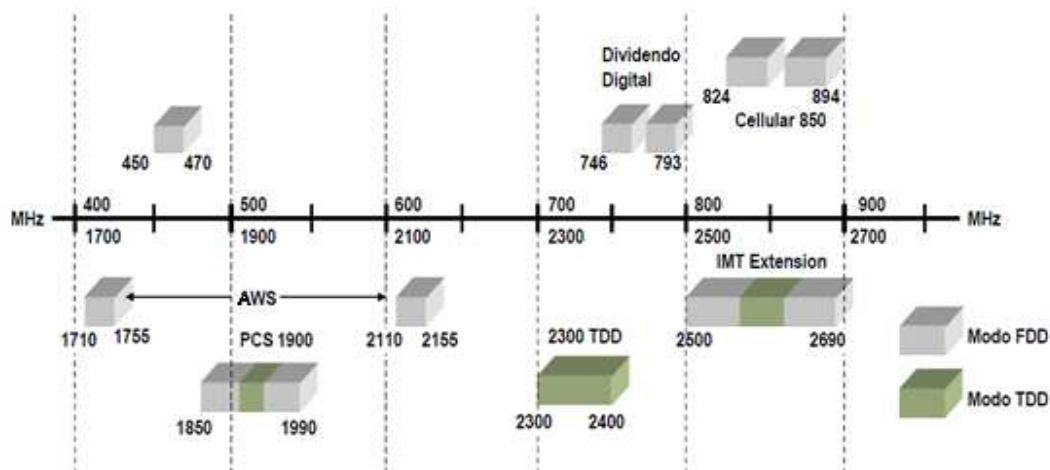


Figura 3.2. Ubicación de las Bandas en el Espectro Radioeléctrico.

3.2.2. Comparación de las Alternativas de Uso de Espectro Radioeléctrico

Al realizar la comparación de las diferentes alternativas de uso de espectro radioeléctrico, se consideran las bandas: 450 MHz, 700 MHz y 850MHz como bandas de baja frecuencia, mientras que las bandas: AWS, PCS 1900, 2300 TDD e IMT *Extension*, se consideran de alta frecuencia. A partir de esto, se analizan los beneficios y las limitaciones en características como: capacidad de transmisión de información, CAPEX, cobertura y disponibilidad de las bandas en Colombia.

Un sistema de comunicación móvil debe operar tanto en bandas de alta frecuencia como en bandas de baja frecuencia, aprovechando los beneficios que cada una de estas ofrece en distintos escenarios, por ejemplo: se utilizan bandas de alta frecuencia en zonas urbanas gracias a la capacidad que éstas ofrecen, mientras que en las zonas rurales se utilizan frecuencias bajas ya que la incidencia del tráfico no es muy significativa, a cambio de esto, se requiere prestar una mayor cobertura. En la Figura 3.3 [55], se muestra la



cobertura de las diferentes bandas de frecuencia y en la Figura 3.4 [56], una comparación entre las bandas de 700 y 2100 MHz.

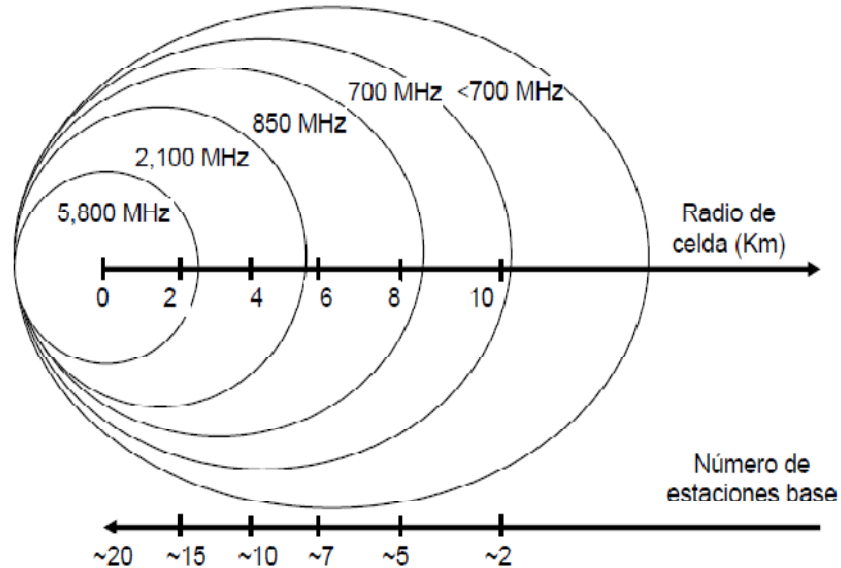


Figura 3.3. Cobertura de las Diferentes Bandas de Espectro Radioeléctrico.

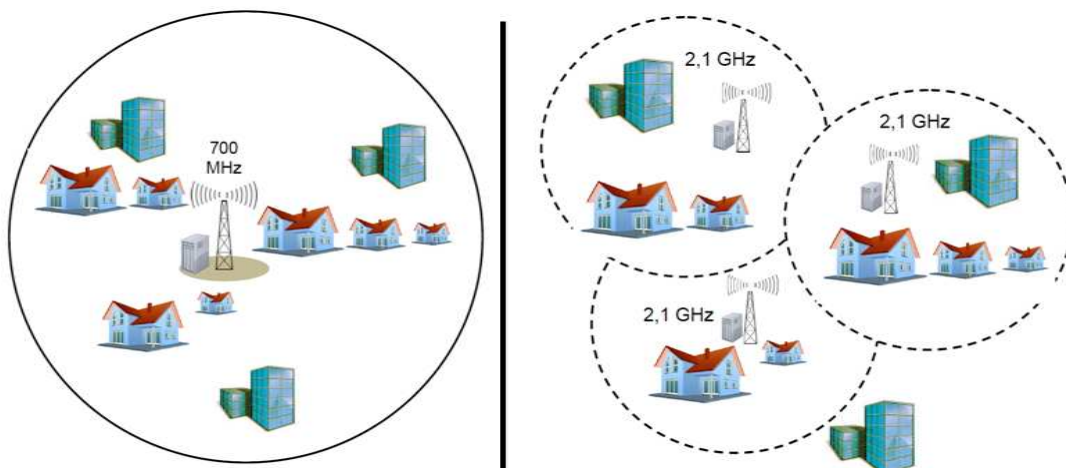


Figura 3.4. Comparación de la Cobertura de las Bandas de 700 MHz y de 2100 MHz.

De esta manera, además del impacto de la cobertura en los requerimientos de los operadores y en la prestación de los servicios, se ve reflejado en el costo del despliegue de tecnologías como LTE, de tal manera que el uso de estas bandas de frecuencia tiene asociado un CAPEX para cada una de ellas, como se observa en la Figura 3.5 [56].

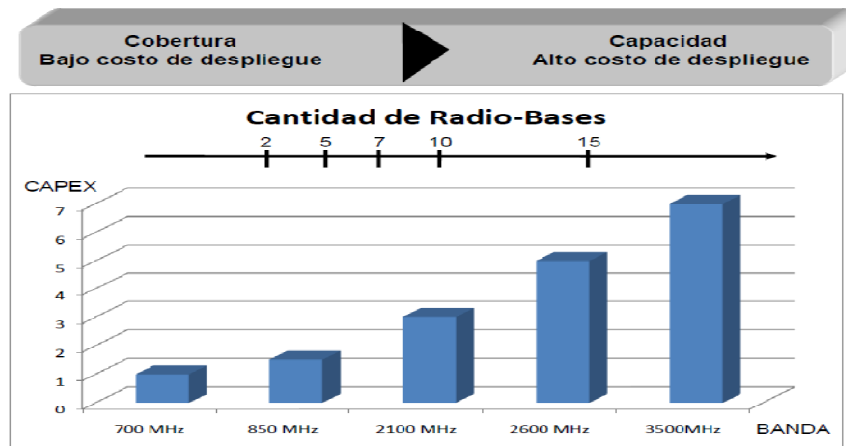


Figura 3.5. Relación del Incremento del CAPEX con la Banda de Espectro Radioeléctrico.

Como se observa en la Figura 3.5, existe un factor multiplicador del CAPEX mediante el cual se determina que entre más alta es la banda de frecuencia a utilizar mayores son los costos de despliegue.

Otros de los conceptos tenidos en cuenta en el momento de realizar la comparación de las diferentes bandas de espectro, es la reorganización (*Refarming*), que se refiere al proceso por el cual se realizan cambios básicos en las condiciones de utilización de las frecuencias, en una parte del espectro y la armonización internacional, la cual posibilita aprovechar las economías de escala.

Al pensar en la cobertura se tienen las opciones de las bandas bajas como: la banda de 450 MHz, 700 MHz u 850 MHz. Debe tenerse en cuenta que la banda de 450 MHz en un ambiente de múltiples operadores podría ofrecer asignaciones pequeñas de espectro lo cual limitaría la velocidad de transmisión de datos, sin embargo, ofrece gran cobertura en zonas rurales y remotas. La banda de 700 MHz que dejará espacio vacante a partir de la digitalización de la TV, es una de las nuevas bandas propuestas en América Latina para la expansión de la banda ancha móvil y ofrece buena cobertura y mejor capacidad de transmisión de datos con portadoras de 1.25, 5 y 10 MHz. La banda de 850 MHz, es un poco más alta que la anterior y sus portadoras son de 1.25 y 5 MHz [57], en Colombia se encuentra asignada a los operadores móviles, por lo que se podría aplicar el concepto de *refarming*, como opción a los operadores para seguir usando el espectro radioeléctrico asignado.

De igual manera, se puede aplicar el concepto de *refarming* a la banda PCS 1900, que además ofrece la opción de usar la franja central de 1910 – 1930 MHz, para el funcionamiento en el modo TDD.

Subiendo más en el espectro, se tienen las bandas AWS e IMT *Extension*, consideradas una buena opción para la expansión de la banda ancha móvil, en Latinoamérica, que se caracterizan por ofrecer la opción de cubrir zonas densamente urbanas, con altos volúmenes de tráfico. La banda AWS ofrece menor cobertura que las anteriores, pero,



ofrece mayor capacidad de transmisión de información, con portadoras de 5, 10 y 15 MHz. La banda IMT *Extensión* o banda de 2500 MHz, ofrece menor cobertura que todas las anteriores, sin embargo, ofrece una alta capacidad de transmisión de información permitiendo portadoras de 5, 10, 15 y 20 MHz. También ofrece 3 formas diferentes de disposición de frecuencias las cuales se muestran en la Tabla 3.6, donde se observan los modos FDD y TDD y su posible configuración para franjas de 1880 – 1920 MHz y 2010 – 2025 MHz. En Colombia, una porción de esta banda se encuentra asignada a un operador móvil y está en proceso de liberación.

La ITU ha reconocido que la tendencia está dirigida hacia la expansión de la banda ancha móvil haciendo el mejor uso posible del espectro radioeléctrico, razón por la cual es importante asignar una mayor capacidad de espectro a los operadores móviles [58].

Actualmente en Colombia, hay que resaltar la urgencia de la asignación de nuevas bandas, dado que los actuales operadores móviles disponen de 120 MHz para sus servicios, que resultan insuficientes para el crecimiento del tráfico de datos que se espera para los próximos años, debido a la masificación de las aplicaciones basadas en la movilidad. En la Tabla 3.7 [59] se muestran las bandas mencionadas anteriormente y su estado actual respecto a los proyectos planteados dentro del plan de CNABF- 2019 propuesto por la ANE, además, se menciona la fecha en la cual se espera lograr asignaciones en estas bandas, a partir de la iniciativa “Plan Vive Digital Colombia” [48].

Tabla 3.7. Estado Actual de las Bandas en Colombia.

BANDA	ESTADO ACTUAL EN COLOMBIA	AÑO ESPERADO PARA LA ATRIBUCIÓN SEGÚN MINTIC
450 - 470 MHz	Dentro del plan de CNABF- 2019.	No se informa.
700	Se inició el estudio del uso futuro de esta banda.	Entre 2012 y 2014 ³¹
Celular 850	Se desarrolló un documento de análisis y recomendaciones.	No Aplica.
AWS	Se inició el estudio del uso futuro de esta banda.	Inicio de la asignación de espectro a partir del 2011.
PCS 1900	Se realizó el estudio de su planificación y se analizaron las solicitudes de espectro para la misma.	Inicio de la asignación de espectro a partir del 2010.
2300 TDD	Se inició el estudio del uso futuro de esta banda.	No se informa.
IMT <i>Extensión</i>	Se desarrolló el análisis respectivo y una planificación a largo plazo del uso de esta banda.	Inicio de la asignación de espectro a partir del 2011.

³¹ Según lo informa La Comisión Nacional de Televisión, en el marco del seminario “LAS OPORTUNIDADES PARA EL DIVIDENDO DIGITAL PARA AMÉRICA LATINA” realizado en el mes de noviembre por CINTEL en la ciudad de Bogotá [59].



Cada una de las bandas descritas y comparadas anteriormente ofrece diferentes ventajas que podrían ser aprovechadas por los operadores, como la cobertura o la capacidad de transmisión, adicional a esto, el costo del despliegue de estas bandas y el *refarming*, resulta determinante en un proceso de migración y en la búsqueda de aprovechar la infraestructura instalada, dependiendo del proceso de migración que el operador considere más conveniente. A continuación se plantean diferentes estrategias y procedimientos para la migración a Pre 4G y según la estrategia se recomienda el uso de unas u otras de las bandas definidas anteriormente.

3.3 ESTRATEGIAS Y PROCEDIMIENTOS

En esta sección, se describirán las estrategias y procedimientos propuestas para los operadores en su camino hacia LTE en Colombia, bajo la premisa de aprovechar al máximo la infraestructura instalada. A partir de las tecnologías propuestas por el 3GPP en su camino de evolución, se consideran tres estrategias para la llegada a LTE, que se han denominado: gradual, moderada y agresiva. Para el despliegue de las estrategias mencionadas, se proponen las siguientes consideraciones a partir de lo analizado a lo largo de este documento:

- Cuando se presentan recomendaciones para seguir una estrategia de evolución, no siempre es posible prever cuándo realizarla, por esto, se propone que la realización de este proceso sea de manera simultánea al crecimiento del volumen de tráfico que generan los usuarios sobre la red, porque, además de la necesidad de ampliar la capacidad de espectro de cada operador, se deben implementar tecnologías que mejoren el aprovechamiento del espectro radioeléctrico que, en la actualidad, presenta una asignación muy reducida.
- Las entidades gubernamentales colombianas, deben afrontar los requerimientos relacionados con la necesidad de asignación de nuevas bandas de frecuencia. En tal sentido, algunos operadores móviles tramitan ante el MINTIC una solicitud para ampliar su ancho de banda [60], respondiendo a la necesidad de garantizar la prestación del servicio.
- Con el objetivo de conseguir que este proceso se realice de forma óptima, se deben utilizar bandas que garanticen el concepto de armonización internacional, necesario para obtener los beneficios de las economías de escala, además, emplear un grupo de bandas adecuadas para diferentes entornos (urbanos y rurales).
- El papel fundamental que juega la red de transporte, es su necesidad de adaptación permanente al incremento del tráfico de información, en consecuencia, la utilización de nuevas tecnologías debe permitir transportar altos volúmenes de información de manera eficiente en términos de costos.
- Cada estrategia es un proceso gradual en el cual se requieren grandes inversiones respecto a la implementación de nuevos aspectos técnicos y tecnológicos, además del tiempo que cada proceso necesita. En este sentido se debe tener en cuenta que la



implementación de cada paso tecnológico trae consigo un proceso relacionado con el retorno de la inversión realizada, lo que en algunos casos puede retrasar el despliegue de nuevas tecnologías.

3.3.1. Estrategia Uno: Gradual

El planteamiento de la estrategia de evolución de modo gradual, se fundamenta básicamente en el despliegue comercial sistemático, de todas las tecnologías móviles planteadas por el 3GPP en el camino de evolución hacia la tecnología LTE a partir de la tecnología HSDPA, implementada por los operadores que actualmente prestan servicios móviles en Colombia. Este proceso se muestra en la Figura 3.6.

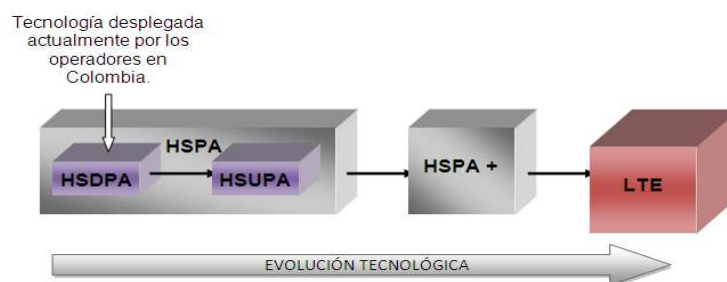


Figura 3.6. Evolución Tecnológica Gradual.

Este camino de migración se caracteriza por ser un proceso gradual, con el que se busca ofrecer a cualquier operador móvil, la posibilidad de evolucionar en función de sus necesidades. A continuación se presenta la propuesta acerca del procedimiento que se deben llevar a cabo para cumplir con la estrategia de migración.

3.3.1.1. Procedimiento

Los operadores se encuentran cerca al límite de utilización de su ancho de banda y es imperativa la ampliación de la misma. Las entidades gubernamentales que se ocupan de estos temas, tienen en su poder propuestas e informes al respecto, tal como aparece en la Tabla 3.7. De ahí se puede inferir que una liberación parcial de espectro puede darse en los próximos dos años, en bandas como: PCS 1900 (2010), AWS e IMT *Extension* (2011).

Por lo anterior, se recomienda la ampliación de espectro del operador en la banda PCS 1900, para afrontar el crecimiento del tráfico en el corto plazo, pues de esta manera se mantiene la misma banda en la que brindan servicios los operadores móviles de la actualidad, al tiempo que se garantiza que los dispositivos móviles 3G que funcionan sobre las actuales redes móviles lo seguirán haciendo sin inconvenientes durante la actualización del *software* del sistema

Así, un operador que se encuentra prestando servicios de banda ancha móvil con la tecnología HSDPA, puede continuar, dentro de su estrategia de evolución, hacia la tecnología HSUPA, estandarizada por el 3GPP en el *Release 6* [61], en la búsqueda de



beneficios tecnológicos enfocados directamente en el enlace de subida. Esta evolución es una actualización de tipo software [62], por lo que la inversión en la que se incurre es menor, si se compara con una de tipo *hardware*. Además, al desplegar la tecnología HSUPA a partir de HSDPA, se desarrolla totalmente la red HSPA, con la que, además de los beneficios obtenidos en el enlace de bajada, mencionados en el anexo C, se obtienen progresos en el enlace de subida [61], beneficiando finalmente la experiencia de los usuarios en la red. Los progresos mencionados pueden ser analizados a partir de la Tabla 2.3 y la Figura 2.7, mostradas en el capítulo anterior.

Cuando un operador móvil toma la decisión de actualizar su red hacia la tecnología HSPA, debe considerar que este proceso ya fue realizado sobre 372 redes ubicadas en 149 países de todo el mundo, además de 129 redes, en proceso de implementación [63]. Así, al desplegar HSPA sobre la banda PCS 1900, se obtienen grandes beneficios a partir de las economías de escala.

El siguiente paso en la evolución, está dirigido hacia el despliegue de la tecnología HSPA+, estandarizada por el 3GPP a partir del *Release 7*, con el que un operador móvil puede prolongar la utilización de su red HSPA [61], maximizando sus activos de infraestructura de red existentes, con la implementación de algunas técnicas desarrolladas para la tecnología LTE. Es el caso de MIMO y las modulaciones de orden superior, factores que acercan tecnológicamente a HSPA+ hacia LTE [62].

HSPA+ ofrece mejores velocidades de transmisión de datos y eficiencia espectral (tanto en el enlace de bajada como en el de subida), como se muestra en la Figura 2.14 y en la Figura 2.15 respectivamente, además, HSPA+ disminuye la latencia del sistema como se muestra en la Figura 2.13.

La implementación de esta nueva tecnología puede ser desarrollada siguiendo diferentes alternativas, esto debido a que cada *Release* propuesto por el 3GPP ofrece nuevas mejoras a partir de la implementación de diferentes técnicas y la combinación de estas. Cada uno de los casos se muestra en la Figura 3.7 [64].

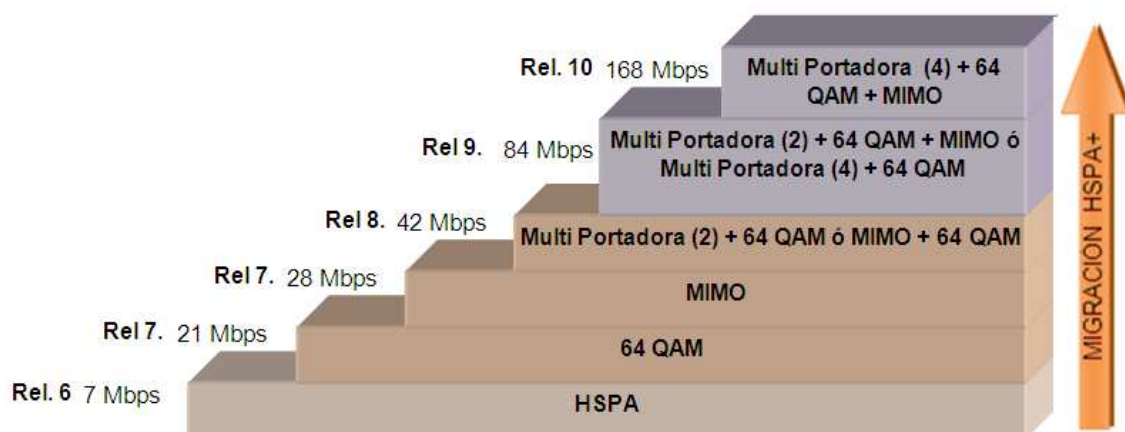


Figura 3.7. Pasos de Actualización para HSPA+.



De esta manera, las implicaciones tecnológicas que un operador debe afrontar para la actualización de HSPA+, se realiza de dos formas, *software* y *hardware*. Considerando la naturaleza de esta estrategia, se recomienda realizar inicialmente modificaciones de software hasta donde la evolución lo permita, y finalizar con implementaciones de tipo hardware, con lo que se desarrolla una tecnología con características similares a un despliegue LTE, como se menciona anteriormente. Actualmente, si un operador móvil toma la decisión de actualizar su red para evolucionar hacia HSPA+, tiene la certeza de que existen 97 redes de este tipo operando en 52 países, además de 62 redes, en proceso de implementación [63].

Respecto a las implicaciones de espectro radioeléctrico para el despliegue de HSPA+, se considera que estas están ligadas al crecimiento de la demanda de servicios y al impacto que esto genera sobre el ancho de banda que se necesita, por esto, se recomienda trabajar en la banda PCS 1900 hasta donde su capacidad lo permita, esperando que las entidades gubernamentales realicen la asignación de nuevas porciones de espectro en bandas como AWS e IMT *Extension* (2011), recomendando optar por una banda donde posiblemente también pueda ser desplegada LTE en el futuro.

Finalmente, esta estrategia de migración, propone como siguiente paso en el camino evolutivo, la tecnología LTE, teniendo en cuenta que esta estrategia es la más extensa de las tres propuestas, porque antes de lanzar una red LTE, existe el lanzamiento de la red HSDPA seguido de una actualización hacia HSUPA y HSPA+. Por el tiempo que esto toma, se espera encontrar economías de escala, lo que reduciría significativamente los costos de la infraestructura de red y UEs ante un eventual despliegue de LTE.

En este punto de la estrategia o en el de cualquier otra que involucre el despliegue de redes anteriores a LTE, la implementación de esta tecnología, se puede realizar aprovechando al máximo la infraestructura instalada. Con este propósito, los aspectos relacionados con la reutilización se mencionan en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Aspectos Reutilizables en el Despliegue de LTE.

ASPECTO	DESCRIPCIÓN
Obra Civil	Estudio de suelos, bases para torres, cuartos para equipos y grupos electrógenos, cerramientos y remodelaciones [65].
Torre	Montaje [65].
Radio Base	Aire acondicionado, banco de baterías, Unidad de Radio Remota (RRU, <i>Remote Radio Unit</i>) y Unidad de Banda Base (BBU, <i>Base Band Unit</i>) [66].
Red de Transporte	Medios de transmisión



Respecto a las torres y la obra civil que debe ser realizada, estos son considerados reutilizables para ir hacia LTE, teniendo en cuenta que si la banda sobre la que va a operar el nuevo sistema cambia, el porcentaje de reutilización de esta infraestructura puede disminuir.

Dentro de la Radio Base, se considera que el aire acondicionado y el banco de baterías son reutilizables para este proceso, mientras que para la RRU y BBU, se pueden seguir procesos de actualización estableciendo un proceso dirigido hacia la implementación de una Única Red de Acceso Radio (*Single RAN*), con el objetivo de reducir el impacto de aspectos como el incremento en los costos, la dificultad en la gestión y complejidad de la red, entre otros. Este proceso se muestra en la Figura 3.8 [47].

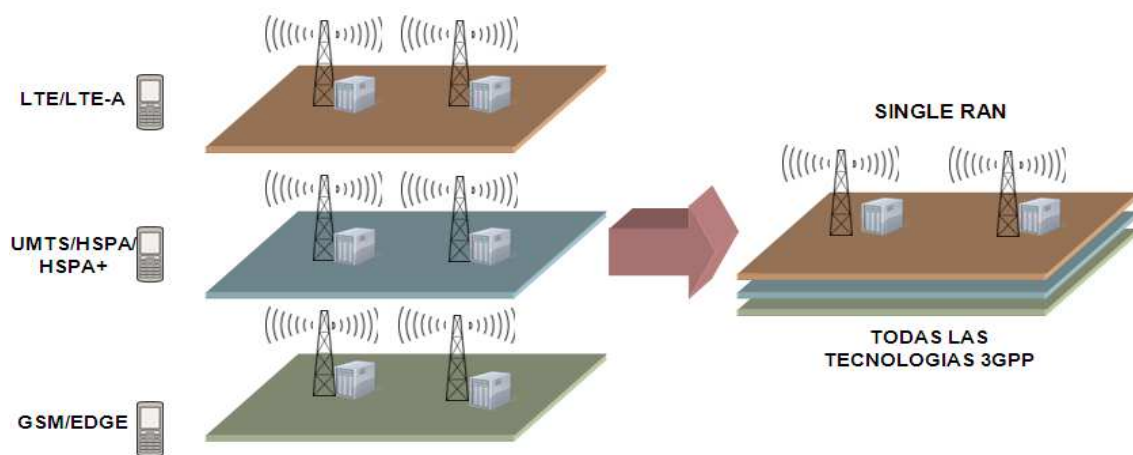


Figura 3.8. Evolución hacia *Single RAN*.

Para la implementación de la *Single RAN*, se sugiere la actualización de las unidades que componen la Estación Base, hasta donde sea posible, teniendo en cuenta que los fabricantes presentan una visión de esta actualización destacando lo siguiente:

En la primera etapa de esta estrategia de migración, luego de desarrollar la red HSPA, se plantea ir hacia HSPA+, para lo que se debe realizar una actualización de *software* en los equipos RRU y BBU como se muestra en la Figura 3.9. Luego, para migrar desde HSPA+ hacia LTE en la misma banda de frecuencia, se debe hacer una actualización del *software*, mientras que si se utiliza otra banda de frecuencia, se debe cambiar el equipo agregando un nueva RRU para LTE.

De esta manera se quiere dar a entender como son los procesos de migración a nivel de dispositivos, buscando aprovechar al máximo la infraestructura instalada, teniendo en cuenta que cada fabricante ofrece sus propias soluciones enfocadas en *Single RAN*, por ejemplo, Ericsson plantea su estación base RBS 6000, Huawei DBS 3900, Alcatel-Lucent MultiStandard 9100, Nokia Siemens Networks Flexi Multiradio BTS, entre otras.

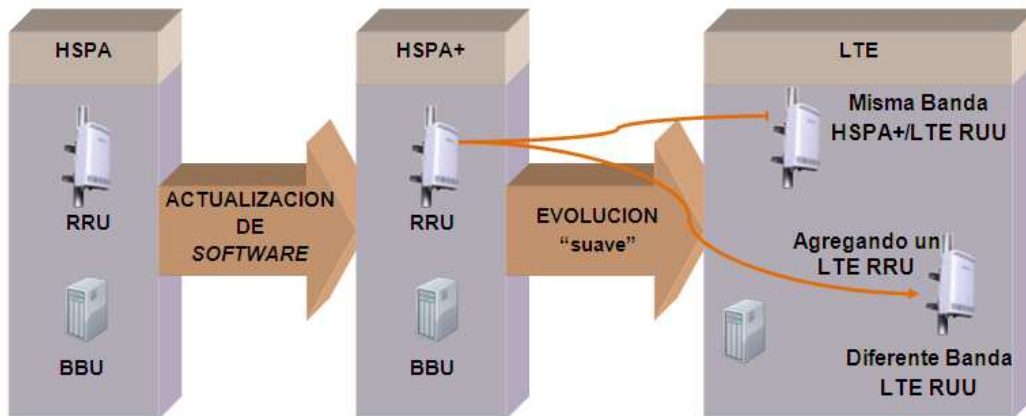


Figura 3.9. Proceso de Migración de un Nodo B hacia LTE.

Por otra parte, respecto al desafío que debe afrontar un operador en su red de transporte, se recomienda seguir el desarrollo propuesto en la sección 2.3.10, considerando que esta red debe ser actualizada con el crecimiento del tráfico.

Se recomienda realizar el despliegue de LTE, en zonas urbanas con alta densidad de usuarios, utilizando bandas como *IMT Extension* o *AWS*, considerando además, la oportunidad que puede existir en la banda de 2300 MHz³² ya que en la actualidad existen 3 redes planeadas en India y Rusia [63].

Para utilizar la banda *IMT Extension*, se recomienda la disposición de frecuencias C1 con el propósito de promover la neutralidad tecnológica. Se utiliza una asignación par dúplex en frecuencia, obteniendo 140 MHz para el modo FDD y 50 MHz para TDD. Los beneficios de esta banda, mencionados en la sección 3.2.1.2, se reflejan en el hecho de que 7 de las 10 redes en operación en el mundo, lo hacen sobre esta banda, lo que ofrece una economía de escala, impulsada por países como: Suecia, Uzbekistán, Noruega, Hong Kong y Australia [63].

Por lo anteriormente analizado, se recomiendan lo siguiente:

1. En bandas donde existen canales disponibles de 5 MHz, es mejor continuar usando la tecnología HSPA+, debido a que es una tecnología madura y ya existen UEs disponibles, como se muestra en la Figura 3.7, además, a partir del 2011 estarán disponibles UEs que soporten velocidades de transmisión de datos pico de 42 Mbps. Mientras que LTE sobre canales de 5 MHz, alcanza una velocidad de transmisión pico de 42.5 Mbps [68].
2. En bandas donde existen canales disponibles de 10 MHz, cualquiera de las tecnologías es recomendable (LTE, HSPA+ con multi portadora), esto gracias a

³² Según Ying Weimin, Presidente de Redes LTE de Huawei, afirma que LTE TDD ya es una tecnología madura, estable y de confianza para un despliegue a gran escala, luego de obtener un contrato con el principal operador de banda ancha móvil de Polonia. Gracias a la relación entre estas dos compañías, se han conseguido grandes avances en la plataforma unificada de LTE FDD y TDD de Huawei [67].



que HSPA+ soporta 84 Mbps (como se muestra en la Figura 3.7), mientras que LTE soporta 85.7 Mbps [68], considerando que los UEs HSPA+ estarán disponibles a partir del 2012, mientras que la infraestructura y los UEs de LTE ya existen [64].

3. En bandas donde existen canales disponibles de más de 10 MHz, es mejor utilizar LTE, ya que la infraestructura y los UEs que utilizan estos anchos de banda ya existen y ofrecen velocidades de transmisión de datos pico de 172.1 Mbps [68], utilizando portadoras de 20 MHz, mientras que los UEs de tecnología HSPA+ con multi portadora(4), que ofrecen velocidades de transmisión de datos de 168 Mbps se encuentran en estandarización y se espera estén disponibles después de 2012, fecha en la cual se espera estén disponibles terminales LTE con MIMO 4x4 [64] los cuales ofrecen velocidades de transmisión de datos de 325.1 Mbps [68].

En Colombia cualquiera de las anteriores opciones puede ser desarrollada, teniendo en cuenta que se debe esperar el plan del gobierno respecto a la atribución de nuevas bandas de espectro radioeléctrico para los servicios móviles terrestres. Luego de plantear las anteriores opciones, se presenta una estrategia para el desarrollo de LTE (voz y datos), analizada en la sección 3.3.4.

3.3.2. Estrategia Dos: Moderada

El planteamiento de la estrategia de evolución moderada, se fundamenta en el despliegue comercial de algunas de las tecnologías móviles planteadas por el 3GPP en el camino de evolución hacia la tecnología LTE a partir de la tecnología HSDPA, bajo la premisa de aprovechar al máximo la infraestructura instalada, considerando los procesos evolutivos que se han desarrollado en algunos mercados internacionales, donde se ha considerado que algunas tecnologías intermedias entre HSDPA y LTE, no son una solución viable para el crecimiento exponencial del tráfico de datos que se experimentará en los próximos años [47]. El camino de migración propuesto a través de esta estrategia de evolución se muestra en la Figura 3.10.

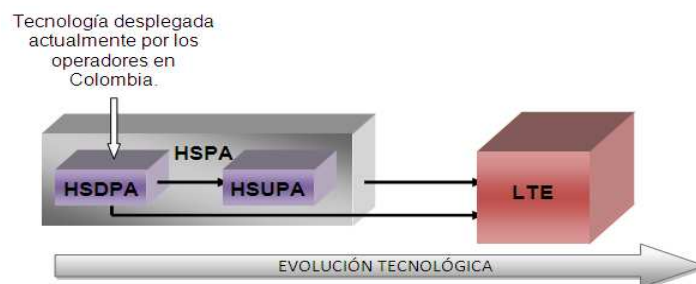


Figura 3.10. Evolución Tecnológica Moderada.

De esta manera, este proceso es un poco más corto que el anterior, considerando que antes de lanzar una red LTE, existe la actualización de una red HSDPA hacia HSUPA.



3.3.2.1. **Procedimiento**

De igual manera que en la estrategia gradual, se considera el hecho que los operadores se encuentran operando cerca al límite de su ancho de banda, por lo que se recomienda que la forma de afrontar el crecimiento del tráfico en el corto plazo es ampliando la capacidad de la banda PCS 1900, debido a que se mantiene la misma banda en la que brindan servicios cualquier operador móvil de la actualidad, garantizando que los dispositivos móviles 3G sigan operando sin inconvenientes.

Así, un operador que se encuentra prestando servicios de banda ancha móvil con la tecnología HSDPA, puede continuar con su estrategia de evolución tecnológica hacia la tecnología HSUPA, como se trato en la estrategia anterior. El siguiente paso en el camino evolutivo, es migrar hacia LTE a partir de la tecnología HSPA o si se quiere desde HSDPA, teniendo en cuenta que para cualquiera de las dos tecnologías se tienen las mismas consideraciones ya que una es actualización de la otra (solo en el enlace de subida).

En este proceso se recomienda además del uso de la banda IMT *Extension*, por las características mencionadas anteriormente, la banda AWS, partiendo del hecho que esta estrategia al igual que la anterior, es un proceso que toma tiempo en su desarrollo, por las tecnologías que involucra antes de llegar a LTE, tiempo que servirá para que la banda propuesta, logre una maduración en el concepto de armonización internacional, es decir, que esta adquiera una mayor aceptación a nivel mundial ofreciendo economías de escala, lo cual es esperado, ya que en la actualidad, en Estados Unidos ya existe una red LTE operando sobre esta banda, mientras que dos más, entrarán en funcionamiento a partir del 2011. Por su parte, en Canadá existen 2 redes, una en etapa de prueba mientras que la otra se encuentra en desarrollo y se espera desplegar en el año 2011 [63]. Con esta información se espera que exista una economía de escala en estas bandas.

Cuando un operador decide ir hacia LTE, se recomienda que el despliegue se realice de forma gradual con el objetivo de aprovechar al máximo la infraestructura instalada. El despliegue se recomienda realizarlo primero en zonas densamente urbanas, mientras tecnologías antecesoras siguen cubriendo zonas urbanas y rurales, brindando así la oportunidad de extender la vida útil de este tipo de redes, y más aún cuando se espera que este tipo de tecnologías sigan creciendo hasta 2015, como se mencionó en la Figura 2.16. De esta manera, iniciar un proceso donde la cobertura de LTE se incremente de la mano de las opciones de ampliar el ancho de banda en bandas bajas como se mencionó anteriormente, entendiendo que operadores que prestan servicios sobre la banda Celular 850, pueden aplicar el concepto de *refarming* para desplegar LTE sin la necesidad de nuevas bandas de espectro.

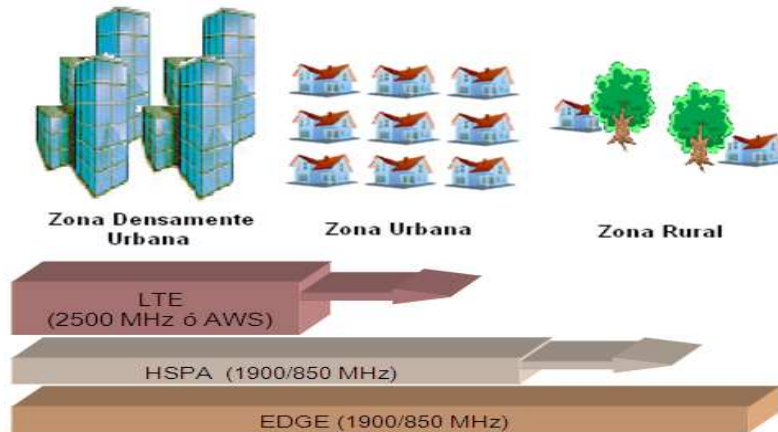


Figura 3.11. Despliegue Moderado.

La banda de 700 MHz es recomendada como una buena opción para el despliegue de LTE. Su atribución a los servicios móviles terrestres en Colombia se debe a la transición de la televisión analógica a digital [59], y en la actualidad se espera que en 2011 entren en funcionamiento 4 redes LTE sobre esta banda a nivel mundial.

Este despliegue, es recomendado con la utilización de la disposición de frecuencias de Asia-Pacífico FDD, ya que esta ofrece un mejor aprovechamiento del espectro radioeléctrico, frente a la disposición adoptada por Estados Unidos, ya que esta última limita el número de portadoras, tiene problemas de filtros y tiene problemas con las economías de escala [53]. En Colombia, la liberación de esta banda está regida por el plan de migración propuesto por el MINTIC, el cual se presenta en el anexo I.

Luego de plantear las posibles bandas de espectro radioeléctrico donde podría operar LTE, se presenta una estrategia para el desarrollo de LTE (voz y datos), analizada en la sección 3.3.4.

3.3.3. Estrategia Tres: Agresiva

El planteamiento de la estrategia agresiva, se fundamenta en el despliegue comercial de la tecnología LTE, considerando que no existe algún tipo de despliegue de tecnologías antecesoras, como se muestra en la Figura 3.12.

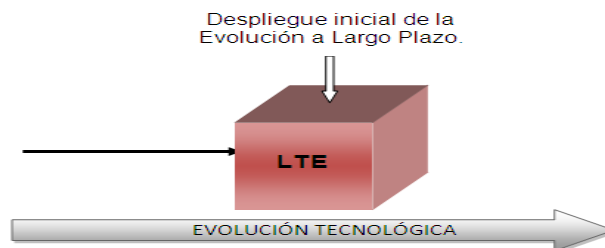


Figura 3.12. Evolución Tecnológica Agresiva.



LTE es una tecnología emergente que en la actualidad cuenta con el despliegue de 10 redes operando en 8 países del mundo, con la expectativa de implementar 208 redes más [63]. Un estudio realizado a un amplio grupo de empresas relacionadas con el desarrollo de LTE a nivel mundial [69], permite concluir que esta tecnología enfrenta una variedad de desafíos de tipo tecnológico, regulatorio y de mercado, que deben ser solventados para iniciar la masificación de la tecnología. Dentro de los desafíos que se deben solucionar, específicamente, sobresalen los siguientes:

- Espectro Radioeléctrico.
- Red de Transporte.
- Demanda tecnológica.

A partir de estos aspectos se plantea el procedimiento que se debe seguir en la estrategia de evolución propuesta.

3.3.3.1. Procedimiento

En relación con el espectro radioeléctrico, un operador móvil debe buscar la asignación de nuevas bandas por parte de las entidades gubernamentales. Se recomienda el despliegue de la red LTE sobre la banda IMT *Extension*, teniendo en cuenta que además de la asignación de una parte de esta banda a la compañía UNE, se realizarán nuevas asignaciones a partir del 2011, como se menciona en la Tabla 3.7.

Por otra parte, es claro que además de conseguir la atribución de espectro en bandas de alta frecuencia que ofrecen buena capacidad, se debe pensar en aquellas que ofrezcan una buena cobertura, como lo son las bandas bajas, con el objetivo de llevar la banda ancha móvil a las regiones menos pobladas. Por lo tanto, se deben considerar las bandas de 450 MHz, 700 MHz y 850MHz, de las cuales, según los proyectos de atribución de las entidades gubernamentales, la primera se encuentra en proceso de estudio, la segunda será atribuida a los servicios móviles terrestres a partir del 2012, mientras que para la tercera, al encontrarse asignada en su totalidad, realizaron un estudio de re-asignación (mencionado en la Tabla 3.7), y su aplicación, puede extenderse por algún tiempo más. Por esto, se recomienda plantear a las entidades gubernamentales la opción de ampliar la capacidad de la banda celular 850, según el trabajo de especificación en curso del 3GPP [70], sobre el cual se plantea pasar de las franjas 824 – 849 MHz y 869 – 894 MHz a las franjas 814 – 849 MHz y 859 – 894 MHz.

De esta manera se recomiendan las siguientes etapas:

- En el corto plazo, un operador móvil puede iniciar el despliegue de su red sobre la banda de 2500 MHz, entendiendo que inicialmente puede cubrir zonas urbanas prestando servicios sobre canales de 20 MHz, lo que sería un gran atractivo para



usuarios de redes como HSDPA o anteriores, ya que se ofrecen servicios de LTE al máximo potencial del sistema³³.

- En el mediano y largo plazo, es mucho más factible acceder a la utilización de bandas bajas como las mencionadas anteriormente, ya que en bandas como la de 700 MHz, se espera proporcionar las primeras asignaciones a partir del 2012, mientras en la banda de 450 su atribución ya está en estudio.

El proceso para la utilización de bandas de frecuencia se muestra en la Figura 3.13.



Figura 3.13. Despliegue Agresivo.

Cabe destacar que en la banda de 450 MHz, existen en la actualidad 6 redes que se encuentran solicitando el permiso para desplegar redes LTE [63], mientras que en la banda de 700 MHz, existen 6 redes en Estados Unidos, de las que se espera entren en funcionamiento 4, a partir del 2011 [63]. Con esta información se espera que exista una economía de escala en estas bandas.

Luego de plantear las posibles bandas de espectro radioeléctrico donde podría operar LTE, se plantea una estrategia para el desarrollo de LTE, analizada en la sección 3.3.4.

Junto a lo anterior, aparecen dos factores que afectan a los operadores desde el inicio, el primero está relacionado con la red de transporte, debido a la limitación que empieza a evidenciarse con el crecimiento del tráfico actual de las redes. El segundo trata de la demanda que existe al momento de desplegar esta tecnología, analizando si un usuario está dispuesto a pagar un precio mayor por recibir nuevos servicios de banda ancha móvil.

A partir del desarrollo planteado en la sección 2.3.10, se recomienda, para esta estrategia, desplegar una red de transporte, basada completamente en la tecnología Metro Ethernet

³³ Según un estudio realizado por Alcatel-Lucent, en mercados con madurez tecnológica, la mayoría de los usuarios de servicios de banda ancha móvil, cambiarían su proveedor de servicios actual, para afiliarse a uno que ofrezca servicios LTE [71].



[37], y de esta manera desarrollar una red de transporte preparada para el soporte de LTE.

Los operadores móviles deben ser cuidadosos en prever la demanda que puede existir sobre una red LTE en un mercado donde se despliega por primera vez, aunque existen estudios como el realizado por Alcatel-Lucent, mencionado anteriormente en esta sección, a partir del cual, se concluye que la calidad de los servicios ofrecidos por las redes LTE, es un factor determinante para su masificación.

3.3.4. Estrategia para el Desarrollo de LTE

Luego de definir las estrategias y los procedimientos para la migración hacia LTE, se debe tener en cuenta la forma en la que se desarrollará su despliegue, ya que a pesar de que para muchos de los operadores en este momento el soporte de la voz sobre LTE no es de vital importancia [69], si debe ser considerado debido a que actualmente los operadores obtienen mayores ingresos a partir del tráfico de voz y SMS, lo que hace necesario tener un esquema viable y estándar para proporcionar estos servicios y proteger sus ingresos.

El sistema de voz sobre LTE se concibió como resultado de la iniciativa por parte de los operadores que propusieron un sistema normalizado para la transferencia de tráfico de voz sobre LTE. Originalmente LTE fue visto como un sistema celular completamente IP sólo para el transporte de datos, y los operadores podrían transportar voz, ya sea volviendo a las 2G / 3G o usando sistemas de VoIP. Sin embargo, debe transcurrir un periodo de tiempo para lograr una completa oferta de VoIP en LTE. Con algunos operadores empezando a desplegar LTE en el 2010, es necesario que una solución de voz esté disponible a corto plazo.

Al examinar las opciones de llevar voz sobre LTE, surgen 3 posibles soluciones, las cuales se presentan a continuación:

- VoLGA, voz sobre LTE a través de la Red de Acceso Genérico (GAN, *Generic Access Network*).
- Conmutación de Circuitos Fall Back (CSFB, *Circuit Switched Fall Back*).
- VoLTE, Voz sobre LTE, iniciativa “*One Voice*”.

El objetivo de los operadores es implementar una arquitectura IMS para brindar voz sobre LTE [72] (VoLTE), pero existen dos soluciones intermedias para operadores que desean implementar LTE sin invertir inicialmente en IMS (VoLGA y CSFB)³⁴, como se muestra en la Figura 3.14 [73].

³⁴ Actualmente existe un desafío que debe enfrentar la industria, relacionado con los riesgos que se corren al no definir una solución tecnológica común, ya que esto se puede ver reflejado en una mala experiencia para los usuarios y una pérdida en las economías de escala.

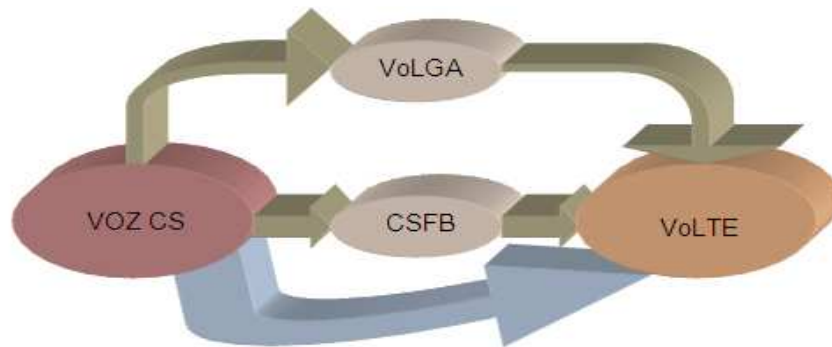


Figura 3.14. Alternativas para el Desarrollo de Voz sobre LTE.

El primero se conoce como CSFB (*Circuit Switched Fall Back*): definido por el 3GPP en el *Release 8*. Su descripción general se encuentra desarrollada en la especificación TS 23.272. El proceso para dar soporte al servicio de voz, inicia cuando un usuario necesita establecer una llamada de voz, lo que “lleva” a un dispositivo LTE a conectarse a alguna de sus redes antecesoras, cuando esto se logra, se establece la llamada de voz. Al término de la llamada, el dispositivo se registra nuevamente en la red LTE.

El segundo se conoce como VoLGA (*Voice over LTE via Generic Access*): definido por el VoLGA FORUM [74], compuesto por líderes de la industria inalámbrica³⁵. Su objetivo es permitir la entrega de voz y servicios de mensajería sobre LTE a los operadores móviles que accedan a redes basadas en la existente Red de Acceso Genérica estándar de 3GPP (GAN). El proceso para dar soporte al servicio de voz, se basa en la entrega de la información sobre paquetes IP sobre radio portadores LTE.

El tercero se conoce como VoLTE (*Voice over LTE*) [75]: esta especificación técnica definida por el 3GPP se basa en IMS y permite ofrecer servicio simultáneamente a redes de banda ancha fija y a redes LTE. La adopción de este enfoque le permitirá integrarse en el conjunto de aplicaciones que estarán disponibles en LTE.

VoLTE cuenta con la iniciativa “*One Voice*”, desarrollada por más de 40 operadores, incluyendo: AT&T, Verizon Wireless, Nokia y Alcatel-Lucent y en el GSMA *Mobile World Congress 2010*, GSMA anunció que estaban apoyando la solución de “*One Voice*” para ofrecer voz sobre LTE

Con el avance en el trabajo de VoLTE, se debe asegurar que es posible implementarlo de tal manera que los despliegues existentes no sean afectados drásticamente. Con los actuales despliegues comerciales de LTE, este será un reto considerable.

De esta manera, con el desarrollo de este capítulo se identificaron las posibles alternativas de espectro radioeléctrico y se propusieron estrategias y procedimientos para la migración a Pre 4G por parte de los operadores móviles colombianos con la tecnología LTE, con lo que se da cumplimiento al objetivo general de este trabajo de grado.

³⁵ Las empresas que lo componen son: Alcatel-Lucent, Ditech, GENBAND, hTC, HUAWEI, Kineto, LG, Mavenir, MOTOROLA, SAMSUNG, Sonus, SPA, STARENT, Tecore, T, Ulticom, Vitendo, Wichorus, ZTE [74].



4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este capítulo se centra en la descripción de las conclusiones y las recomendaciones a partir de lo desarrollado en este trabajo de grado, a fin de brindar continuidad a los estudios enfocados en las nuevas tecnologías de telefonía móvil y a los futuros procesos de migración que se desarrollaran en el país.

4.1 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos y los análisis realizados en el presente trabajo permiten plantear las siguientes conclusiones:

- La evolución natural de los actuales sistemas de telecomunicaciones móviles para afrontar la demanda de la sociedad de la información es LTE, tanto para los usuarios finales como para los fabricantes y proveedores de tecnología, operadores de telecomunicaciones y empresas del sector.
- Un operador debe tener la combinación adecuada de las bandas de frecuencia distribuyendo su ancho de banda en una banda baja y una banda alta, gracias a que el gobierno ha planteado la re-distribución de la banda baja y la atribución de nuevo espectro en la banda alta como una forma de afrontar el crecimiento del tráfico en el corto plazo.
- Para el operador con infraestructura existente, el despliegue de LTE debe ser un proceso gradual. En este sentido se debe tener en cuenta que la implementación de cada paso tecnológico trae consigo un proceso relacionado con el aprovechamiento de la infraestructura instalada y con el retorno de la inversión realizada, lo que en algunos casos puede demorar el despliegue de nuevas tecnologías.
- A mediano y largo plazo, es más factible acceder a la utilización de bandas bajas, puesto que en bandas como la de 700 MHz, se espera proporcionar las primeras asignaciones a partir del 2012; la atribución de la banda de 450 MHz se encuentra en estudio por parte del gobierno.
- La liberación de la banda de 700 MHz, por sus características de propagación y reducción de costos de inversión respecto a bandas superiores, podrá ayudar a la universalización de la banda ancha. Esto dará cabida a que la futura implementación de LTE entre de lleno con mayores alternativas de bandas y utilizando el espectro radioeléctrico con más eficiencia.
- Es necesario tratar el tema de asignación de nuevas bandas de frecuencia por parte de las entidades gubernamentales, con la participación de los diferentes



actores para que lo que determine quede definido de la forma más conveniente posible.

4.2 RECOMENDACIONES

- Es importante que las entidades gubernamentales colombianas, afronten los requerimientos relacionados con la necesidad de asignación de nuevas bandas de frecuencia, para estimular el crecimiento de la banda ancha móvil en el país.
- La Universidad debe crear y mantener un vínculo permanente con las empresas del sector de las telecomunicaciones y entes regulatorios de Colombia, con el objetivo de permitir al estudiantado acceder a información relevante, y así poder participar en consultorías de telecomunicaciones para involucrar al gremio educativo en los cambios y decisiones que se tomen a nivel nacional.
- El Gobierno Nacional debe facilitar el ingreso de tecnologías que involucren economías de escala para obtener beneficios económicos y sociales para el país, teniendo en cuenta la armonización internacional para la adopción del espectro radioeléctrico y las bandas de operación, promoviendo la interoperabilidad global y generar el desarrollo tecnológico en Colombia.
- En el desarrollo de las telecomunicaciones no se puede tener seguridad sobre quien tienen la última palabra porque la tecnología cambia vertiginosamente. De aquí la importancia de realizar estudios sobre tecnologías de punta y mantenerlos actualizados, de forma que permitan complementar la formación de ingenieros en la Facultad y crearles un criterio propio para adoptar decisiones acertadas en el campo laboral, por este motivo, si se lleva hasta Pre 4G quede abierta la siguiente fase para llegar a 4G cuando las especificaciones ya puedan ser consultadas.



REFERENCIAS

- [1] “Informe del Congreso Internacional de Telecomunicaciones”, ACIEM. [En línea]. Disponible en: <http://www.aciem.org/bancoconocimiento/B/BoletinPDF/BOLETIN%20INFORMATIVO%20CONGRESO%20DE%20TELECOMUNICACIONES%202009.pdf> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [2] S. Cabello, (2010, Mayo) “Gestión del Espectro – Demanda y el Debate sobre sus usos Alternativos”, DIRSI [En línea]. Disponible en: <http://www.slideshare.net/dirsi/100513-cabello> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [3] (2010) “Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias”, MINTIC. [En línea]. Disponible en: <http://www.mintic.gov.co/mincom/documents/portal/documents/root/espectro%20radio%20electrico/CuadroNacionalAtribucionBandasdeFrecuencias2010.pdf> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [4] Sitio web de la Agencia Nacional de Espectro, Disponible en: <http://www.ane.gov.co/> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [5] (2010, Marzo) “Plan de Acción 2010”, ANE [En línea]. Disponible en: [http://www.ane.gov.co/apc-aa-files/31663137343035333435343330306137/Plan de accion 2010 V5.pdf](http://www.ane.gov.co/apc-aa-files/31663137343035333435343330306137/Plan%20de%20accion%202010%20V5.pdf) [Última consulta: Marzo de 2011].
- [6] InteractTIC, (2010) “9 de junio, subasta para otorgar permiso en la banda ancha móvil de 2,5 GHz”, intecTIC [En línea]. Disponible en: http://www.interactic.com.co/index.php?option=com_content&view=article&id=1554:9-de-junio-subasta-para-otorgar-permiso-en-la-banda-ancha-movil-de-25-ghz&catid=11:primer-plano&Itemid=40 [Última consulta: Marzo de 2011].
- [7] Sitio web del Sistema de Información Unificado del Sector de las Telecomunicaciones (SIUST), Disponible en: <http://www.siust.gov.co/> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [8] (2010, Junio) “Número de abonados – Servicio móvil”, SIUST [En línea]. Disponible en: http://www.siust.gov.co/siust/doc_xml/TablaCharts.jsp?con=estaticos/99_200.xml [Última consulta: Marzo de 2011].



- [9] (2010, Marzo) “Proyecciones Nacionales y Departamentales de Población 2005 – 2020” Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) [En línea]. Disponible en: http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06_20/7Proyecciones_poblacion.pdf [Última consulta: Marzo de 2011].
- [10] (2010, Junio) “Abonados por forma de pago”, SIUST [En línea]. Disponible en: http://www.siust.gov.co/siust/doc_xml/TablaCharts.jsp?con=estaticos/147_5.xml [Última consulta: Septiembre de 2011].
- [11] (2010, Junio) “Tráfico total – Telefonía móvil”, SIUST [En línea]. Disponible en: http://www.siust.gov.co/siust/doc_xml/TablaCharts.jsp?con=estaticos/38_147.xml [Última consulta: Marzo de 2011].
- [12] (2010, Junio) “Mensajería”, SIUST [En línea]. Disponible en: http://www.siust.gov.co/siust/doc_xml/TablaCharts.jsp?con=estaticos/333_2.xml [Última consulta: Marzo de 2011].
- [13] (2010, Febrero) “El Nuevo Escenario Digital Multiplica Las Oportunidades de Crecimiento de un Sector en Transformación” Movistar [En línea]. Disponible en: <http://www.movistar.com.pa/publico/nota1-10.jsp> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [14] (2010, Junio) “Ingresos Promedio por Suscriptor”, SIUST [En línea]. Disponible en: http://www.siust.gov.co/siust/doc_xml/TablaCharts.jsp?con=estaticos/104_21.xml [Última consulta: Marzo de 2011].
- [15] (2008, Agosto) “Overview of 3GPP Release 8” (Release 8 Version 0.0.1), 3GPP [En línea]. Disponible en: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases/Previous_versions/ [Última consulta: Marzo de 2011].
- [16] Comunidad Ola | Tigo, (2010, Junio) “UNE EPM se adjudicó la licencia en 2,5 GHz. ¿Mantendrá su participación en Tigo?” Comunidad Ola | Tigo [En línea]. Disponible en: http://www.comunidad-ola.com/portal/index.php?option=com_content&task=view&id=4919&Itemid=813 [Última consulta: Marzo de 2011].
- [17] (2010, Junio) “UNE EPM Gana Subasta por 80 Mil Millones Para la Banda de 2.5” MINTIC [En línea]. Disponible en: <http://www.mintic.gov.co/mincom/faces/index.jsp?id=14774> [Última consulta: Marzo de 2010].
- [18] M. Romero; Tesis profesional “Diseño de una Red HSDPA para la Ciudad de Arequipa”; Pontificia Universidad Católica del Perú; Lima, Perú; 2009.



- [19] "LTE", 3GPP. [En línea]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/article/lte> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [20] T. Zemen, (2008, abril) "OFDMA/SC-FDMA Basics for 3GPP LTE (E-UTRA)", Forschungszentrum Telekommunikation Wien (ftw), [En línea]. pp 4-17, Disponible en: http://www.nt.tuwien.ac.at/fileadmin/users/wkarner/OFDMA_SCFDMA.pdf [Última consulta: Marzo de 2011].
- [21] (2009, Febrero) "The Mobile Broadband Evolution: 3GPP Release 8 and beyond HSPA+, SAE/LTE and LTE-Advanced", 3G Américas [en línea]. Disponible en: http://www.4gamericas.org/documents/3GPP_Rel-8_Beyond_02_12_09.pdf [Última consulta: Marzo de 2011].
- [22] 3GPP TS 36.300, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN)" (Release 8 versión 8.11.0).
- [23] H. Holma, A. Toskala; "LTE for UMTS"; Editorial John Wiley & Sons, Ltd. 2009.
- [24] G. Fritze, (2008, Abril) "SAE - The Core Network for LTE", Ericsson, [En línea]. pp 15-33, Disponible en: http://www.3g4g.co.uk/Lte/SAE_Pres_0804_Ericsson.pdf [Última consulta: Marzo de 2011].
- [25] V. Torres, F. Esparza, F. Falcone, (2009, Septiembre) "Análisis del Comportamiento de Esquemas de Modulación Adaptativos en LTE", Universidad Pública de Navarra [En línea]. Disponible en: <http://www.csm.unavarra.es/Publicaciones/Images/Pub587.pdf> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [26] H. Holma, A. Toskala; "WCDMA for UMTS"; Editorial John Wiley & Sons, Ltd. 2004.
- [27] F. Khan; "LTE for 4G Mobile Broadband"; Universidad de Cambridge. 2009.
- [28] 3GPP TS 25.212, "Multiplexing and channel coding" (Release 5 Versión 5.10.0)
- [29] "EDGE, HSPA and LTE Broadband Innovation", 3G AMERICAS. [En línea]. Disponible en: http://www.rysavy.com/Articles/2008_09_Broadband_Innovation.pdf [Última consulta: Marzo de 2011].
- [30] 3GPP TR 25.814, "Physical layer aspects for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA)" (Release 7 Versión 7.1.0).



- [31] 3GPP TS 25.912, “Feasibility study for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN)” (Release 8 Versión 8.0.0).
- [32] “HSPA to LTE- Advanced: 3GPP Broadband Evolution to IMT–Advanced (4G)”, 3G AMERICAS. [En línea]. Disponible en: http://www.3gamericas.org/documents/3G_Americas_RysavyResearch_HSPA-LTE_Advanced_Sept2009.pdf [Última consulta: Marzo de 2011].
- [33] Sitio web de la firma consultora Rysavy Research, Disponible en: <http://www.rysavy.com> [Última consulta: marzo de 2011].
- [34] C. Kappler, “UMTS Networks and Beyond”; Editorial John Wiley & Sons, Ltd. 2009.
- [35] “Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2009-2014”, CISCO. [En línea]. Disponible en: http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-520862.pdf [Última consulta: Marzo de 2011].
- [36] “Mobile backhaul – the power behind LTE”, Nokia Siemens Networks. [En línea]. Disponible en: <http://www.nokiasiemensnetworks.com/news-events/publications/unite-magazine-february-2010/all-ip-mobile-backhaul-the-power-behind-lte> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [37] “Evolución del Backhaul, El Futuro de las Redes Celulares”, telesemana.com. [En línea]. Disponible en: <http://telesemana.com/reportes/detalle.php?id=23> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [38] “IP/Ethernet in mobile backhaul networks survey”, Infonetics. [En línea]. Disponible en: <http://www.infonetics.com/pr/2010/Mobile-Backhaul-and-Microwave-Market-Highlights.asp> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [39] Sitio web del portal multimedia del sector de las telecomunicaciones telesemana.com, Disponible en: <http://www.telesemana.com> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [40] Sitio web de la firma consultora especializada en redes de datos, Disponible en: <http://www.infonetics.com> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [41] Sitio web del foro de metro ethernet, Disponible en: <http://www.metroethernetforum.org> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [42] J. Barbadillo. “Evolución de la Banda Ancha Móvil”, Telefónica [En línea]. Disponible en: http://www.slideshare.net/j_barbadi/broadband-mobile-evolution-250609 [Última consulta: Marzo de 2011].



- [43] A. Contreras. “LTE Impulsando la Transformación de los Servicios”, andicom 2010 [En línea]. Disponible en: http://www.andicom.org.co/sites/default/files/8_Anali%20ALU%20LTE_Evoluci%C3%B3n_Servicios_Andicom_2010_ALU_ed2.pdf [Última consulta: Marzo de 2011].
- [44] “Transition to 4G, 3GPP Broadband Evolution to IMT-Advanced”, 3G AMERICAS. [En línea]. Disponible en: http://www.4gamericas.org/documents/3G_Americas_RysavyResearch_HSPA-LTE_Advanced_FINALv1.pdf [Última consulta: Marzo de 2011].
- [45] 3GPP, (2009, Noviembre) “Overview of 3GPP Release 999” (Release 5 Versión 0.1.0), 3GPP [En línea]. Disponible en: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases/Previous_versions/ [Última consulta: Marzo de 2011].
- [46] 3GPP, (2009, Diciembre) “Overview of 3GPP Release 5” (Release 5 Versión 0.0.1), 3GPP [En línea]. Disponible en: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases/Previous_versions/ [Última consulta: Marzo de 2011].
- [47] E. Brambilla, (2010, Mayo) “LTE – Already a reality? Why? When? Where? What?”, Nokia Siemens Networks [En línea]. Disponible en: <http://telesemana.com/webinars/detalle.php?id=112> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [48] (2010, Octubre) “Plan Vive Digital Colombia”, MINTIC [En línea]. Disponible en: <http://www.mintic.gov.co/vivedigital/pdfs/material.pdf> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [49] (2009, Noviembre) “3GPP LTE for TDD Spectrum in the Americas”, 3G Américas [en línea]. pp 7-11, Disponible en: http://www.3gamericas.org/documents/2009_LTE%20TDD_11_19_09_final_.pdf [Última consulta: Marzo de 2011].
- [50] CITEC, “Informes Finales - CCP.II”, OEA [En línea]. Disponible en: <http://portal.oas.org/Portal/Topic/CITEC/Estructura/CCPII/FinalsReports/tabid/1383/Default.aspx> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [51] (2009, Abril) “Banda de 450 MHz”, Ministerio de Comunicaciones [En línea]. Disponible en: http://omarvillota.net/archive/banda450_com_dig_rural.pdf. [Última consulta: Marzo de 2011].



- [52] (2010) “Atribución de la banda de 700MHz a servicios y aplicaciones de Banda Ancha móvil: Oportunidad para la disminución de la Brecha Digital en Latinoamérica.”, AHCNET [En línea]. Disponible en: <http://www1.ahcnet.net/actualidad/NdP/Lists/Entradas%20de%20blog/Post.aspx?ID=31> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [53] O. León, (2010, Noviembre) “El Desafío de la Universalización de la Banda Ancha y las Oportunidades de la Banda de 700 MHz”, Agencia Nacional de Espectro [En línea]. Disponible en: www.citel.oea.org [Última consulta: Marzo de 2011].
- [54] “Disposiciones de frecuencias para la implementación de la componente terrenal de las telecomunicaciones móviles internacionales-2000 (IMT-2000) en las bandas* 806-960 MHz**, 1 710-2 025 MHz, 2 110-2 200 MHz y 2 500-2 690 MHz”, ITU [En línea]. Disponible en: <http://www.itu.int/rec/R-REC-M.1036/es> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [55] G. Yaffé, (2010, Julio) ” Uso de espectro y universalización del acceso a banda ancha: situación de las tecnologías 4G”, DINATEL [En línea]. Disponible en: <http://www.miem.gub.uy/gxpfiles/miem/content/video/source0000000059/VID0000050000000921.pdf> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [56] (2010) “Protocolos de Comunicación de LTE”, UPS [En línea]. Disponible en: http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/421/4/Cap2_Analisis_tecnico_de_servicios_adicionales_de_tecnologia_LTE_sobre_Sistemas_Moviles_de_4G.pdf [Última consulta: Marzo de 2011].
- [57] D. Galvis. E. León. H. Sánchez; Tesis profesional “Análisis de la migración de las redes móviles actuales hacia las redes móviles de siguiente generación”; Universidad de los Andes; 2010.
- [58] (2010, Octubre), “Respuesta al artículo: " MinTIC de Colombia busca experto en espectro", ANE [En línea]. Disponible en: <http://www.ane.gov.co/noticias.shtml?apc=daxx-1-&x=953> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [59] M. Samudio (2010, Noviembre) “Los planes de las administraciones nacionales para la transición de la TV analógica a digital y el mejor aprovechamiento del espectro”, CITEL [En línea]. Disponible en: <http://portal.oas.org/Portal/Topic/CITEL/tabid/378/Default.aspx> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [60] “Evalúan ampliar la banda de 1900 MHz a pedido de Comcel y Movistar”, ANE [En línea]. Disponible en: <http://www.ane.gov.co/noticias.shtml?apc=daxx-1-&x=415> [Última consulta: Marzo de 2011].



- [61] “HSPA: High Speed Packet Access”, 4G Américas [En línea]. Disponible en: <http://www.4gamericas.org/index.cfm?fuseaction=page§ionid=247> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [62] “HSPA+: High Speed Packet Access Plus”, 4G Americas [En línea]. Disponible en: <http://www.4gamericas.org/index.cfm?fuseaction=page§ionid=248> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [63] (2010, Noviembre), “Global 3G Status HSPA / HSPA+ / LTE November 16, 2010”, 4G AMERICAS [En línea]. Disponible en: <http://www.4gamericas.org/UserFiles/file/Global%20Status%20Updates/Global%20Status%20Update%20November%2029,%202010.pdf> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [64] Lteportal, (2010, Noviembre), “The LTE / LTE-Advanced Guide”, lteportal.com [En línea]. Disponible en: http://lteportal.com/lte_guide/The_LTE_Guide_Nov2010.pdf [Última consulta: Marzo de 2011].
- [65] Sitio web del INCELCOM S.A, Disponible en: <http://www.incelcom.com/servicios.html> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [66] (2009) “Transitioning to “4G” LTE”, huawei.com [En línea]. Disponible en: <http://www.commttechshow.com/2009%20Seminar%20%20soft%20copies/Huawei-Transitioning%20to%204G%20LTE.pdf> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [67] (2010, Noviembre), “Huawei desplegará una red comercial de tecnología LTE TDD en Polonia”, Finanzas.com [En línea]. Disponible en: http://www.finanzas.com/noticias/empresas/2010-11-22/384495_huawei-desplegara-comercial-tecnologia-polonia.html [Última consulta: Marzo de 2011].
- [68] C. García, (2009, Mayo), “Evolución de las redes móviles de Tercera y Cuarta Generación”, Telefónica [En línea]. Disponible en: <http://www.slideshare.net/aitelpucp/evolucion-de-redes-mviles3-g-y-4-g-pucp-1511173> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [69] R. Junquera, (2010, Marzo) “LTE en Latinoamérica”, TeleSemana [En línea]. Disponible en: <http://telesemana.com/reportes/detalle.php?id=27> [Última consulta: Marzo de 2011].
- [70] C. Martínez, (2010, Septiembre) “Más Espectro y Armonizado. Por Que?”, Ericsson [En línea]. Disponible en: <http://www.secom.gob.ar/eventos/bicexpo/Presentaciones/Workshops/Jueves%2023/11%20a%2012%20hs/Ing.%20Christian%20Martinez%20-%20CIA%20ERICSSON.pdf> [Última consulta: Marzo de 2011].



- [71] (2010, Octubre) “Un estudio de Alcatel-Lucent revela que los consumidores y empresas europeos están listos para las aplicaciones LTE”, Alcatel-Lucent [En línea]. Disponible en: http://www.alcatel-lucent.com/wps/portal!/ut/p/kcxml/04_Sj9SPykssy0xPLMnMz0vM0Y_QjzKLd4w3MfQFSYGYRq6m-pEoYgbxjgiRIH1vfV-P_NxU_QD9gtzQiHJHR0UAAD_zXg!!/delta/base64xml/L0lJayEvUUd3QndJQSEvNEI VRkNBISEvNI9BX0U4QS9lc19lcw!!?LMSG_CABINET=Docs_and_Resource_Ctr&LMSG_CONTENT_FILE=News_Releases_2010/News_Article_002230.xml [Última consulta: Marzo de 2011].
- [72] Kineto White Paper, “Voice Options for LTE”, Kineto WIRELESS. [En línea]. Disponible en: http://www.kineto.com/pdf/downloads/Voice_Options_for_LTE_Jan2010.pdf [Última consulta: Marzo de 2011].
- [73] D. Warren (2010), “Roaming in LTE and Voice Over LTE”, GSMA [En línea]. Disponible en: http://www.3gpp.org/ftp/Inbox/Marcoms/Conference_Presentations/2010_06_Latin_America/DanWarren_GSMA_%20VoLTE@RoamingLTE.pdf [Última consulta: Marzo de 2011].
- [74] Sitio web del *VoLGA Forum*, Disponible en: <http://www.volga-forum.com>. [Última consulta: Marzo de 2011].
- [75] Sitio web de la iniciativa VoLTE – One Voice, Disponible en: http://gsmworld.com/our-work/mobile_broadband/volte.htm. [Última consulta: Marzo de 2011].