

Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación



**DESCRIPCIÓN DE LA RED SATELITAL O3B Y
APROXIMACIÓN DEL COMPORTAMIENTO PARA
USO DE UN TERMINAL GENÉRICO EN
POBLACIONES RURALES DEL ECUADOR**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Nelson Fernando Vinueza Escobar

2015

Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación

**Máster Universitario en
Ingeniería de Redes y Servicios Telemáticos**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**DESCRIPCIÓN DE LA RED SATELITAL O3B Y
APROXIMACIÓN DEL COMPORTAMIENTO PARA
USO DE UN TERMINAL GENÉRICO EN
POBLACIONES RURALES DEL ECUADOR**

Autor

Nelson Fernando Vinueza Escobar

Director

Carlos Miguel Nieto

Departamento de Ingeniería de Sistemas Telemáticos

2015

Resumen

La creciente demanda de conectividad a Internet junto con la carencia de disponibilidad de acceso a banda ancha desde lugares remotos o poco atractivos para los proveedores tradicionales, ha impulsado la aparición de proveedores de servicio satelital con nuevas propuestas de sistemas satelitales MEO de alto rendimiento tipo (HTS), de bajo retardo respecto a los tradicionales sistemas GEO, como es el caso del sistema satelital denominado O3b.

El presente trabajo describe el funcionamiento del sistema O3b con el fin de entender las características principales asociadas a la prestación de servicios fijos por satélite (FSS) específicamente para Ecuador, considerando el uso de la Banda Ka y la degradación que sufren los enlaces frente a condiciones de lluvia en especial en zonas de clima tropical, para lo que se han seleccionado un conjunto de ubicaciones a lo largo de las diferentes regiones del país.

Inicialmente, se realiza una descripción general de los sistemas de comunicación por satélite con los principales conceptos a utilizar en el desarrollo del presente trabajo, profundizando en las características y comportamiento y estado del arte del sistema satelital O3b.

Luego, se realiza el cálculo predictivo de varios índices de atenuación por lluvia para un conjunto de localidades seleccionadas dentro del territorio continental e insular de Ecuador siguiendo los esquemas de las recomendaciones P.618-11, P.838-3 de P.837-6 de la ITU.

Posteriormente, se desarrollan los cálculos de balance de los enlaces saliente y entrante para cada ubicación bajo condiciones particulares de handover en escenarios con cielo despejado y en presencia de lluvia, obteniéndose los niveles de E_b/N_0 y su disponibilidad que se asocian al estándar seleccionado DVB-S2/RCS2 con sus diferentes esquemas de modulación y codificación (ModCod), para diferentes tasas de velocidad de transmisión, tomando como base los elementos certificados y disponibles por el fabricante. Adicionalmente, una arquitectura básica con PEP es sugerida para el mejoramiento del Throughput del terminal satelital interactivo (TSI).

Finalmente, se comentarán las conclusiones obtenidas del trabajo realizado. También se proponen diferentes líneas de investigación para mejorar o complementar las el sistema.

Abstract

The growing demand for Internet connectivity, along with the lack of availability for broadband access in locations that are remote or unattractive to traditional suppliers, has prompted the emergence of satellite service providers with new proposals for high-performance, low-delay satellite systems (HTS) as opposed to traditional GEO systems, such as the MEO satellite system called O3b.

This paper describes the operation of the O3b system in order to understand the main features associated with the provision of fixed satellite services (FSS) specifically for Ecuador, considering the impact of the use of the Ka band, which suffers degradation due to rain, especially in tropical weather, for which have been selected a set of locations along the different regions of the country.

Initially, an overview of satellite communication systems is carried out with the main concepts used in the development of this work, deepening the main characteristics and state of the art of the O3b system.

Then, the predictive calculation of various indices of rain attenuation is performed for a set of selected locations within the continental and insular territory of Ecuador, following the outlines of the recommendations ITU P.618-11, P.838-3 of P.837-6.

Posteriormente, se desarrollan los cálculos de balance de los enlaces saliente y entrante para cada ubicación bajo condiciones particulares de handover en escenarios con cielo despejado y en presencia de lluvia, obteniéndose los niveles de Eb/No

Subsequently, calculations of incoming and outgoing links for specific locations under particular conditions like handover, scenarios with clear sky and in the presence of rain are developed, obtaining levels of Eb/No, which are then cross-referenced with the DVB-S2/RCS2 with different modulation and coding schemes (ModCod) at different baud rates, based on available elements certified by the manufacturer. Additionally, a basic architecture with PEP is suggested to improve the throughput of the Interactive Satellite Terminal (ST).

Finally, the conclusions of the work done are exposed. Different lines of research to improve or expand the system are also proposed.

Agradecimientos

A Dios por sus permanentes bendiciones.

A mis padres, por su apoyo incondicional en todo momento y que a pesar de la distancia siempre han estado pendientes de mí.

De manera especial, a mi tutor Carlos Miguel Nieto, por su valiosa orientación, paciencia y comentarios durante la elaboración del presente trabajo.

A todos y cada uno quienes me brindaron su ayuda, ánimos y particularmente sugerencias para la finalización del presente trabajo, en especial a Lorenzo Luini.

A Magdalena, una mujer admirable, quien me inspira a la distancia al continuar luchando por su salud, recordándome lo valiosa y frágil que puede ser la vida.

Índice general

Resumen.....	i
Abstract	iii
Agradecimientos.....	v
Índice general.....	vi
Índice de figuras.....	ix
Siglas	xi
Introducción.....	xiii
1 Generalidades	1
1.1 Identificación del problema	1
1.2 Justificación y motivación	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Alcance y limitaciones	4
2 Conceptos básicos y Tecnologías de las Comunicaciones Satelitales.....	5
2.1 Sistemas de Comunicación Satelital	5
2.1.1 Satélites de Comunicación de alto rendimiento.....	5
2.1.2 Orbitas satelitales	9
2.1.3 Bandas de frecuencia satelital y servicios de banda ancha.....	9
2.1.4 Infraestructura básica de una red satelital.....	10
2.1.5 Modelo genérico de una red satelital interactiva.....	11
2.1.6 Tipos de Transpondedores.....	13
2.1.7 Enlace inter-satelital.....	14
2.2 Estándar DVB.....	14
2.2.1 Estándar DVB-S y DVB-S2	15
2.2.2 Estándar DVB-RSC/RCS2.....	17
2.3 TCP (Transport Control Protocol).....	19

2.3.1	Contexto de operación de TCP.....	19
2.3.2	Limitaciones de TCP en una red satelital.....	19
2.3.3	Variantes de TCP.....	20
3	Estado del Arte: La Red satelital O3b.....	21
3.1	Objetivo.....	21
3.2	Arquitectura y Características de la Red.....	22
3.2.1	Tipo de Red.....	22
3.2.2	Cobertura.....	23
3.2.3	Segmento Espacial.....	24
3.2.4	Segmento Terrestre.....	25
3.2.5	Enlace con el satélite.....	28
3.2.6	Handover del sistema.....	29
3.3	Comparativa de Sistemas No Geoestacionarios (NGEO).....	31
3.4	Otras Redes Comerciales NGEO.....	32
3.4.1	Iridium.....	32
3.4.2	Globalstar.....	33
3.5	Principales ventajas y restricciones de uso de la Red O3b.....	35
3.5.1	Por el tipo de órbita.....	35
3.5.2	Por la frecuencia de trabajo.....	36
3.5.3	Otros beneficios de la red O3b.....	36
3.6	Nuevos actores en el acceso a Internet.....	39
4	Aproximación del comportamiento de un TSI para uso en Ecuador.....	41
4.1	Descripción del requerimiento.....	41
4.1.1	Selección de ubicaciones y coordenadas de localización.....	42
4.1.2	Mapa Hidro-meteorológico.....	44
4.1.3	Escenario proyectado de uso.....	46
4.2	Cálculo de parámetros del enlace.....	47
4.2.1	Distancia, handover y posición relativa.....	47
4.2.2	Consideraciones generales.....	48
4.2.3	Cálculo de distancia, ángulo de elevación y Azimut.....	49
4.3	Pérdidas en la Atmósfera.....	51

4.3.1	Atenuación por lluvia	52
4.3.2	Predicción de la Intensidad de lluvia	53
4.3.3	Atenuación específica	55
4.4	Cálculo de la Atenuación por lluvia	57
4.5	Cálculos y análisis para escenarios específicos.	64
4.5.1	Calidad y valores requeridos Eb/No	64
4.5.2	Escenarios por lluvia y handover.....	66
4.6	Técnicas de mitigación para desvanecimiento por lluvia (FMT)	76
4.6.1	ACM (Modulación y Codificación Adaptativos).....	78
4.7	Restricciones Banda Ku, Retardo, Jitter.....	80
4.7.1	Retardo y RTT del Sistema.....	81
4.8	Tecnologías seleccionadas DVB.	84
4.9	Arquitectura genérica de la red.....	86
4.9.1	Rendimiento PEPs Acelerador	89
5	Conclusiones y Trabajos futuros.....	95
5.1	Conclusiones	95
5.2	Trabajos Futuros	97
	Bibliografía.....	99

Índice de figuras

Figura 1: Acceso en Ecuador a Internet según el tipo de Área	1
Figura 2: Lugares desde donde se accede a Internet por tipo de Área.....	2
Figura 3: Reutilización de Frecuencias.....	6
Figura 4: Plan de Frecuencias de 4 colores	6
Figura 5 : Patrón de reutilización de Frecuencias de 4 colores y celdas.....	7
Figura 6: Crecimiento previsto de accesos de banda ancha por satélite	8
Figura 7: Costo de Acceso por Tecnologías vs Densidad de Habitantes	8
Figura 8: Principales Órbitas Satelitales.....	9
Figura 9: Distribución de las Bandas de Frecuencia Satelital.....	9
Figura 10: Aplicaciones prácticas.....	10
Figura 11: Componentes de Red Satelital Interactiva	12
Figura 12: Encapsulamiento GSE sobre DVB-S2.....	17
Figura 13: Principales variantes de TCP.	20
Figura 14. Constelación de satélites O3b	21
Figura 15: Topología en estrella	23
Figura 16: Área de cobertura de la constelación de O3b	23
Figura 17: Conexión de la Red de Gateways O3b	25
Figura 18: Distribución de Gateways y Regiones de Servicio.....	26
Figura 19: Terminal Satelital (TSI) con doble antena	28
Figura 20: Uso por O3b de las frecuencias en banda Ka.....	29
Figura 21: Comunicación antes del Handover.....	30
Figura 22: Comunicación simultanea durante el Handover	30
Figura 23: Comunicación después del Handover.....	31
Figura 24: Constelación de Satélites Iridium.....	33
Figura 25: Rastreo Satelital Aéreo	34
Figura 26: Comparativa entre bandas de frecuencia satelitales.....	36
Figura 27: Calidad de Voz - Degradación MOS debido al retardo por latencia.....	37
Figura 28: Población por regional con acceso a Internet al menos una vez al año. ...	39
Figura 29: Territorio Ecuatoriano Continental e Insular.....	42
Figura 30: Conjunto de posibles localizaciones para TSIs en Ecuador	43
Figura 31: Zonas Hidro meteorológicas.....	45
Figura 32: Esquema aproximado el momento del Handover	47
Figura 33: Posición de una TSI respecto al handover	48
Figura 34: Atenuación en función de la frecuencia e intensidad de la lluvia	53

Figura 35: Ubicación de C3 según la granularidad de Áreas para Ecuador.	57
Figura 36: Esquema para enlace satelital (tierra - espacio).....	58
Figura 37: Técnica de mitigación ACM con determinados Terminales (TSI)	77
Figura 38: Efecto de la atenuación con configuración CCM y ACM	78
Figura 39: Prueba de retardo de propagación en la Red O3b.	81
Figura 40: Variación del Retardo de Propagación para un TSI en el Sistema O3b ...	82
Figura 41: Arquitectura general del sistema para cobertura en Ecuador.....	87
Figura 42: a) Arquitectura TC-PEP Distribuida. b) Esquema por capas de la división en 3 segmentos de la conexión TCP.....	90
Figura 43: Esquema PEP con seguridad extremo a extremo.....	93

Siglas

ACM:	<i>Adaptive Coding and Modulation</i>
CCM:	<i>Constant Coding and Modulation</i>
BW:	<i>Band With</i>
CDMA:	<i>Code Division Multiple Access</i>
DVB:	<i>Digital Video Broadcasting</i>
DVB-S2:	<i>Second Generation DVB Satellite Standard</i>
E2E:	<i>End to End</i>
FEC:	<i>Forward Error Correction</i>
FSS :	<i>Fixed Satellite Service</i>
GEO:	<i>Geostationary Earth Orbit</i>
HPA:	<i>High Power Amplifier</i>
G/T:	<i>Antenna gain to noise temperature</i>
ISP:	<i>Internet Service Provider</i>
LES:	<i>Land Earth Stations</i>
LPI-AJ:	<i>Low Probability of Intercept – Anti-Jam</i>
MEO:	<i>Medium Earth Orbit</i>
MSS:	<i>Mobile Satellite Service</i>
O3b:	<i>Other 3 billion (of the population)</i>
PEP:	<i>Performance Enhancing Proxy</i>
PIRE:	<i>Potencia Isotrópica Radiada Equivalente</i>
QoS:	<i>Quality of Service</i>
RCS:	<i>Return Channel Satellite</i>

RTT:	<i>Round Trip Time</i>
SCPC:	<i>Single Channel Per Carrier</i>
MCPC:	<i>Multiple Channels Per Carrier</i>
N-GSO:	<i>No-GeoStationary Orbits</i>
SNOC:	<i>Satellite Network Operating Center</i>
SIT:	<i>Satellite Interactive Terminal</i>
TSI:	<i>Terminal Satelital Interactivo</i>
TTAC:	<i>Tracking, Telemetry and Control</i>
TWTA:	<i>Traveling Wave Tube Amplifier</i>
VSAT:	<i>Very Small Aperture Terminal</i>

Introducción

La tecnología de comunicación satelital en los últimos años ha llegado a ser una solución para solventar problemas de acceso o expansión de las redes de comunicaciones terrestres, conectando ciudades a lo largo de sitios remotos donde las redes tradicionales de cobre, fibra, o microonda serían prohibitivas por complejidad o costo en su implementación. Por lo cual, se aprovecha las características propias de las constelaciones satelitales que pueden proveer comunicaciones globales, ubicuas y multipunto.

Los satélites de comunicación permiten el desarrollo y expansión de las redes de comunicaciones posibilitando incorporar una gran cantidad de nuevos usuarios a Internet con nuevas aplicaciones que exigen interactividad. Sin pretender sustituir a las redes terrestres, las comunicaciones a través del satélite tienen un rol complementario. Adicionalmente, con el uso de sistemas vía satélites de comunicación pueden crearse redes permanentes o **provisionales** con mayor facilidad que mediante cable o fibra, lo cual resulta de particular utilidad en situaciones como picos temporales de demanda, situaciones de emergencia o incluso desastres, donde un rápido despliegue con un carácter temporal en uso son características determinantes.

Actualmente, los satélites de tipo *GEO (Geostationary Earth Orbit)* son ampliamente usados en comunicaciones de larga distancia, abarcando una extensa zona de cobertura sobre la superficie terrestre, sin embargo el retardo de la señal produce efectos negativos sobre las aplicaciones en tiempo real limitando su uso en un contexto que esté orientado a la interactividad.

Como una alternativa a lo anterior, actualmente *Sistemas Satélites de Alto Rendimiento HTS* de tipo *MEO (Medium Earth Orbit)* presentan un retardo de propagación considerablemente menor con respecto a los sistemas GEO, permitiendo reunir requerimientos para la comunicación interactiva y serán parte esencial para el despliegue de Internet de banda ancha de la próxima generación.

Países emergentes, como es el caso de Ecuador, particularmente con limitado nivel de desarrollo económico y con una topografía que dificulta el despliegue de infraestructura terrestre, presentan una baja tasa de penetración de servicios de telecomunicaciones con respecto a países con mayor nivel de desarrollo. Para solventar esta dificultad, o incluso ampliar el alcance de red, se han desarrollado sistemas de

comunicación que hacen uso de las nuevas redes y tecnologías satelitales de comunicación.

El presente Trabajo de Fin de Máster describirá la nueva red satelital O3b, con el objetivo de analizar su posible utilización como parte de una solución de comunicación para acceso a Internet a lo largo del territorio Ecuatoriano, particularmente desde ubicaciones remotas, mediante el uso de un terminal satelital interactivo genérico.

En el capítulo 1 se aborda las generalidades del problema, sus antecedentes, justificación y alcance del trabajo. Luego, en el capítulo 2 se presentan conceptos básicos de las principales temáticas que son parte de las comunicaciones por satélite y que son utilizadas durante el desarrollo del trabajo. El capítulo 3, se presenta el estado del arte con una descripción y estudio del sistema satelital O3b enfocando sus características relevantes al objetivo planteado. En el capítulo 4, se analiza las limitaciones del enlace de comunicación sobre el territorio Ecuatoriano para un conjunto de ubicaciones seleccionadas con énfasis en la atenuación por lluvia que se presenta en zonas tropicales y el comportamiento durante el handover, bajo las recomendaciones de la ITU, y se justifica la elección del estándar DVB-S2/RCS2. Finalmente, en el capítulo 5, se presentan las conclusiones y trabajos futuros.

1 Generalidades

1.1 Identificación del problema

Antecedentes

En Ecuador existe una gran brecha entre la cobertura y el acceso a Internet entre las zonas urbanas y las suburbanas o rurales. Datos del INEC (*Instituto Nacional de Estadística y Censos*) en Ecuador, indican que en el país mientras el 37% de la población urbana tenía acceso a Internet al 2013, la cifra solo llegó a 9.1% en las zonas rurales, como se muestra en la Figura 1.

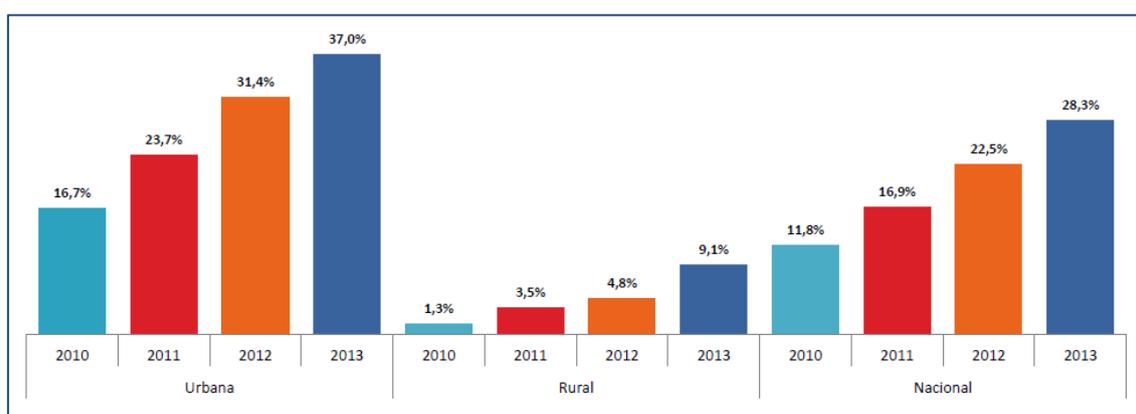


Figura 1: Acceso en Ecuador a Internet según el tipo de Área¹

En la gráfica se aprecia una marcada diferencia en el acceso rural, por cada 4 habitantes de las zonas urbanas, únicamente 1 accede a Internet y sus servicios en las zonas rurales o con poca densidad de población.

Según estadísticas del organismo regulador la *Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones en Ecuador (ARCOTEL)*, la penetración de la banda ancha móvil se mantiene relativamente baja con el 27,2% de la población, concentrándose cerca del 60% únicamente en 2 de sus 25 provincias, Pichincha y Guayas² que son las de mayor población.

Es necesario notar que existe una diferencia notoria en el porcentaje de acceso a Internet para quienes lo hacen desde sus hogares en una zona rural 22,3% con respecto a quienes lo hacen desde una zona urbana 50,9%, como se puede ver en la Figura 2.

¹ http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Sociales/TIC/Resultados_principales_140515.Tic.pdf

² Encuesta Nacional de Empleo Desempleo y Subempleo - ENEMDU (2010 - 2013)

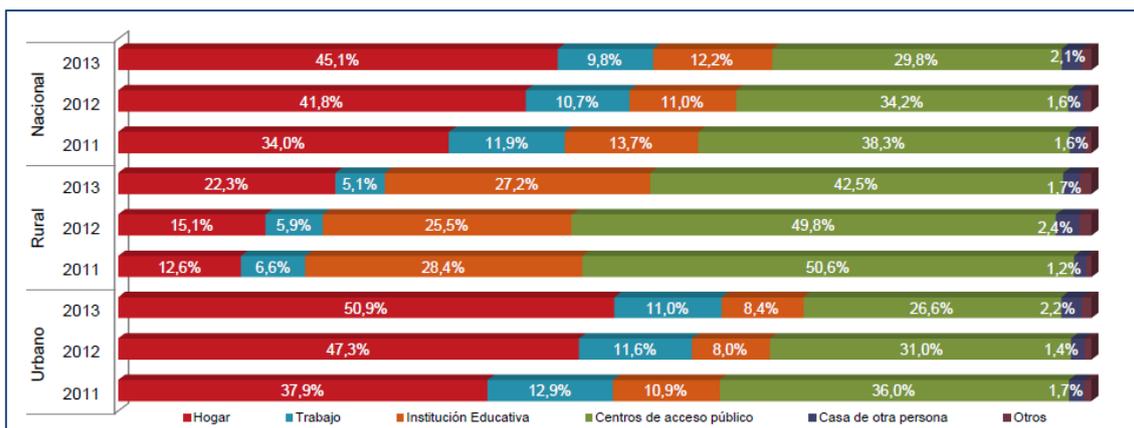


Figura 2: Lugares desde donde se accede a Internet por tipo de Área³

Por otro lado, aunque la cobertura 3G llegó a 93,2% el 2012, esa cifra solo fue de 51,3% en zonas rurales. En el 2014 se dio inicio al proceso de despliegue de red y prestación de servicio comercial 4G por parte de la operadora Ecuatoriana estatal CNT (*Corporación Nacional de Telecomunicaciones*), mientras que este mismo proceso fue retrasado para las operadoras comerciales privadas Movistar y Claro, a las que tardíamente se les ha otorgado la autorización mediante contrato de concesión por parte del estado en febrero del 2015.

1.2 Justificación y motivación

Justificación

La propuesta del presente Trabajo de Fin de Master está alineada a la política de gobierno, pues en Ecuador, el *Ministerio de Telecomunicaciones (MINTEL)* tiene entre sus planes ejecutar estudios, analizar alternativas y tecnologías que contribuyan a reducir la brecha digital entre las zonas urbanas y rurales, para lo cual se ha planteado como objetivo elevar la cobertura de Internet al 90% hasta el 2017 [1], para contribuir al desarrollo de localidades aisladas.

Entre las políticas del uso de tecnologías de información en Ecuador, según la *SENATEL (Secretaría Nacional de Telecomunicaciones)*, una de ellas es la de fomentar la participación del sector público y privado en el desarrollo de las telecomunicaciones de los sectores urbano marginal y rural como una contribución al servicio y acceso universales⁴.

³ http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Sociales/TIC/Resultados_principales_140515.Tic.pdf

⁴ http://www.comunidadandina.org/telec/Plan_telecomunicaciones_ecuador.pdf

En el 2014 se dio inicio al proceso para concesión de la banda para 4G, siendo el Ecuador uno de los últimos países latinoamericanos en iniciar los procesos de despliegue de esta tecnología que favorece el acceso a Internet, sin embargo dado el costo de implementación en lugares remotos para las operadoras, sumada al costo de los terminales de usuario, hace prever que el acceso a Internet a través de esta tecnología no será masiva sino posiblemente a largo plazo.

Motivación

Contribuir mediante la exploración de otras alternativas a disminuir la brecha digital, por acceso a Internet, existente en Ecuador con respecto a otros países.

Disponer de un marco general de estudio para diseño de un sistema genérico con uso de una nueva constelación de satélites de tipo MEO en la banda Ka.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

El objetivo general del presente trabajo de fin de Máster es:

- Realizar un estudio descriptivo de la nueva red satelital O3b, analizando el comportamiento con una estación terminal interactiva (TSI) de tipo genérico, para uso en diferentes ubicaciones a lo largo del territorio Ecuador.

1.3.2 Objetivos Específicos

Los objetivos secundarios del presente trabajo son:

- Determinar si existe diferencias notorias para el uso de una estación genérica desde diferentes ubicaciones del territorio ecuatoriano, continental e insular.
- Analizar el comportamiento aproximado durante la condición de handover.
- Revisar escenarios de balance del enlace con cielo despejado y atenuación a diferentes tasas de probabilidad de lluvia
- Identificar zonas que presenten potenciales limitaciones.
- Cumplir con la normativa vigente de la ITU para el sistema.
- Seleccionar una arquitectura básica, estándar utilizado y configuración.

1.4 Alcance y limitaciones

El alcance del presente trabajo implica la revisión del estado del arte del sistema O3b a inicios del 2015, así como analizar las principales características y limitaciones de este sistema que afectan su utilización con un Terminal Satelital Interactivo (TSI) genérico desde diferentes lugares remotos que han sido seleccionados dentro de la geografía del Ecuador.

El análisis se centra en una estación terrena del tipo VSAT (TSI), su interacción con la constelación de satélites, y la red de GWs ya existentes del sistema O3b, dejando para futuros trabajos el estudio en detalle de la tecnología de red de última milla que dependerá de los requerimientos a nivel de los potenciales usuarios finales.

2 Conceptos básicos y Tecnologías de las Comunicaciones Satelitales

2.1 Sistemas de Comunicación Satelital

Recordando la historia, es en octubre de 1945 cuando Clarke publicó en la revista británica *Wireless World* el artículo *Extra-Terrestrial Relays*, donde se especificaba una propuesta de sistema de comunicación global con estaciones espaciales que utilizaban 3 satélites GEO para brindar cobertura a la superficie de la tierra.

Los satélites de comunicación, han sido de gran utilidad para proveer servicios de comunicación desde los más tradicionales como TV, telefonía, radiodifusión, gracias a la cobertura ubicua dentro de extensas zonas geográficas donde no es factible la presencia de otras tecnologías para comunicación.

2.1.1 Satélites de Comunicación de alto rendimiento.

Actualmente, en zonas no cubiertas por la infraestructura tradicional de telecomunicaciones existe una demanda creciente de servicios de banda ancha bidireccionales, siendo la tecnología de banda ancha por satélite fundamental y habilitante para la expansión del acceso a servicios de comunicación en todo el mundo.

Las nuevas generaciones de servicios y aplicaciones multimedia requieren de elementos y redes satelitales con características mejoradas respecto a los satélites tradicionales de un solo haz, siendo éstos los llamados satélites de alto rendimiento *High Throughput Satellite (HTS)*.

Los Sistemas HTS ofrecen altas capacidades, mediante la explotación de los recursos espectrales de las bandas altas ya que su zona de cobertura se concentra en áreas relativamente pequeñas como se ilustra en la Figura 3. La reutilización de las frecuencias ha posibilitado que el ancho de banda se multiplique 20 veces o más en comparación con los satélites tradicionales.

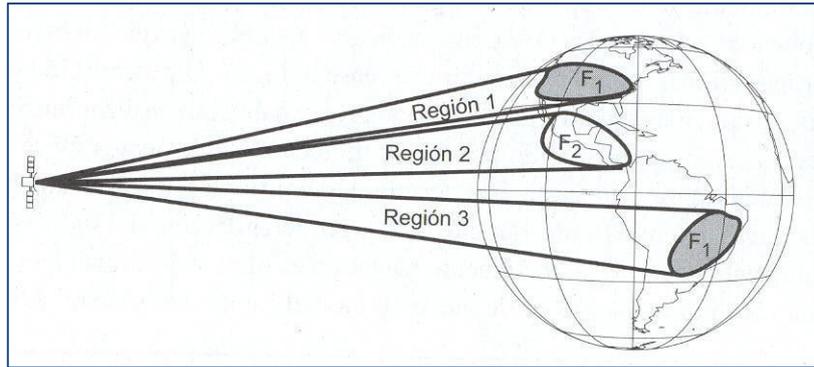


Figura 3: Reutilización de Frecuencias

Los HTS tienen haces bastante directivos, que con una separación espacial entre sus múltiples haces posibilitan el uso de un plan de reutilización de frecuencias, por ejemplo un par f_1 y f_2 como se muestra en Figura 4, produciéndose un denominado *patrón de colores* caracterizado cada uno por una frecuencia con una determinada polarización.

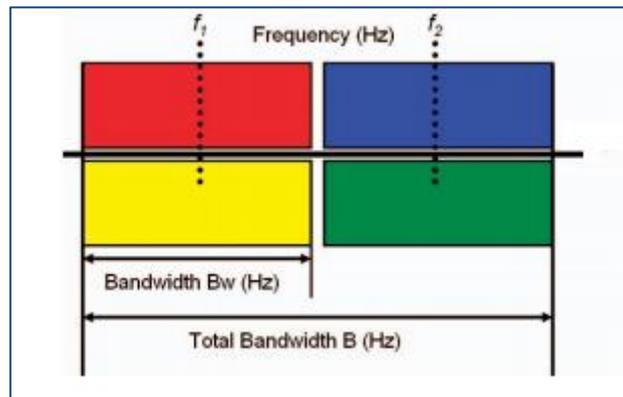


Figura 4: Plan de Frecuencias de 4 colores

Lo anterior, da la posibilidad de generar un patrón de reutilización de frecuencias de cuatro colores, para zonas de cobertura o celdas, como se puede visualizar en la Figura 5.

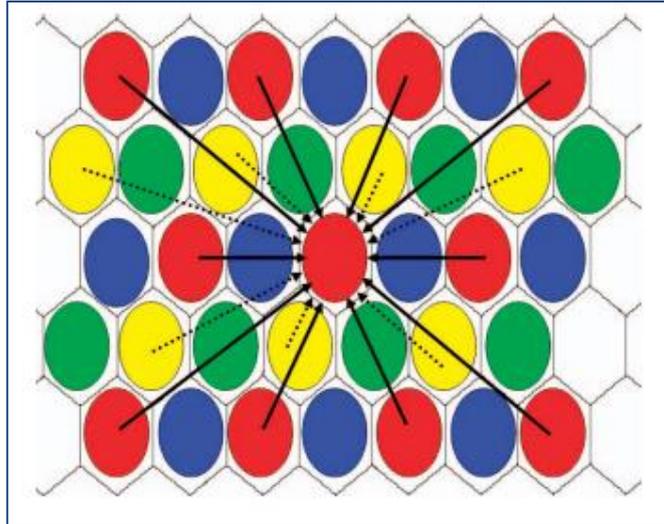


Figura 5 : Patrón de reutilización de Frecuencias de 4 colores y celdas⁵

Algunos HTS, como el Sistema O3b, actualmente hacen uso de la tecnología de múltiples haces en banda Ka, con arreglos de diferentes patrones en cobertura, con el fin de ofrecer un acceso de banda ancha en un área geográfica más extensa a los diferentes (TSI) o VSATs que pueden formar el sistema.

Cabe anotar que, el área del haz en la medida que se aleja de la línea ecuatorial, tiende a tener una forma más ovoide como consecuencia de la ubicación del satélite.

En la medida que la oferta de banda ancha terrestre no cubre grandes territorios, una alternativa de banda ancha vía satélite es considerada como un complemento y no un competidor directo de la fibra óptica y ADSL.

Crecimiento

Los sistemas de satélite HTS son óptimos para los servicios tales como: el acceso a Internet de banda ancha, redes privadas virtuales y el acceso personal.

Mundialmente, se espera que el número de abonados a servicios de banda ancha por satélite aumente de 1,5 millones en 2011 a 6 millones en 2020. Observándose un crecimiento en la cantidad de abonados concentrada en América del Norte y Europa Occidental, como se muestra en la Figura 6, según las previsiones de Northern Skype Research (NSR).

⁵ IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, Vol. 50, No.3, July 2014.

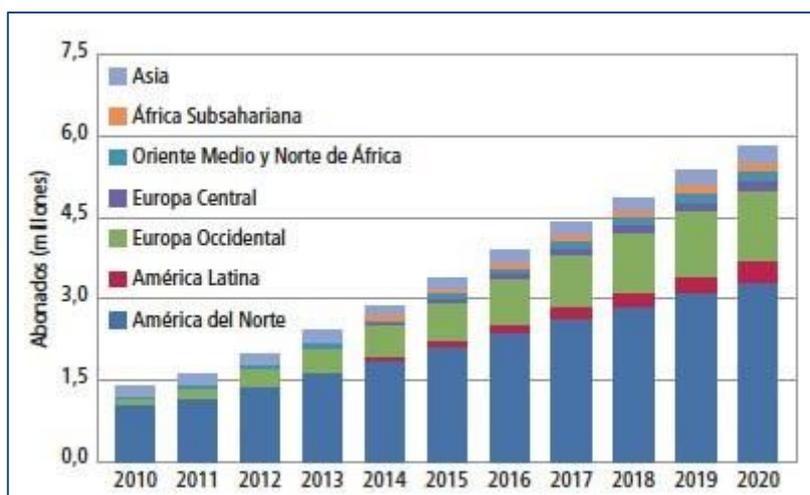


Figura 6: Crecimiento previsto de accesos de banda ancha por satélite⁶

Ventajas

Los costos de acceso a la banda ancha terrestre o inalámbrica se incrementan conforme se quiere incorporar más usuarios al servicio particularmente en zonas de baja densidad poblacional, sin embargo el costo de contar con acceso por satélite es independiente de la densidad de usuarios como se muestra en la Figura 7, destacando la diferencia en bajo costo entre el uso de HTS frente a los satélites tradicionales.

El acceso a la banda ancha satelital está disponible teóricamente de forma ubicua en cualquier lugar dentro del área de cobertura, y su calidad de servicio es independiente de la distancia.

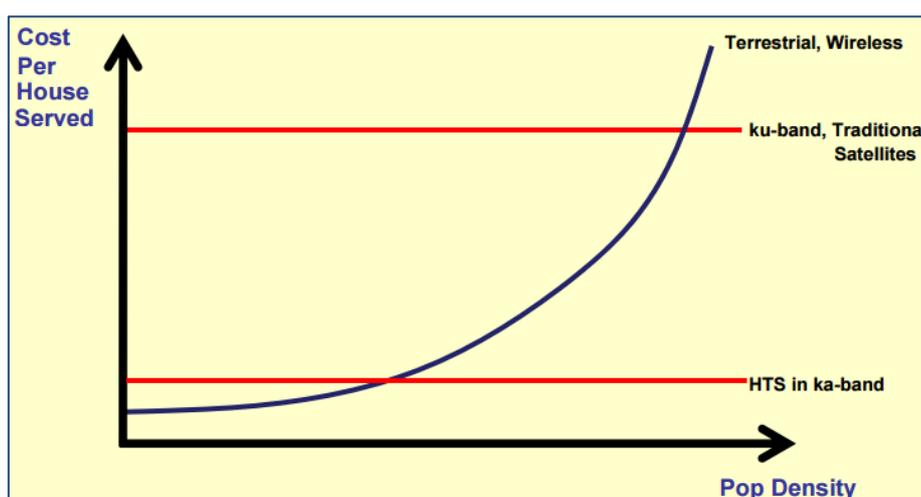


Figura 7: Costo de Acceso por Tecnologías vs Densidad de Habitantes⁷

⁶ <https://itunews.itu.int/es/2746-La-banda-ancha-por-satelite-alcanza-la-mayoria-de-edad.note.aspx>

2.1.2 Órbitas satelitales

En la Figura 8 se muestran las órbitas satelitales LEO (órbita baja), MEO (órbita media), GEO (órbita geoestacionaria) y HEO (órbita elíptica). Entre las principales razones por las cuales se tienen varias órbitas a diferentes alturas desde la superficie terrestre, una es la existencia de los cinturones de Van Allen. Estos son campos energéticos en forma de toroide presentes alrededor de la tierra y que contienen partículas cargadas energéticamente. El cinturón interno de Van Allen está entre los 2000Km y los 5000K de altitud, mientras que el cinturón externo se encuentra a partir de los 15.000Km de altitud.

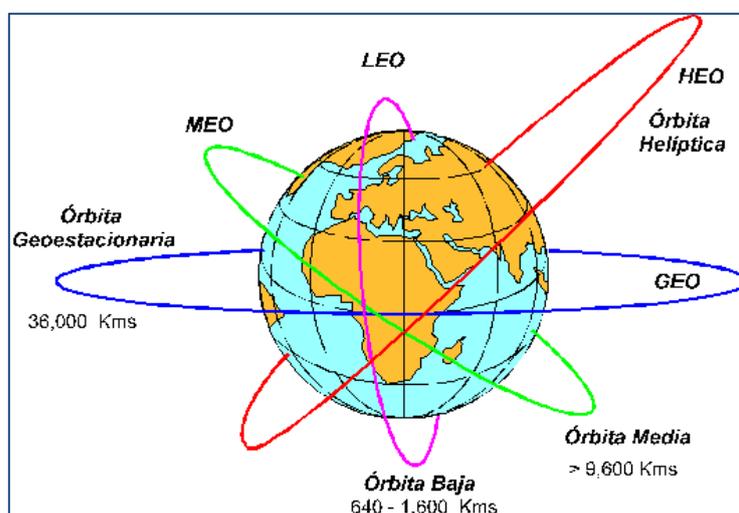


Figura 8: Principales Órbitas Satelitales

2.1.3 Bandas de frecuencia satelital y servicios de banda ancha

Las bandas de frecuencia del espectro radioeléctrico asignadas para comunicaciones satelitales se hallan en el orden de los GHz. La denominación y rango de las diferentes bandas se muestra en la Figura 9.

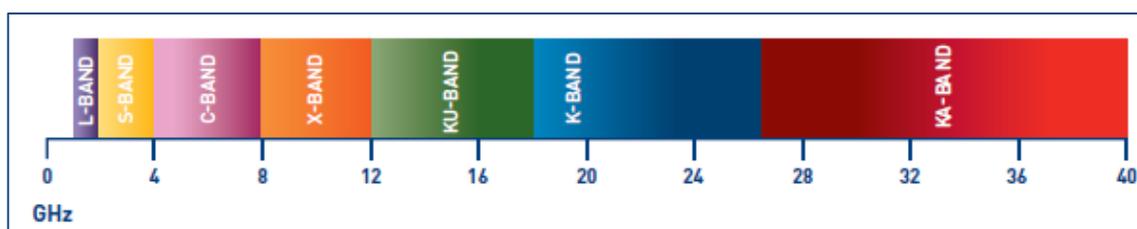


Figura 9: Distribución de las Bandas de Frecuencia Satelital

⁷ <http://www.itu.int/md/R12-ITURKA.BAND-C/es>

Los servicios de banda ancha por satélite son ofrecidos básicamente en cinco categorías tecnológicas [2]:

Tabla 1: Categorías para Servicios Satelitales

Asignación	Frecuencia	Categorías
Banda L	(1.5/1.6 GHz)	MSS (Mobile Satellite Service)
Banda C	(4 /6 GHz)	FSS (Fixed Satellite Services)
Banda Ku	(11/14 GHz)	FSS (Fixed Satellite Services)
Banda Ka	(20/30 GHz)	Transparente (sin OBP)
Banda Ka	(20/30 GHz)	Regenerativo (con OBP)

Los nuevos sistemas HTS posibilitan aplicaciones más demandantes y trabajan generalmente en las bandas Ku y Ka. Respectivamente, la banda Ka, permite abarcar 8 veces más ancho de banda que la banda Ku y 24 veces más que la banda C.

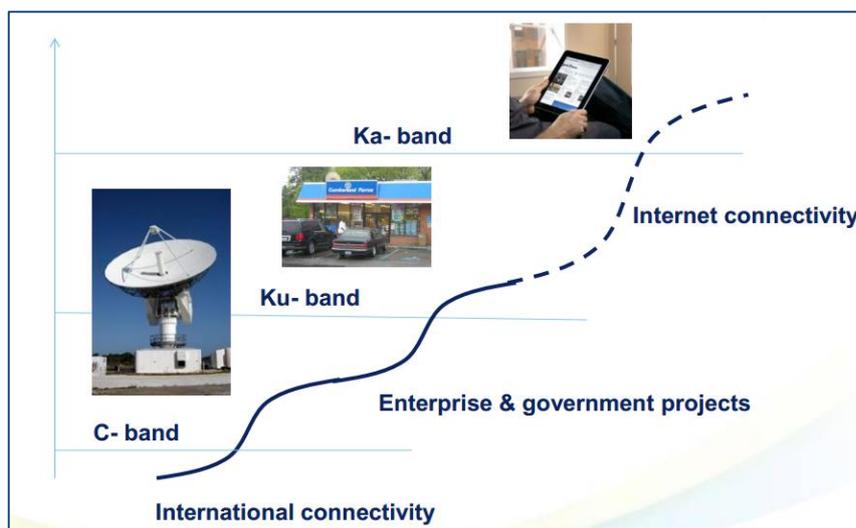


Figura 10: Aplicaciones prácticas⁸

2.1.4 Infraestructura básica de una red satelital

Un satélite puede dividirse en dos partes fundamentales para su operación: el conjunto de equipos y antenas que procesan las señales de comunicación de los usuarios como función substancial, denominado *carga útil* o de comunicaciones, y la estructura de soporte con los elementos de apoyo a dicha función, denominada *plataforma*.

⁸ <http://www.itu.int/md/R12-ITURKA.BAND-C/es>

La carga útil está asociada al amplio campo de acción de la cobertura de la huella del satélite y del empleo de las ondas de radio en una extensa gama de frecuencias que constituyen la capacidad de comunicación al servicio de los usuarios.

La estructura de la plataforma sirve de soporte tanto para los demás elementos como para la carga útil. Debe tener la suficiente resistencia para soportar las fuerzas y vibraciones del lanzamiento y a la vez un peso mínimo conveniente.

Los sistemas de propulsión en los sistemas GEO tradicionales los combustibles químicos requeridos para conservar su posición durante su vida útil, generalmente representan el 20 o 40% de masa adicional a la de nave sin combustible.

El subsistema de control de orientación está constituido por las partes y componentes que permiten conservar la precisión del apuntamiento de la emisión y recepción de las antenas del satélite dentro de los límites de diseño, corrigiendo no sólo las desviaciones de estas por dilatación térmica e imprecisión de montaje, sino de toda la nave en su conjunto.

El subsistema de energía está constituido generalmente por células solares que alimentan los circuitos eléctricos de la nave, las baterías que aseguran el suministro durante los eclipses y los dispositivos de regulación.

El subsistema de telemetría permite conocer el estado de todos los demás subsistemas. Utiliza un gran número de sensores que detectan o miden estados de circuitos y variaciones de temperatura, presión, voltaje, corriente eléctrica, etc.,

El sistema de telemando permite enviar órdenes al satélite desde el centro de control a través de un canal de comunicación dedicado que se activa cuando éstas se transmiten.

2.1.5 Modelo genérico de una red satelital interactiva

En la Figura 11 se muestran los componentes que forman parte del sistema de una red satelital interactiva. Los principales son:

The Return Channel Satellite Terminal (RCST): Un RCST está formado por la Unidad de Interfaz de Red (que consiste en el Módulo Interfaz de Difusión y el Módulo Interfaz Interactivo) y la *STU (Set Top Unit)*. El RCST proporciona una interfaz tanto para Radio y Canales de Interacción. La interfaz entre el RCST y la red de interacción se realiza a través del Módulo Interfaz Interactivo.

Network Control Centre (NCC): El NCC proporciona funciones de control y seguimiento, generando señales de control y temporización para el funcionamiento de la Red Interactiva Satelital siendo transmitidas por una o varias estaciones de alimentación.

Traffic Gateway (TG): Un TG recibe las señales de retorno RCST ofreciendo funciones de acceso, validación, servicios interactivos y conexiones con entidades externas como pueden ser proveedores de servicios (bases de datos, TV, video pay-per-view, tele compra, tele banca, juegos interactivos, etc.), así como es el interfaz a otras redes públicas o privadas (Internet, PSTN, etc.).

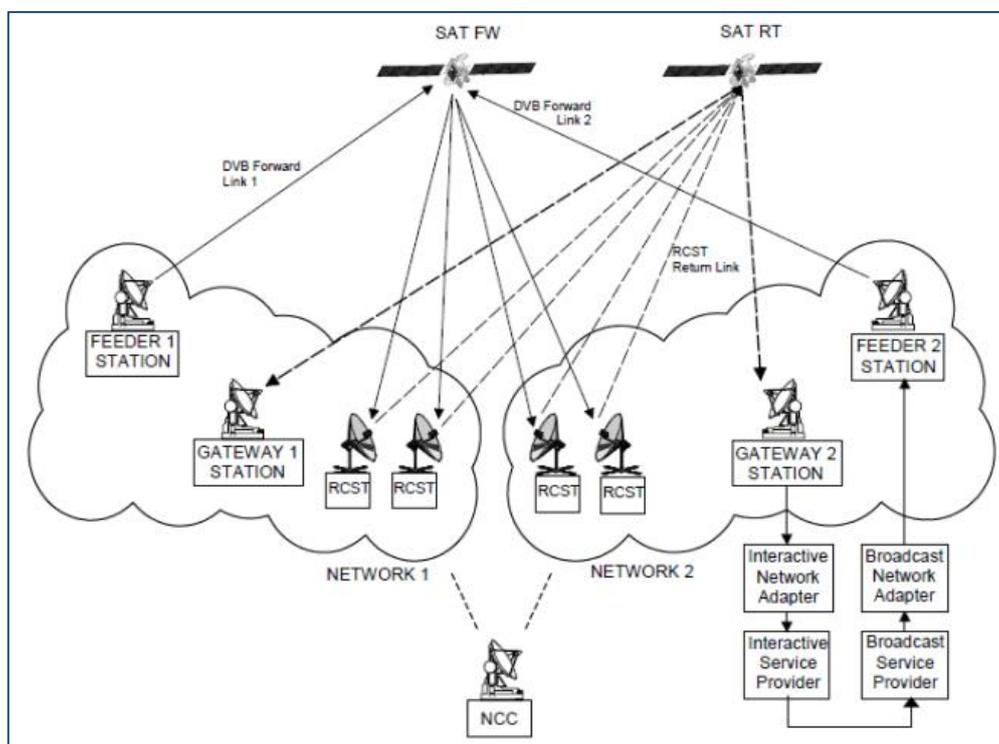


Figura 11: Componentes de Red Satelital Interactiva⁹

La evolución tecnológica permitió la creación de topologías VSAT tipo **mall**, que a diferencia de la topología en **estrella**, se adapta mejor a aplicaciones interactivas en un solo salto y también al modelo cliente servidor.

Modos de Acceso

El esquema *SCPC* (*Single Channel per Carrier*) consiste en transmitir una señal digital en una única frecuencia fija, llamada portadora. En el caso de una comunicación satelital se requieren dos portadoras para establecer un enlace en una topología punto a punto, una para el up-link y otra para le down-link.

⁹ ETSI 301 790 v1.5.1 (2009-05)

El acceso para el enlace de retorno se basa en el esquema *Multi-Frequency Time Division Multiple Access (MF-TDMA)*. MF-TDMA permite en una configuración en estrella que un grupo de RCSTs se comuniquen con el NCC y el Gateway compartiendo un conjunto de frecuencias portadoras, cada una de las cuales se divide en ranuras de tiempo para la transmisión de ráfagas.

La NCC puede asignar en el enlace de retorno intervalos de tiempo para flujos continuos de acceso dedicado, así como para ráfagas de acceso aleatorio, e indicar el tipo de ráfaga y contenido a transmitir. Resultando en un BTP (Burst Time Plan) que se distribuirá a los RCSTs vía emisión de la SCT, la FCT2, el BCT y las tablas de información de servicios TBTP2, y a través de TIM-T, según corresponda¹⁰.

2.1.6 Tipos de Transpondedores

Se tienen principalmente dos tipos de generaciones de transpondedores en los satélites: Transparentes y Regenerativos con procesamiento a bordo *OBP (On Board Processing)*.

Transpondedores Transparentes

Estos transpondedores son también conocidos en la literatura técnica como de tipo “Bent pipe”. En términos generales, se realiza una amplificación mediante un LNA de la señal recibida a su entrada, luego una conversión de frecuencia a la que corresponde para el enlace descendente. En este tipo de transpondedores *el ruido o error es acumulativo*, no realizan ninguna regeneración de la señal en Banda Base (BB) y no realizan ningún tipo de procesamiento a bordo (OPB).

Transpondedores Regenerativos

Estos transpondedores realizan una regeneración de la señal en BB, pudiendo ser objeto de etapas de procesamiento posterior, por lo que toman también el nombre de transpondedores OPB. También pueden incorporar bloques que permiten realizar funcionalidad como conmutación a bordo.

Este tipo de transpondedores tienen la ventaja de presentar una mejor eficiencia en términos de potencia requerida para el balance del enlace, sin embargo presentan una estructura más compleja.

¹⁰ ETSI EN 301 545-2 V1.2.1 (2014-04)

2.1.7 Enlace inter-satelital

Básicamente se conoce de dos tipos de enlaces entre los satélites de una constelación: El enlace **inter satélite** *Inter satellite link (ISL)*, es el enlace de control con otros satélites que están localizados en diferentes planos orbitales, mientras que un enlace **intra órbita**, es el enlace de control con otros satélites vecinos que están localizados en el mismo plano orbital.

2.2 Estándar DVB

El *DVB (Digital Video Broadcasting)* es una organización que promueve estándares aceptados internacionalmente para Televisión y comunicaciones de datos, constituyendo una familia de estándares de la ETSI desarrollados por el Grupo de Proyecto DVB. Las principales formas de DVB se resumen en la Tabla 2 [3]:

Tabla 2: Estándares DVB

ESTÁNDAR	USO/APLICACIÓN	DESCRIPCIÓN
DVB-S	Difusión por Satélite	Video por Satélite
DVB-T	Terrestre	Para difusión de Televisión Digital Terrestre (DTT)
DVB-C	Cable	Para la entrega de video por redes vía cable
DVB-RCS	Canal de Retorno Satelital	Para servicios interactivos con un canal de retorno
DVB-H	Portable	Servicios DVB para dispositivos portables
DVB-IPTV	Televisión sobre IP	Entrega de Televisión Digital sobre Protocolo de Internet
DVB-CI	Interface Común	Interface entre el Módulo Acceso Condicional (CAM) y el Host
DVB-GEM	Middleware de Ejecución Global	Middleware abierto para aplicaciones interactivas

DVB por el año 2009 publicó una **Segunda Generación de los Estándares DVB-S2, DVB-T2, DVB-C2, DVB-RCS2**. Además, para mantenerse al día con los desarrollos

tecnológicos y requerimientos del mercado, ha venido trabajando en nuevos estándares como DVB-3DTV, DVB-SH o extensiones complementarias como son DVB-S2X, DVB-CI Plus, DVB-T2 Lite, DVB-NGH, entre otros.

2.2.1 Estándar DVB-S y DVB-S2

El Sistema de Transmisión Digital para Satélite *DVB-S (EN 300 421)*, constituye el estándar inicial sobre el cual se basa DVB-S2.

El estándar DVB-S especifica el uso de esquemas de modulación QPSK, 8PSK y 16QAM junto con herramientas para la codificación del canal y corrección de errores.

Por su parte DVB-S2 (EN 302 307), Sistema de Segunda Generación para Satélite, hace uso de las últimas técnicas de modulación y codificación para lograr un rendimiento mejorado en un 30%, que se acerca al límite teórico de Shannon.

Sus características principales son [4]:

- Dispone de cuatro esquemas de modulación: QPSK y 8PSK típicamente utilizadas para aplicaciones de difusión; 16APSK y 32APSK para aplicaciones profesionales como servicios interactivos y *DSNG (Digital Satellite News Gathering)*
- Posee un esquema robusto de *FEC (Forward Error Correction)*, basado en la concatenación de *BCH (Bose-Chaudhuri-Hcquengham)* con codificación interna *LDPC (Low Density Parity Check)*, permitiendo una operación casi libre de errores (QEF) con 0.7 a 1dB del límite de Shannon.
- La tasa de código LDPC puede ser escogida entre 11 valores (1/4, 1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9 y 9/10); 4 constelaciones que producen un rango de eficiencia espectral de 2 a 5 [bits/s /Hz].
- Permite operación en modo *ACM (Adaptive Coding and Modulation)*, con lo cual es posible ajustar los parámetros de transmisión en una base de trama a trama en función de las condiciones propias de propagación del enlace para cada terminal satelital. ACM es principalmente proyectado para servicios interactivos de tipo unicast o aplicaciones profesionales punto a punto.
- Presenta compatibilidad hacia atrás con sistemas basados en DVB-S
- Un conjunto de tres factores de roll-off: 0.20, 0.25 y 1.35

DVB-GSE (Generic Stream Encapsulation)

El protocolo GSE (*Generic Stream Encapsulation*) proporciona un método flexible de encapsulación y fragmentación, que posibilita el uso de un programador inteligente para optimizar el rendimiento del sistema. Fue publicado como un estándar ETSI (TS 602 606) en Octubre del 2007 y su Guía de Implementación (TS 102 771) en Junio del 2009.

DVB-GSE, reside al mismo nivel que MPEG2-TS (*Transport Stream - ISO/IEC 13818-1*) en la capa de enlace, representando una alternativa más eficiente, flexible y compatible para llevar contenido basado en datagramas IP o unidades de datos de paquetes (PDU), como se muestra en la Figura 12.

El protocolo GSE no reemplaza a MPEG-TS sino más bien lo complementa. Ha sido diseñado como una *capa de adaptación* para proporcionar funciones de encapsulamiento a los paquetes provenientes desde la capa de red y fragmentación sobre flujos genéricos. Así, GSE proporciona un encapsulamiento más eficiente de los datagramas IP sobre paquetes de longitud variables en capa 2, los cuales son luego programados directamente en tramas de banda base en la capa física. Representa una opción disponible para todos sistemas de modulación DVB-S2, con lo cual se logra reducir bits adicionales (overhead).

Algunas de sus principales características son [5]:

- Soporta encapsulamiento multiprotocolo (IPv4, IPv6, MPEG, ATM, Ethernet, 802.1pQ VLANs, ...)
- Soporte de varios modos de direccionamiento: Adicionalmente de la dirección MAC de 6 bytes (incluyendo multicast y unicast), es compatible con un modo de dirección MAC corto, y un modo de dirección opcional de 3-Bytes.
- Un mecanismo para fragmentar los datagramas IP u otros paquetes de capa de red sobre tramas de banda base, para soportar modos de operación ACM / VCM.
- Extensibilidad: protocolos de enlace adicionales pueden ser incluidos a través de valores por tipo de protocolo específico (seguridad de capa 2, compresión de cabecera IP, ...)
- Baja complejidad de las implementaciones de hardware

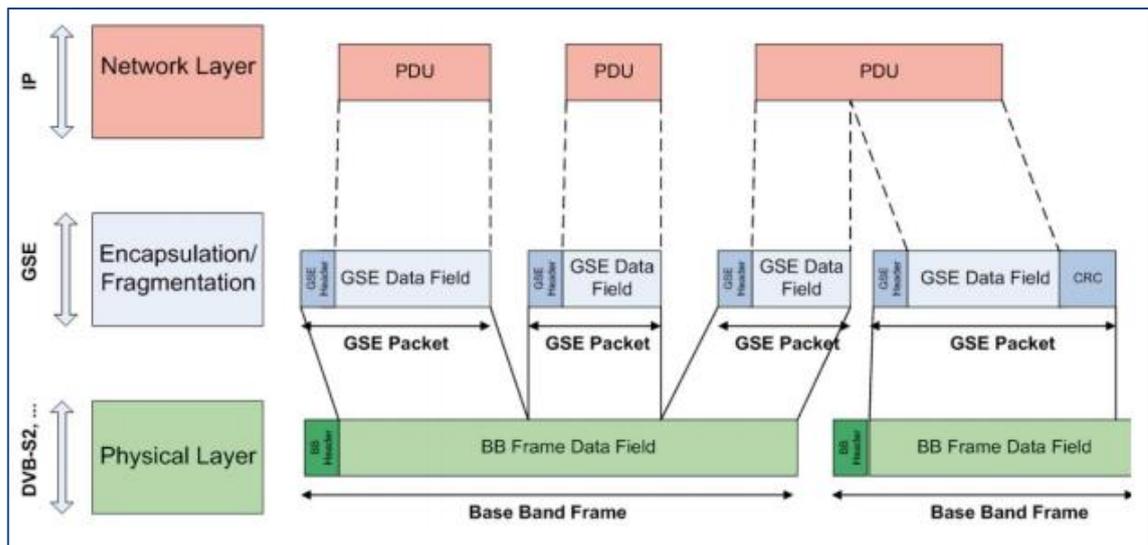


Figura 12: Encapsulamiento GSE sobre DVB-S2

Para la conformación de las tramas en BB en DVB-S2, se requiere que éstas siempre comiencen con la cabecera de un paquete GSE. Un planificador a nivel GSE permite una adecuada ubicación y posibilita lograr eficiencia.

A nivel de GSE, se puede proveer soporte para priorización por *QoS* (*Calidad de Servicio*). El planificador GSE puede ser implementado de modo que realiza un arreglo eficiente de los paquetes GSE dentro de las tramas en banda de base, con lo que se trata de evitar el relleno tanto como sea posible. En caso de no proveer priorización *QoS*, los paquetes de GSE que contienen los fragmentos PDU serán enviados en tramas consecutivas.

El añadir *CRC-32* (*código de redundancia cíclica de 32b*) tiene su razón, dado que existe la probabilidad que alguno de los fragmentos GSE se pierdan o dañen durante la transmisión, por lo que el receptor a nivel del PDU se apoya en el cálculo de un *CRC-32* para volver a reconstruir cada PDU fragmentado.

2.2.2 Estándar DVB-RSC/RCS2

DVB-RCS (*EN 301 790*) fue publicado por primera ocasión en el año 2000, tras lo cual ha sufrido algunas actualizaciones.

DVB-RCS2 permite a los usuarios una conexión de Internet de banda ancha sin la necesidad de ninguna infraestructura terrestre local, con condiciones mejoradas como se puede observar en la Tabla 3.

Tabla 3: Principales características DVB-RCS y DVB-RCS2

Features:	DVB-RCS	DVB-RCS2
Harmonised management & control	None	Yes (optional)
Harmonised IP-level QoS	None	Yes
Multiple virtual network support	None	Yes
Security	Single solution	Support for multiple security systems, for applications with widely different requirements
Return link access scheme for traffic	TDMA, continuous carrier	TDMA, continuous carrier, random-access
Modulation schemes	QPSK	Linear: BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM, Constant-envelope: CPM
Channel coding	RS/convolutional, 8-state PCCC turbo code	16-state PCCC turbo code (linear modulation), SCCC (CPM)
Burst spread-spectrum	Burst repetition	Direct-sequence
Return link adaptivity	Limited support	Inherent in air interface (TDMA and continuous carrier)
Bandwidth efficiency	N/A	30% improvement over DVB-RCS

Por otro lado, al tratarse de un estándar oficial, DVB-RCS2 con sus mejoras es regularmente impulsado por los fabricantes de tecnología satelital.

La especificación completa DVB-RCS2 ha sido actualizada al años 2014, siendo dividida en tres especificaciones independientes [6]: *System Design (ETSI TS 101 545-1)*, *Lower Layer Specification (LLS) (ETSI TS 101 545-2)*, *Higher Layer Specification (HLS) (ETSI TS 101 545-3)*, que son acompañadas por sus correspondientes guías de implementación (ETSI TR 101 545-4, 545-5).

Soporta varios esquemas de acceso haciendo el sistema mucho más receptivo, y por lo tanto más eficiente que los sistemas de satélite tradicionales. Estos esquemas de acceso se combinan con un **esquema de transmisión flexible** que incluye la evolución del estado de la técnica en **codificación-turbo**, varias opciones de **tamaño de ráfaga** y **opciones eficientes de encapsulamiento IP**. Estas herramientas permiten a los sistemas una puesta a punto para un mejor uso de los recursos de potencia y de ancho de banda del satélite.

Recientes publicaciones: DVB-S2X

DVB-S2X ha sido publicado como ETSI EN 302 307 en Marzo del 2014, ofreciendo una extensión de DVB-S2 que posibilita características adicionales.

La nueva generación de redes satelitales interactivas de banda ancha DVB-S2X puede traer ganancias en capacidad de hasta alrededor de 20% con respecto a DVB-S2. La mayor parte de la ganancia proviene de la explotación de un factor de roll-off.

Sin embargo, dada la fecha de aprobación oficial la extensión S2X deberá esperar por algún tiempo para que se encuentre incorporada de forma masiva en los equipos comerciales de bajo costo.

2.3 TCP (Transport Control Protocol)

2.3.1 Contexto de operación de TCP.

En la actualidad la tendencia de las comunicaciones es hacia converger y basarse en IP, de allí nace el paradigma “*Todo sobre IP*”, siendo una gran parte de las comunicaciones realizadas conjuntamente con el *Protocolo de Control de Transporte (TCP)*. Así la tecnología, basada en el conjunto de protocolos, TCP/IP es la más difundida actualmente.

TCP es un protocolo localizado en la capa 4 del modelo de referencia ISO/OSI, que provee un servicio confiable orientado a conexión entre los extremos o puntos finales de una comunicación. También prevé mecanismos para el *control de flujo y control de congestión* en una comunicación punto a punto, mediante el ajuste del tamaño de su ventana.

La ventana TCP corresponde al número máximo de segmentos que puede entregar el emisor a la red, sin ser necesario se haya recibido la confirmación (ACK) correspondiente a los segmentos que fueron previamente enviados.

Es importante de cara al presente trabajo resaltar que TCP habiendo sido diseñado para redes típicamente terrestres, donde su comportamiento frente a la congestión y control de flujo afectan el desempeño de un sistema de comunicación, se presentan varias restricciones a su uso en una una red satelital.

2.3.2 Limitaciones de TCP en una red satelital

El rendimiento de TCP puede verse afectado, por características inherentes al enlace satelital, entre los principales [7]:

- *Retardo*: Es una de las restricciones más importantes, consecuencia de las grandes distancias de propagación de la señal, lo cual afectará el throughput que se puede alcanzar y la gestión de ACKs. Además, el retardo afecta al RTT (*Round Tripe Time*), gestión de ACKs y algunos algoritmos de control de congestión de TCP.

- *Errores de transmisión*: Un canal satelital típicamente presenta un mayor BER respecto a las redes terrestres. TCP ante una pérdida de paquetes, interpreta existe congestión en la red, reajustando los parámetros de la comunicación (disminuyendo el

tamaño de la ventana). Especialmente en la banda Ka (30/20 GHz), las condiciones climáticas afectan en gran medida la disponibilidad del enlace.

- *Conectividad Intermitente*: Resultado del handover que se realiza al transferir la comunicación desde el satélite activo al siguiente satélite adyacente en la constelación.
- *Asimetría de enlaces*: Producto de la restricción de velocidad de datos en el enlace de retorno, como consecuencia de la limitación de potencia disponible.
- *Tasa de variable de bits*: Las técnicas de codificación y modulación adaptativas (ACM) introducirán una tasa de bits variable que podría interactuar TCP. Por un lado, TCP no será capaz de beneficiarse rápidamente del aumento de tasa de bits y, por otro lado, una disminución repentina de ancho de banda puede conducir a la congestión.

2.3.3 Variantes de TCP

En la Figura 13 se muestra una vista cronológica en el tiempo de las principales variantes de TCP [8].

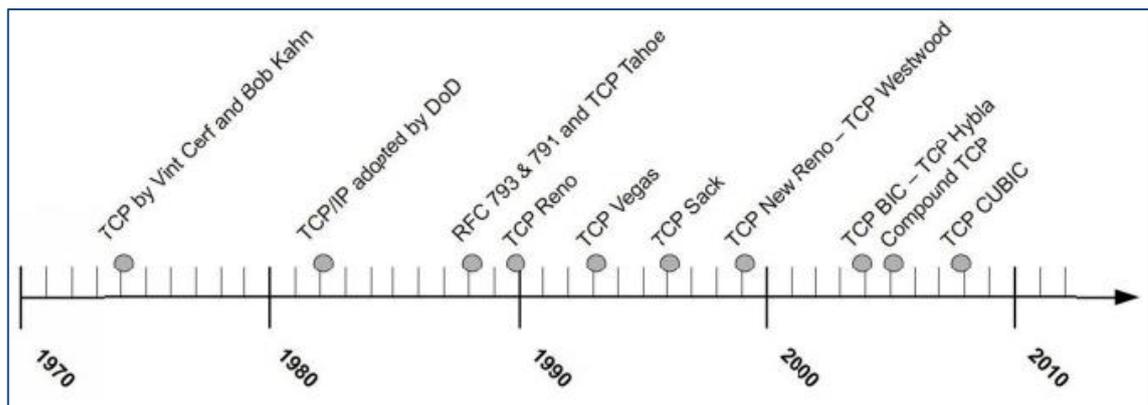


Figura 13: Principales variantes de TCP.

Posterior versiones que han sido desarrolladas, entre las principales, se tienen: *eXplicit Congestion Control Protocol (XCP)*, *Stream Control Transport Protocol (SCTP)* o *Space Communications Protocol Standard Transport Protocol (SCPS-TP)*.

Otra nueva variante es TCP Noordwijk (TCPN), basada en la técnica de transmisión por ráfaga y diseñada para transferencia de datos sobre DVB-RSC.

3 Estado del Arte: La Red satelital O3b

O3b (the other 3 billion) es una nueva red satelital de última generación, orientada a proveer servicios de comunicación utilizando una constelación de satélites no geoestacionarios de tipo (MEO), los cuales localizan su órbita en el plano ecuatorial como se muestra en la Figura 14 [9], con lo que el sistema puede alcanzar una cobertura sobre la superficie de la tierra donde se calcula habitan 3 billones de personas la mayoría de ellas sin acceso al servicio de comunicaciones, resultando así su acrónimo O3b.



Figura 14. Constelación de satélites O3b

La red O3b es la única red comercial con satélites de comunicación del tipo HTS de órbita media (MEO), que con un bajo número de satélites al estar localizados en el plano ecuatorial le permiten alcanzar una extensa cobertura geográfica. Adicionalmente, es una red escalable que está planificada para incorporar más satélites (alrededor de 20) en su mismo plano orbital en función del crecimiento de la demanda.

Los principales inversionistas e impulsores de la red satelital O3b son: *SES, Google, Liberty Global, HSBC Principal Investments, Northbridge Venture Partners, Allen & Company, Banco de Desarrollo de Sur de África, Sofina, Satya Capital y Luxempart* [10].

El diseño integración y pruebas de este sistema satelital estuvo a cargo de la empresa *Thales Alenia Space*.

3.1 Objetivo

La red satelital O3b fue diseñada con el objetivo de proveer servicios de comunicaciones a los clientes de mercados emergentes, regularmente ubicados en

amplias zonas geográficas no conectadas o desatendidas, consecuencia de la poca infraestructura de telecomunicaciones existente en lugares con baja densidad poblacional o por condiciones geográficas particulares como son regiones montañosas, selvas, o zonas protegidas por legislación ambiental, etc. que dificultan el despliegue de infraestructuras de comunicación tradicionales.

Geográficamente, O3b ha definido a sus *potenciales clientes* como aquellos que se encuentran localizados entre los **45 grados de latitud norte y 45 grados de latitud sur**, que aproximadamente alcanzan unos 3 billones de habitantes entre estas latitudes.

Actualmente, el segmento espacial está constituido por una constelación de 8 satélites MEO, donde en siguientes etapas este sistema escalable podrá ampliarse hasta 16 satélites, de modo que el incremento en los satélites podrá realizarse según crezca la demanda del mercado.

Inicialmente O3b había lanzado 4 satélites disponibles desde junio del 2013. Recientemente en julio del 2014, tras superar algunos inconvenientes técnicos no previstos, se ejecutó un nuevo lanzamiento que permitió finalmente poner en órbita su segundo lote compuesto por 4 satélites adicionales y completar la constelación planificada para incorporar con sus características mejoradas a personas, empresas, gobiernos que son ajenos al uso de Internet o poseen una conexión deficiente. Así, O3b ha duplicado el tamaño de su constelación a un total de **8 satélites en órbita disponibles para servicio desde agosto del 2014**. A corto plazo, durante el 2015, se prevé que 4 satélites adicionales se pondrán en marcha como parte de la red [11].

3.2 Arquitectura y Características de la Red

3.2.1 Tipo de Red

La red O3b presenta una arquitectura tipo **estrella**, con un elemento central denominado Gateway (o Hub), el cual hace de intermediario para la comunicación entre los *Terminales Satelitales Interactivos (TSI)* para acceso, como se muestra en la Figura 15.

En este tipo de arquitectura en estrella, se requiere un doble salto a través del satélite (SAT) para comunicarse entre TSIs, siendo el RTT (*Round Trip Time*) el doble que en el caso de un sistema con arquitectura tipo malla. Sin embargo, el tener un Gateway (GW) como elemento central que gestiona la red tiene la importante ventaja que permite reducir el costo y complejidad de los TSIs para los usuarios.

La comunicación en ambos sentidos, tanto hacia el ST (Forward) como de retorno hacia el Gateway (Return), es cursada cíclicamente a través de cada uno de los satélites

en permanente movimiento pertenecientes a la constelación, permitiendo una comunicación interactiva sin requerir el uso de infraestructura de comunicación terrestre para el canal de retorno.

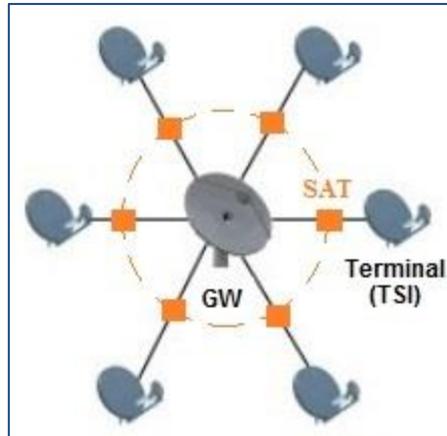


Figura 15: Topología en estrella

3.2.2 Cobertura

O3b ha proyectado su cobertura geográfica para cubrir a sus potenciales clientes que se encuentran localizados en la superficie terrestre entre los 45 grados de latitud norte y 45 grados de latitud sur. Sin embargo, puede alcanzar los +/- 62 grados de latitud con menores condiciones de calidad.

Los principales lugares a los cuales se orienta su servicio son América Latina, África, el Medio Este, Asia y el Pacífico, como se ilustra en la Figura 16 [9].

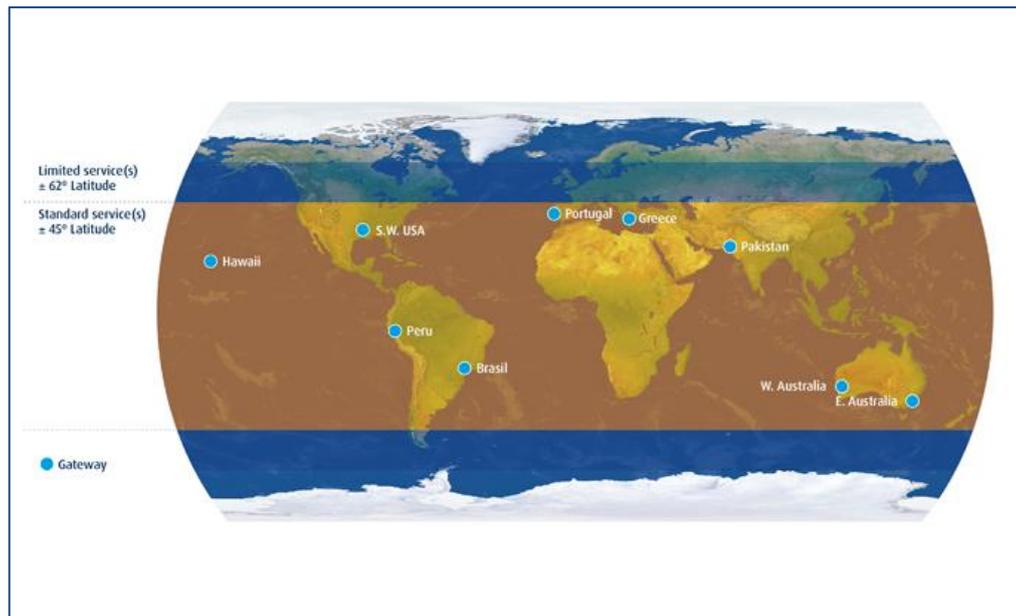


Figura 16: Área de cobertura de la constelación de O3b

3.2.3 Segmento Espacial

Es una de las partes más importantes para caracterizar el tipo de red satelital, constituida por la *carga útil* y la *plataforma*. La carga útil está compuesta fundamentalmente de las antenas y el equipamiento electrónico de los satélites para soportar la transmisión de la señal, mientras que la plataforma consiste de todos los subsistemas que permiten operar a la carga útil.

En la constelación O3b, cada satélite tiene 20 transpondedores de banda ancha, 10 de los cuales por lo general se utilizan (en la configuración para operación normal) para los enlaces de acceso hacia las estaciones terrenas de los clientes y 10 para los enlaces hacia los gateways¹¹.

De la red O3b, se resumen las características relevantes al presente trabajo:

- Constelación: 8 satélites (escalable)
- Antenas por satélite: 12
 - Para Terminal: 10
 - Para Gateway: 2
- Altura orbital: 8,062 km (MEO)
- Tipo de antenas: Direccionables ($\pm 26^\circ$)
- Amplificadores: 12 (Tipo TWTA 65W)
- Espaciamiento orbital: 45 grados
- Planos orbitales: 1
- Tipo de órbita: Ecuatorial
- Inclinación orbital: <0.1 grados
- Período orbital: 360 minutos
- Frecuencia de órbita: 4 veces por día (5 con la rotación de la tierra)
- Transpondedores: Transparentes tipo "bend pipe" (sin OBP).
- Ancho de banda del transpondedor: 216 MHz
- No utiliza enlaces inter-satélites

En el satélite, cada haz de cliente se implementa mediante una pequeña *antena parabólica cardánica* de seguimiento orientable para un total de doce antenas por satélite. Ninguna de sus antenas tiene como función el establecimiento de enlaces inter-satelitales.

Una importante tendencia de desarrollo en redes satelitales, se puede resumir en una evolución hacia nuevas arquitecturas multihaz con procesado, conmutación a bordo, gran eficiencia de recursos, mejora en prestaciones, así como un enfoque hacia la utilización y optimización en la banda Ka.

¹¹ <http://forum.nasaspaceflight.com/index.php?action=dlattach;topic=14296.0;attach=265487>

3.2.4 Segmento Terrestre

O3b al ser una constelación de satélites con transpondedores transparentes tipo “bent pipe” y sin enlaces inter-satelitales, requiere el uso de dispositivos más inteligentes en el segmento terrestre que tomen a cargo las funciones para mantener la comunicación continua a nivel de usuario.

Red de Gateways

El núcleo en tierra de la red O3b está compuesto de un conjunto de 9 Gateways estratégicamente distribuidos sobre la superficie de la tierra. Los países sobre los que se han desplegado los Gateways se mostraron anteriormente en la Figura 16 obedeciendo a razones de distribución y cobertura.

El conjunto de Gateways se interconectan mediante fibra óptica hacia el núcleo de grandes infraestructuras de comunicación y al backbone de Internet a través de importantes *POPs (Points of Presence)* como se muestra en la Figura 17, logrando así también conectividad a los principales sitios de agregación de contenidos. El Gateway para la región que contiene a Ecuador se ubica en las instalaciones de Telefónica en Lurin - Perú.

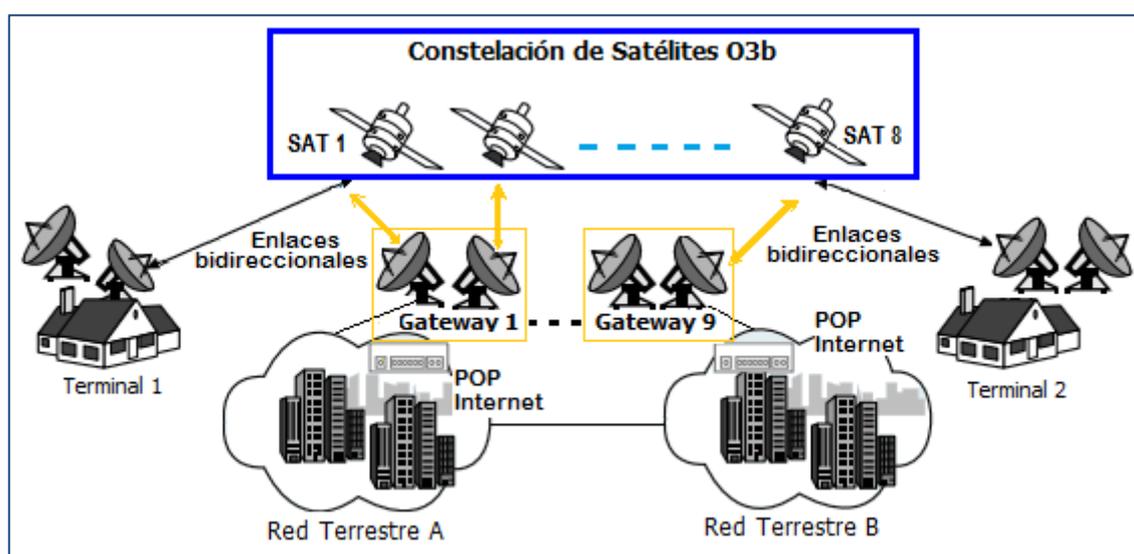


Figura 17: Conexión de la Red de Gateways O3b

Los Gateways incorporan sistemas de telemetría y comando necesarios para controlar los satélites durante etapas tempranas de su lanzamiento y completar su integración con el *SOC (Satellite Operations Center)* [12].

Los Gateways cuentan con tres antenas de 7.3m de diámetro, dos principales para mantener la comunicación durante el proceso de seguimiento a los satélites y la tercera sirve como respaldo. Su diseño posibilita que las antenas mantengan un ángulo

de elevación sobre los 15° con respecto al plano terrestre, lo cual previene interferencia de lóbulos laterales con otros usuarios.

En estas instalaciones se tiene una función dual, siendo la principal el control del sistema y la otra función el servicio a grandes clientes.

Región de servicio:

En el sistema O3b se tienen **7 regiones de servicio**, siendo su número determinado por la cantidad de satélites activos (n-1), conjuntamente con el objetivo de diseño del sistema para proveer comunicación continua a los usuarios finales.

Cada una de las regiones de servicio ilustradas en la Figura 18, está asociada al menos a un Gateway que permite la conexión a la infraestructura de fibra terrestre. Los dos haces para Gateway disponibles en cada satélite pueden ser independientemente apuntados a dos diferentes Gateways adyacentes cercanos o dentro del área de cobertura regional para una mayor flexibilidad.

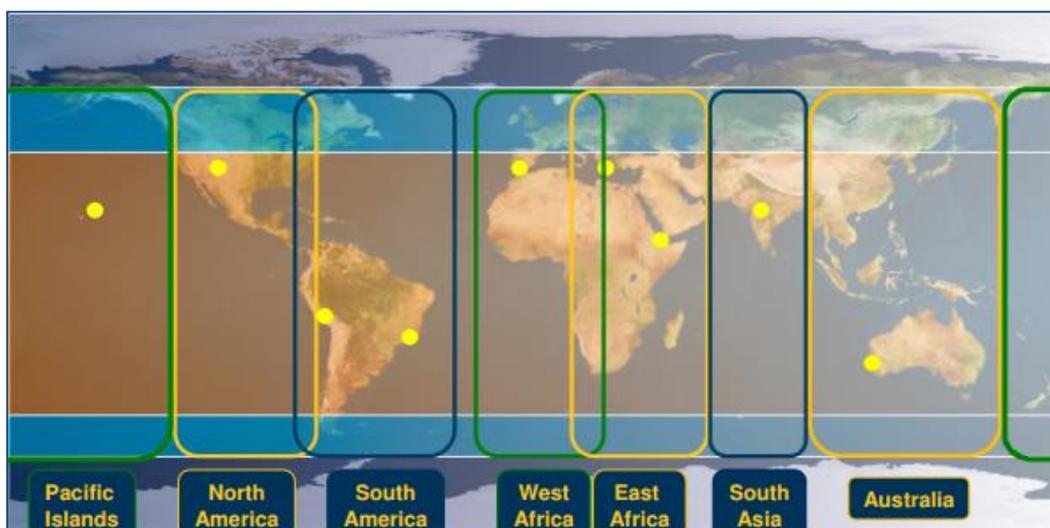


Figura 18: Distribución de Gateways y Regiones de Servicio.

Un punto a resaltar es que el tamaño de los haces que cubren el segmento terrestre no es el mismo. El haz que ilumina a los TSIs de clientes tiene un tamaño de **700Km** de diámetro, mientras que el haz que ilumina el Gateway o Telepuerto tiene típicamente un tamaño de **50Km**.

Durante la operación normal del sistema (previo al handover), la región de servicio sobre la cual se encuentra un satélite podría ser iluminada hasta por los 10 haces de clientes que posee cada satélite, esto se logra gracias a la reutilización y polarización de frecuencias.

Al final de su paso sobre la superficie por un periodo de 45 minutos, el satélite que ha estado activo manteniendo la comunicación se mueve a la siguiente región en

dirección Este y el siguiente satélite adyacente de la constelación aparece por el Oeste para tomar el papel de elemento activo en la comunicación en dicha región. Esto requiere un traspaso (handover) desde el satélite activo hacia el próximo satélite que estará visible sobre cada región cíclicamente.

Centro de control de red (NCC)

El NCC es un elemento importante que controla la sesión, asignación y acceso a recursos para la comunicación, configuración OBP (de ser el caso), y en general los procesos en tiempo real.

Centro de gestión de red (NMC)

Es un elemento utilizado para las funciones de configuración, operación y administración de la red.

Estación terrena de cliente

Son los diferentes Terminales Satelitales Interactivo (TSIs) que varían en la red O3b, siendo diseñados en función de los requerimientos específicos de cada cliente. Así, sus elementos se definirán en función a varios parámetros como son: los servicios a cursar, ubicación geográfica, condiciones meteorológicas, recomendaciones regulatorias, que se analizarán más a detalle en el capítulo 4.

Típicamente los terminales O3b tienen diámetros de antena en el rango de 1.2 hasta 4.5 metros de diámetro, lo que define sus típicos niveles para su uso¹²:

- **Nivel de servicio 1**, típicamente con antenas de 4,5 metros de diámetro que proporciona servicios de trunking de Internet o servicios empresariales.
- **Nivel de servicio 2**, típicamente 1,2 a 2,4 metros de diámetro de la antena que prestan servicios de backhaul celular y servicios de red VSAT o TSI.

Comercialmente, como consta en la web del fabricante, para servicios FSS se dispone de antenas de 1.8m, 2.4m y 4.5m para los TSIs.

Una diferencia en los TSIs de O3b, respecto de los tradicionales terminales satelitales GEO, es que el diseño incorpora un modo de handover denominado conexión antes de caída “make before break” desde un Gateway a otro adyacente, para lo cual por unos instantes el modulador en el sistema del TSI alimenta simultáneamente a dos cadenas de transmisión paralelas, como se muestra en la Figura 19 [13], con el objetivo de hacer posible un flujo constante de tráfico y mantener las sesiones IP.

¹² file:///C:/Users/Admin/Downloads/O3b.pdf

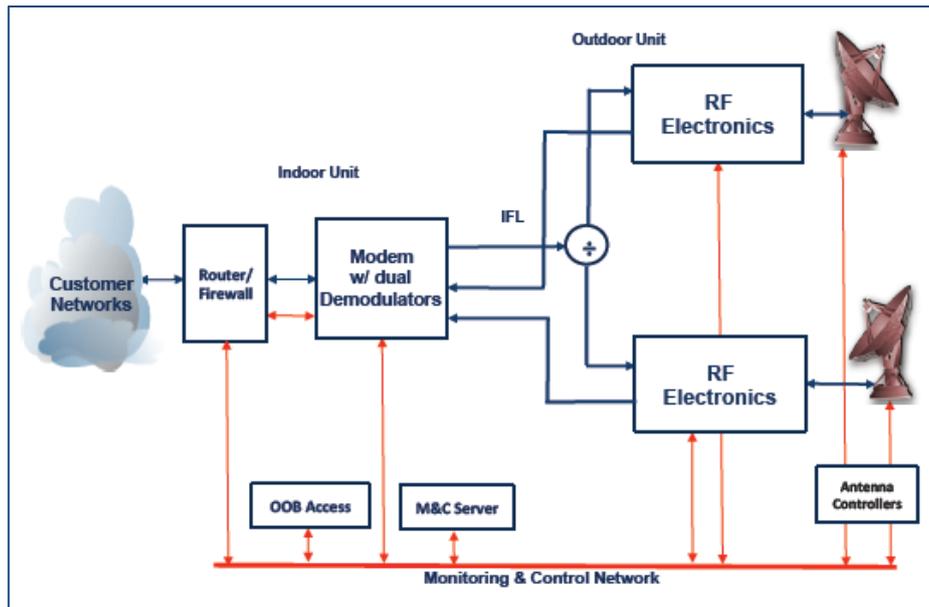


Figura 19: Terminal Satelital (TSI) con doble antena

3.2.5 Enlace con el satélite

Las principales características que se presenta para el enlace satelital en la red O3b son:

- Operación: Banda Ka.
- Rango de frecuencias:
 - Down-link: 17,7 hasta 20.2 GHz.
 - Up-link: 27,5 hasta 30.0 GHz.
 - Ancho banda: 1.5GHz
- Cobertura del haz: 700 Km de diámetro (hacia Cliente)
- Hasta 1,2 Gbps por haz (600 Mbps x 2)
- Ancho de banda del transpondedor: 216 MHz; 2 x 216 MHz por haz

Considerando que por una parte se tiene 7 satélites activos (en constelación actual de 8 satélites) y estos cubren las 7 regiones de servicio, y por otra que cada satélite tiene 10 haces para clientes (2 para Gateways), resulta que hasta 70 haces para terminales de clientes podrían llegar a estar permanentemente activos con la totalidad de la constelación de satélites.

En la Figura 20 [14], se muestra la distribución de frecuencias en la banda Ka para los enlaces de subida (uplink) y bajada (downlink) para la constelación de satélites O3b, así como la frecuencia utilizada para telemetría y control.

Particularmente los terminales de usuario tienen asignado para: downlink 19.7 a 20.2 GHz y uplink 29.5 a 30.0 GHz.

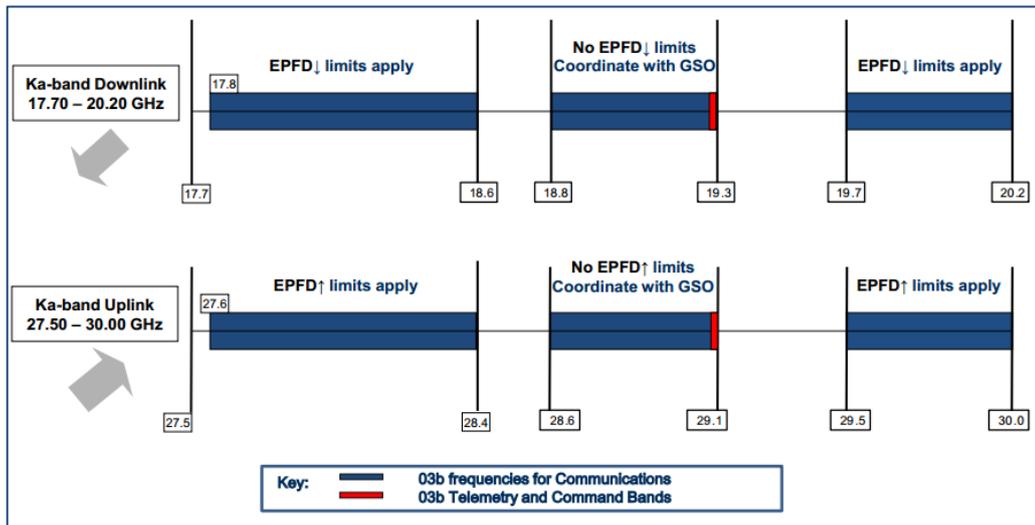


Figura 20: Uso por O3b de las frecuencias en banda Ka.

3.2.6 Handover del sistema

El proceso de handover sucede en un intervalo específico, consistiendo en pasar desde un satélite hacia el siguiente más cercano en la constelación el rol como elemento activo en la comunicación mientras se encuentran en movimiento y se realiza de un modo transparente al usuario.

En el sistema O3b, dado el periodo orbital de sus satélites, para mantener una comunicación permanente hacia los TSIs, se requiere hacer un handover cíclico hacia el próximo satélite adyacente en la constelación.

El handover se realiza con una frecuencia de 45 minutos de acuerdo al periodo orbital. Tiene por objetivo que el nuevo satélite tome control de la comunicación para una nueva área de servicio, teniendo un intervalo de duración entre 1 a 2 minutos y se produce cuando el satélite (n) que mantiene la comunicación activa se aleja del Gateway o TSI mientras el próximo satélite (n+1) en la órbita ecuatorial comienza a estar a la vista del Gateway del sistema O3b en una región de servicio determinada.

Antes del intervalo de handover, el Gateway (O3b Teleport) y los Terminales Satelitales (ST) o Terminales de cliente (Customer Terminal) como muestra la Figura 21, están utilizando el satélite n para transmitir y recibir la información..

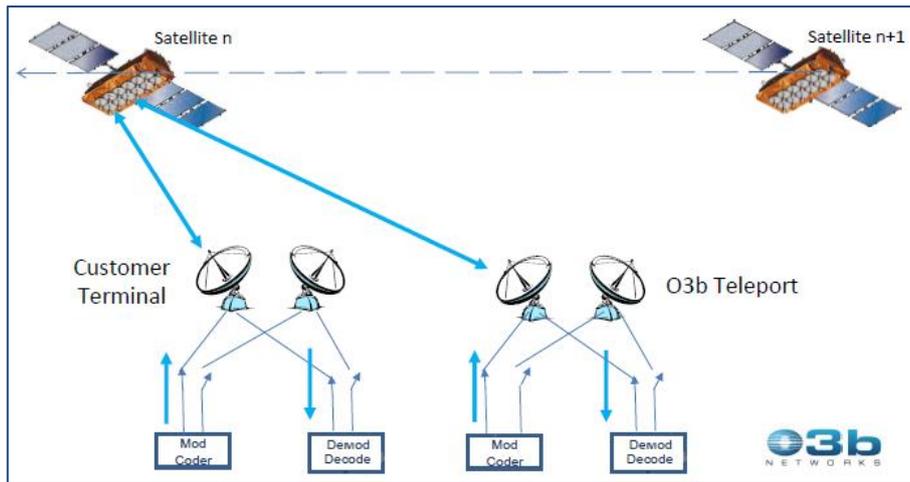


Figura 21: Comunicación antes del Handover

Posteriormente, como se muestra en la Figura 22, durante el handover las unidades de control en el Gateway y en los Terminales de Cliente conmutan hacia la otra antena que está apuntando al satélite (n+1), durante este intervalo **ambos satélites están activos** para la comunicación, recibiendo la información enviada simultáneamente por las dos antenas desde el Terminal Satelital.

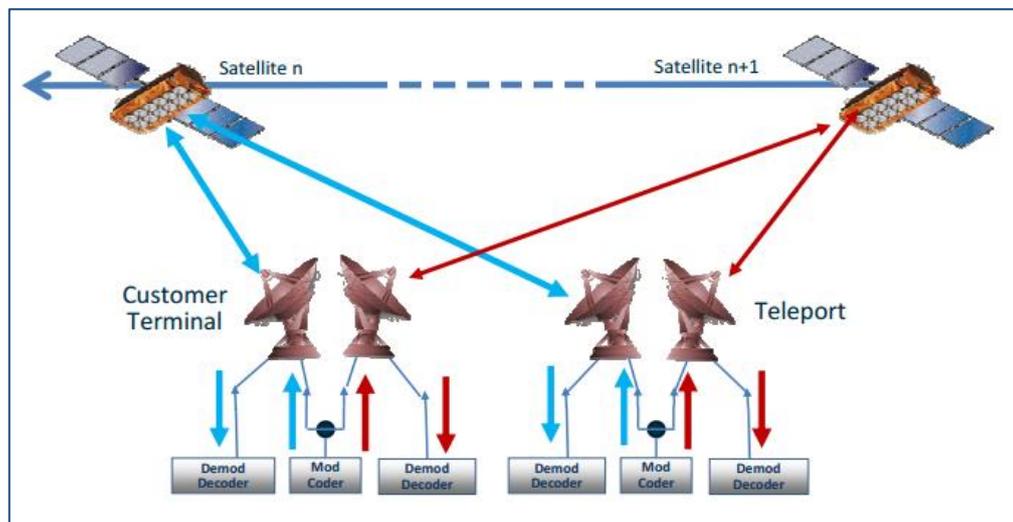


Figura 22: Comunicación simultánea durante el Handover

Finalmente, una vez se ha estabilizado la comunicación con el satélite (n+1), se inhabilita la comunicación con el satélite n, con lo que a partir de este momento tanto el Gateway como el Terminal de Cliente se encuentran transmitiendo y recibiendo solo con el satélite (n+1), como se puede apreciar en la Figura 23.

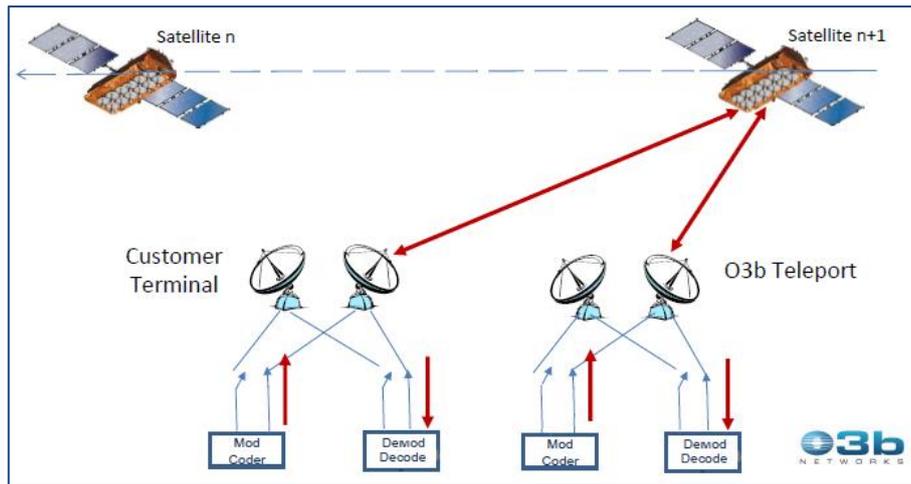


Figura 23: Comunicación después del Handover

3.3 Comparativa de Sistemas No Geoestacionarios (NGEO)

Tradicionalmente, sistemas NGEO tales como Iridium y Globalstar, han desplegado sus constelaciones en órbitas de menor altitud y están diseñados para ofrecer servicios de voz y servicios con baja tasa de transmisión. Para proporcionar estos servicios de forma ubicua, a cualquier ubicación sobre la superficie de la Tierra, requieren de un gran número de satélites que describan su trayectoria en varios planos orbitales regularmente inclinados.

En la Tabla 4 se muestra una comparativa de las principales características en función de las órbitas satelitales NGEO [15].

En una red de satélites la principal ventaja de utilizar una órbita más baja que la órbita GEO es que la latencia de ida y vuelta (RTT) puede ser significativamente reducida mejorando el rendimiento de ciertas aplicaciones.

Cabe indicar, que recientes constelaciones MEO desplegadas prefieren utilizar orbitas cuya inclinación es muy cercana a 0° grados, es decir la trayectoria de los satélites se realiza en el plano ecuatorial, como es el caso de la constelación O3b.

Tabla 4: Comparativa de sistemas satelitales N GEO

Propiedades Orbitales	LEO	MEO
Periodo Desarrollo	Largo	Corto
Costo lanzamiento & satélite	Máximo	Máximo
Vida útil de satélite (años)	3–7	10–15
Congestión	Baja	Baja
Daño de Radiación	Cero	Pequeño
Periodo Orbital	<100 min	8-12 horas
Inclinación	90 grados	45 grados
Cobertura	Global	Global
Rango de altitud (km $\times 10^3$)	0.5–1.5	8–20
Visibilidad al Satélite	Short	Medio
Handover	Muy alto	Medio
Variaciones de Elevación	Rápido	Lento
Excentricidad	0 a Alta	Alta
Terminal de mano	Posible	Posible
Complejidad de la red	Alta	Media
Potencia de Tx (antena)	Baja	Baja
Ganancia	Corta	Media
Retardo de Propagación	Bajo	Medio
Pérdida de Propagación	Alta	Media

3.4 Otras Redes Comerciales N GEO

Pocos sistemas comerciales de comunicación han sido construidos y desplegados para las órbitas N GEO, los más conocidos son **Iridium** y **Globalstar**. Otros sistemas que han sido propuestos son Teledesic, Celestri, ICO, etc. [13]

3.4.1 Iridium

Es un sistema comercial LEO que funciona como una red de comunicación personal inalámbrica basada en satélites interconectados. Posee la constelación de satélites más grande, su área de servicio cubre toda la superficie de la tierra incluyendo la superficie polar.

Iridium [16] cuenta con una constelación formada por 66 satélites de órbita baja (LEO) y 6 satélites de respaldo (backup), más la infraestructura de plataforma terrestre requerida para el comando, monitoreo y control.

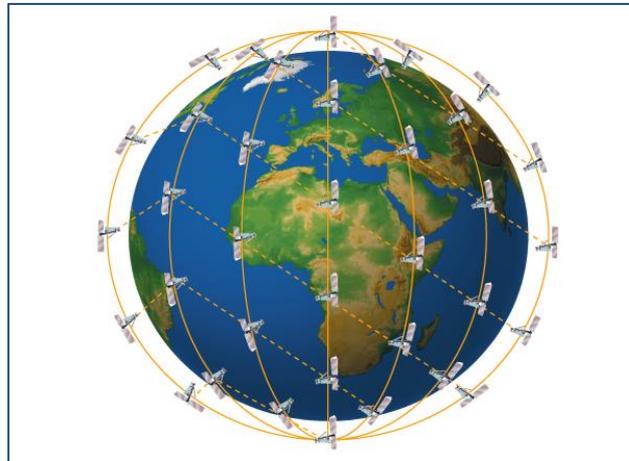


Figura 24: Constelación de Satélites Iridium

Los satélites describen su trayectoria en órbitas casi circulares a unos 780 km sobre la superficie de la tierra. La constelación esta agrupada en 6 planos que contienen órbitas de tipo polar con una inclinación de 86 grados respecto al Ecuador, cada órbita contiene 11 satélites operacionales equidistantes y en una segunda órbita ligeramente más baja se halla 1 satélite de respaldo. Los 11 satélites operacionales agrupados en una órbita viajan a una velocidad aproximada de 17.000 millas por hora, por lo que pueden completar un periodo orbital alrededor de la tierra en aproximadamente 100 minutos [17] y lo hacen en la dirección opuesta respecto a la dirección de trayecto de los satélites operacionales en las orbitas adyacentes.

La red global es soportada por una infraestructura en tierra compuesta por [16]:

- Centro de operaciones de la red satelital (SNOC). Es el nervio central entre las redes terrenas y espaciales IRIDIUM
- Gateway
- Estaciones terrenas
- Estaciones de Seguimiento, Telemetría y Control (TTAC)

Iridium ha venido trabajando en el Plan Iridium NEXT, donde ha planificado como hito de lanzamiento el 2015, teniendo previsto reemplazar totalmente su constelación de satélites actuales e introducir mejoras de capacidad e innovaciones en el mundo de las comunicaciones móviles.

3.4.2 Globalstar

Globalstar es un sistema tipo LEO, constituyéndose un proveedor de servicios de voz y datos móviles por satélite para clientes comerciales y consumidores recreativos

en más de 120 países, principalmente para uso en telefonía inalámbrica satelital. Sus velocidades para servicio de voz van de 2.4 a 9.6 Kbps y para datos 9.6 Kbps, utiliza la tecnología de codificación CDMA (Code Division Multiple Access).

Esta red satelital posee una constelación de órbita baja (LEO), es compuesta por 52 satélites móviles tipo "bent pipe", de los cuales 48 son satélites principales y se encuentran a 1.414 Km de la superficie terrestre, donde su trayectoria describe una órbita circular presentando un período de rotación de aprox. 113 minutos y están distribuidos en 8 planos inclinados a 52° con respecto al Ecuador, cada plano orbital contiene 6 satélites. Los 4 satélites restantes se colocan en órbitas intermedias, como reserva de los satélites principales [18].

Dentro de las principales características se tiene:

- **Cobertura completa y permanente del planeta entre los 70° y -70° de latitud** excluyendo únicamente los polos de la tierra.
- **Un servicio satelital redundante para cada terminal**, ya que cada terminal de usuario tiene un acceso simultaneo a 4 satélites, esto permite evitar los cortes de comunicación cuando un obstáculo surge entre el usuario y un satélite en particular. Es el único sistema que presenta esta ventaja.

Entre sus principales servicios ofrece: Telefonía de voz, SMS, Acceso a Internet, Rastreo Satelital (Personal, Vehicular, Aéreo, Marítimo), Monitoreo, Telemetría. En la Figura 25 se presenta un ejemplo de Rastreo Satelital Aéreo.



Figura 25: Rastreo Satelital Aéreo

Los satélites GPS únicamente calculan y determinan la ubicación de un dispositivo, luego ésta información es enviada a Internet mediante la red celular o GPRS (que tiene cobertura limitada), mientras que al ser enviada utilizando la red satelital se logra un seguimiento continuo.

En Febrero del 2013, Globalstar exitosamente completó el lanzamiento de su constelación de satélites de segunda generación, soportando servicios de voz, productos y servicios de datos unidireccionales y bidireccionales. Estos nuevos satélites han sido diseñados para tener una vida útil de 15 años, es decir el doble de tiempo que los satélites de primera generación.

Globalstar, indica en su página web, está en camino de convertirse en el primer proveedor de servicios satelitales, en lanzar, desplegar y explotar una constelación de satélites LEO de segunda generación. Este hecho a futuro representaría una nueva opción a analizar respecto a innovaciones y mejoras que podrían ser útiles para determinadas aplicaciones que requieran comunicaciones de datos.

3.5 Principales ventajas y restricciones de uso de la Red O3b

3.5.1 Por el tipo de órbita

Una de las ventajas distintivas de las redes satelitales N GEO es la reducción del retardo de propagación al estar los satélites a una altura más baja, lo que las hace particularmente una opción atractiva para cursar tráfico en tiempo real [19]. O3b es una Red única de satélites comerciales de órbita media (MEO) que ofrece una baja latencia, con tiempos RTT (Round Trip Time) para el envío y recepción de datos en menos de 150 milisegundos.

Por otro lado, al encontrarse los satélites más cerca de la tierra implica que las señales entre los satélites y las estaciones terrestres presentan menor atenuación. En el caso de O3b se tendrá 13 dB menos de pérdida, durante la trayectoria de la señal portadora [13]. Esto significa que los satélites MEO pueden ofrecer la misma densidad de flujo de potencia en la superficie de la tierra que los satélites GEO, pero al ser necesarios 13 dB equivalentes menos de Potencia Isótropa Radiada Equivalente (PIRE) se puede lograr con antenas de menor tamaño.

La principal desventaja frente a las redes satelitales con órbita GEO es que requieren sistemas complementarios para seguimiento y handover.

3.5.2 Por la frecuencia de trabajo

Ventajas de la banda Ka.

Existen significativos beneficios al operar en la banda de frecuencia Ka, entre los principales [20]:

- Un mayor ancho de banda de 1.5 GHz para el enlace de subida y bajada. Lo que implica 24 veces más respecto de la banda C y 8 veces de la banda Ku.
- Baja utilización y menor congestión respecto a sistemas GEO.
- Antenas relativamente más pequeñas en las terminales del cliente (típicamente hasta 1m de diámetro).
- Libre de interferencia terrestre (banda C utilizada en otras infraestructuras)
- Permite un mayor throughput
- Mejora de directividad haciendo la coordinación de frecuencias menos crítica desde la perspectiva de los reguladores.

La principal limitación en la banda Ka se presenta a causa del incremento de la atenuación por lluvia, al ser la frecuencia relativamente más alta como se muestra en la Figura 26. Esto se analizará con detalle para los diferentes ubicaciones propuestas en el siguiente capítulo. Por otro lado, la cobertura a una región de servicio es conseguida mediante un conjunto de haces puntuales, con lo cual se requiere múltiples haces con una reutilización de frecuencias para lograr una cobertura similar de un solo haz regional.

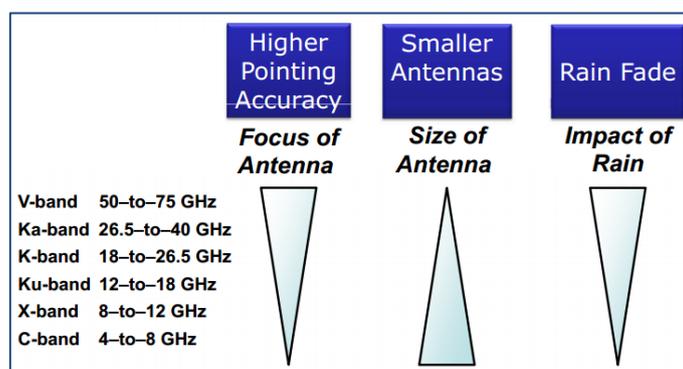


Figura 26: Comparativa entre bandas de frecuencia satelitales

3.5.3 Otros beneficios de la red O3b

Particularmente en los servicios de voz e interactivos, la latencia juega un rol determinante. En el caso de la calidad de una llamada de voz, de acuerdo al factor R del modelo la ITU (G. 114) asociando una escala MOS (*Mean Option Score*) como se aprecia en la Figura 27 [21], y tomando como referencia el caso de UMTS Release 99 para una comparativa, se presenta un MOS de 4.4 utilizando la infraestructura O3b

(constelación MEO) [22], mientras se tiene un valor de MOS de 3.8 para una red GEO tradicional.

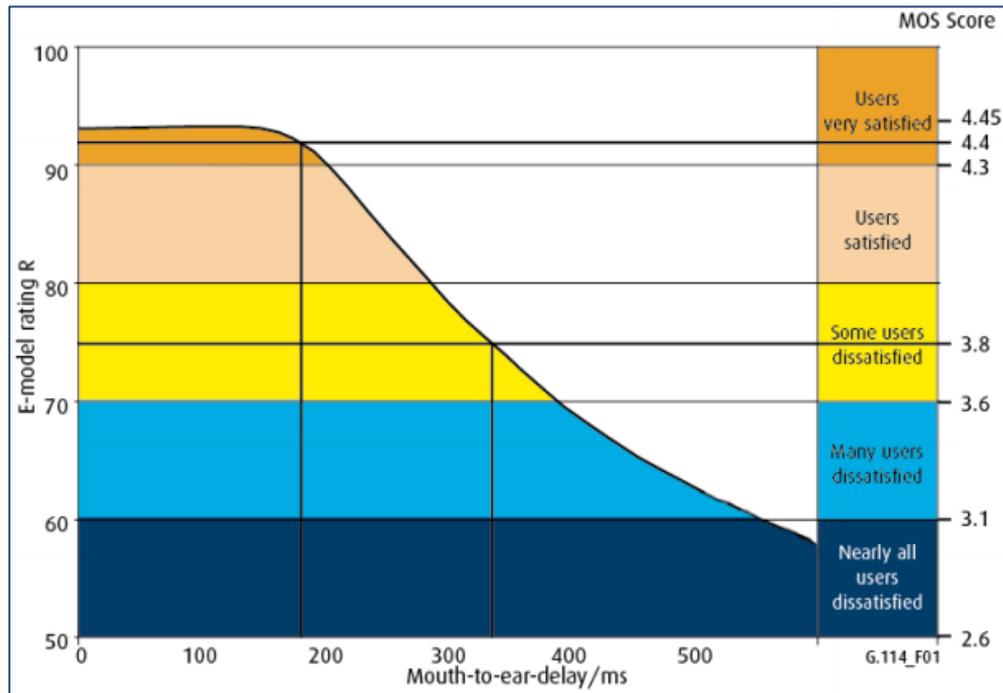


Figura 27: Calidad de Voz – Degradación MOS debido al retardo por latencia

Como resultado de una latencia menor a 150ms en la red O3b, se obtiene un elevado MOS de 4.4 para las llamadas de voz, produciendo al usuario final una mejor experiencia resultado de una calidad de voz más clara, sin eco o retardo, que se manifiesta durante la dinámica del intercambio de mensajes a través de constelaciones a mayor altitud.

Para el caso de servicios interactivos como *aplicaciones basadas en la nube, compras, mensajería o búsqueda en línea*, el impacto de la latencia es subjetivo. En síntesis las aplicaciones continúan funcionando y al variar la latencia la sensación subjetiva de inmediatez y usabilidad se ve degradada.

Características adicionalmente destacadas son:

- Throughput de hasta 1.2 Gbps por cada haz con un menor costo por bit transmitido. La constelación completa podría potencialmente ofrecer hasta 84Gbps de Throughput, mediante sus 70 haces simultáneos.
- Ancho de banda escalable para satisfacer la demanda del mercado, flexible en asignación a oficinas y con capacidad y calidad similares a la fibra [9].
- Flexibilidad para asignar dinámicamente el ancho de banda entre las distintas oficinas.

- Nueva experiencia en servicios al usuario: Comunicaciones de Voz más naturales y claras, video conferencia en tiempo real (sin demoras).
- Habilita el uso de servicios, soluciones o innovaciones previamente limitados a la red satelital, como por ejemplo juegos de video interactivos.

Uno de los aspectos importantes que en la actualidad está modificando el enfoque del diseño de redes y aplicaciones, es el aspecto de seguridad.

Para mejorar la seguridad, en la constelación O3b puede ser utilizado cualquier cifrado de enlace ya que los satélites operan en el esquema tipo “bent-pipe”, o sin procesamiento a bordo [13].

Otra importante característica es el menor tiempo de respuesta a una petición de datos por parte de un cliente a través del sistema. Ejemplos de prueba con aplicaciones de uso cotidiano han mostrado que un mayor tiempo de respuesta debido a una mayor latencia, como es el caso de sistemas GEO, resulta en más usuarios insatisfechos [22], disminuyendo el tiempo que usan el servicio, incrementando el *Churn* de abonados, lo que a la larga se refleja en menores ingresos para los proveedores.

Servicios y Mercado

Según se indica en la página Web de O3b¹³, los principales nichos de mercado proyectados serían el proveer comunicaciones para: plataformas petroleras, Gobierno, comunicaciones marítimas, tráfico de redes de portadores (carriers), canales móviles alternativos (mobile backhaul). Otro de los nichos sería extraer y transportar información de redes de sensores. En general O3b se enfoca como una alternativa viable en costo, prestaciones y tiempo de implementación donde la infraestructura de comunicación de datos tradicional de media milla sea escasa o de bajas prestaciones.

Finalmente, según expone en la página corporativa de O3b, es posible ofrecer servicios de **restablecimiento rápidos** para fibra óptica submarina y terrestre que hayan sido interrumpidos. Debido al gran ancho de banda disponible y baja latencia, los servicios de restablecimiento de servicios prestados de fibra provistos por satélites MEO pueden acercarse a la velocidad de datos y el rendimiento de las conexiones de fibra.

¹³ <https://www.o3bnetworks.com/services/>

3.6 Nuevos actores en el acceso a Internet.

Unas 2,700 millones de personas alrededor del mundo tienen acceso al Internet, lo que representa un 37.9% de la población, sin embargo la tendencia a conectarse se está desacelerando según el informe “Estado de la conectividad 2014” emitido por Internet.org organización patrocinada por Facebook.

Según el informe en la actualidad hay 4,4 mil millones de personas sin acceso a Internet, lo que representa cerca de 2/3 partes de la población, siendo las regiones con mayor acceso las constituidas por países desarrollados en Norte América o Europa, mientras que regiones como América Latina & el Caribe con países en vías de desarrollo, como se muestra en la Figura 28, están lejos aún con una tasa de 46,7% de población que accede a Internet al menos una vez al año.



Figura 28: Población por regional con acceso a Internet al menos una vez al año.

Para impulsar el crecimiento de acceso, gigantes como **Google o Facebook** y otros, han visto la necesidad de patrocinar la expansión de conectividad a Internet. Para ellos, parte de su estrategia es desarrollar planes para apoyar el conectar los siguientes 1.000 millones de personas, desde lugares remotos o con baja densidad poblacional especialmente aquellas que viven en África y Asia.

Facebook apoya la iniciativa denominada Internet.org, cuyo objetivo es promover la conectividad y hacer frente a las barreras que se presentan actualmente a 2/3 de la población mundial que no tienen acceso a Internet. Esta iniciativa aglutina también a

líderes de la tecnología como Samsung, Nokia, Ericson, Qualcomm, MediaTek, Opera, así como organizaciones sin fines de lucro y otros interesados en promover el acceso.

El Laboratorio de Conectividad de Facebook está trabajando en la construcción de aviones no tripulados, satélites y láser, mediante los cuales se pretende apoyar el acceso a Internet.

De las recientes iniciativas puestas a prueba, Facebook a marzo del 2015 reporta éxito con el prototipo “Aquila”, un aparato volador no tripulado situado a 1.8Km de altura que se alimenta de energía solar y que podría permanecer en el cielo durante meses. Según el CEO de Facebook, una flota de estos drones servirá para poner disponible el acceso a Internet en zonas aisladas.

Google por su parte también tiene planes de extender el acceso en línea alrededor del mundo para aumentar sus usuarios e ingresos, con lo que podría invertir 1.000 millones de dólares¹⁴ en SpaceX (Space Exploration Technologies Corp.), un proyecto que quiere desarrollar y desplegar una constelación de satélites para extender el servicio online a todos los rincones del mundo.

Según The Wall Street Journal, el proyecto comenzará con el envío de 180 pequeños satélites de gran capacidad, que orbitarán a menor altura que los satélites convencionales GEO. El creador de esta iniciativa estima se necesitará US\$ 10.000 millones y varios años de trabajo para desarrollar por completo un sistema capaz de distribuir Internet.

SpaceX planea proporcionar acceso a Internet a través de una red global formada por una constelación de 4.000 micro satélites de órbita baja (LEO), que tendrían un peso menor a 113Kg y se proyecta esté lista en los próximos 5 años¹⁵ (x). El formar una larga constelación presenta la ventaja de poder afrontar la pérdida de un elemento sin afectar demasiado el sistema.

Otros esfuerzos para acometer este objetivo también son abordados por WorldVu Satélite, respaldado por Qualcomm y Virgin Group, ya ha iniciado un esfuerzo similar.

¹⁴ <http://www.lavanguardia.com/tecnologia/innovacion/20140602/54409555286/>

¹⁵ <http://spectrum.ieee.org/tech-talk/aerospace/satellites/spacex-raises-1-billion-from-google-fidelity-for-satellite-Internet-project>

4 Aproximación del comportamiento de un TSI para uso en Ecuador

En éste capítulo se caracteriza el requerimiento en función del fin planteado, abordando las limitaciones que se presenta al utilizar un TSI genérico en la banda Ka como parte del sistema O3b en varias ubicaciones dentro de Ecuador continental e insular.

Las ubicaciones son seleccionadas para analizar el comportamiento del TSI genérico, respecto al impacto de la atenuación por lluvia para diferentes probabilidades en el balance del enlace, así como los valores de E_b/N_0 requeridos y disponibles en función las recomendaciones ITU y del estándar DVB-S2/RCS2.

Se especifican varias características básicas para un TSI genérico, es decir que sus componentes no cambian en función de una nueva ubicación, de forma que a futuro más terminales similares puedan incorporarse a lo largo del país para ampliar el acceso a Internet de forma rápida.

4.1 Descripción del requerimiento

El sistema de comunicación se proyecta para brindar servicio de acceso a Internet de banda ancha a poblaciones rurales de Ecuador, tanto en el territorio continental como en el insular (provincia de Galápagos), como se ilustra en la Figura 29.



Figura 29: Territorio Ecuatoriano Continental e Insular

El esquema a utilizar es un enlace punto a punto a través de la constelación de satélites en una *topología estrella*, donde las estaciones terrenas interactivas o *TSI* se comunican con uno de los *Gateways o Hubs* de la red satelital O3b.

Este TSI tendrá características generales a nivel de arquitectura, de forma que a futuro este mismo terminal o nuevos TSI (son similares componentes), se podrán desplegar sobre la zona de servicio satelital O3b.

4.1.1 Selección de ubicaciones y coordenadas de localización

Las posibles ubicaciones para funcionamiento de los TSIs fueron escogidas considerando puntos geográficos de frontera tanto para el territorio continental, como para el insular. Adicionalmente, se consideran varias ubicaciones internas para validar como influyen las variaciones orográficas que son típicas entre regiones del territorio ecuatoriano. En la Figura 30 se muestra el conjunto de posibles ubicaciones

seleccionadas sobre el territorio ecuatoriano para analizar el comportamiento de un TSI, cuya imagen, posición geográfica y altura son extraídas desde la aplicación Google Earth.

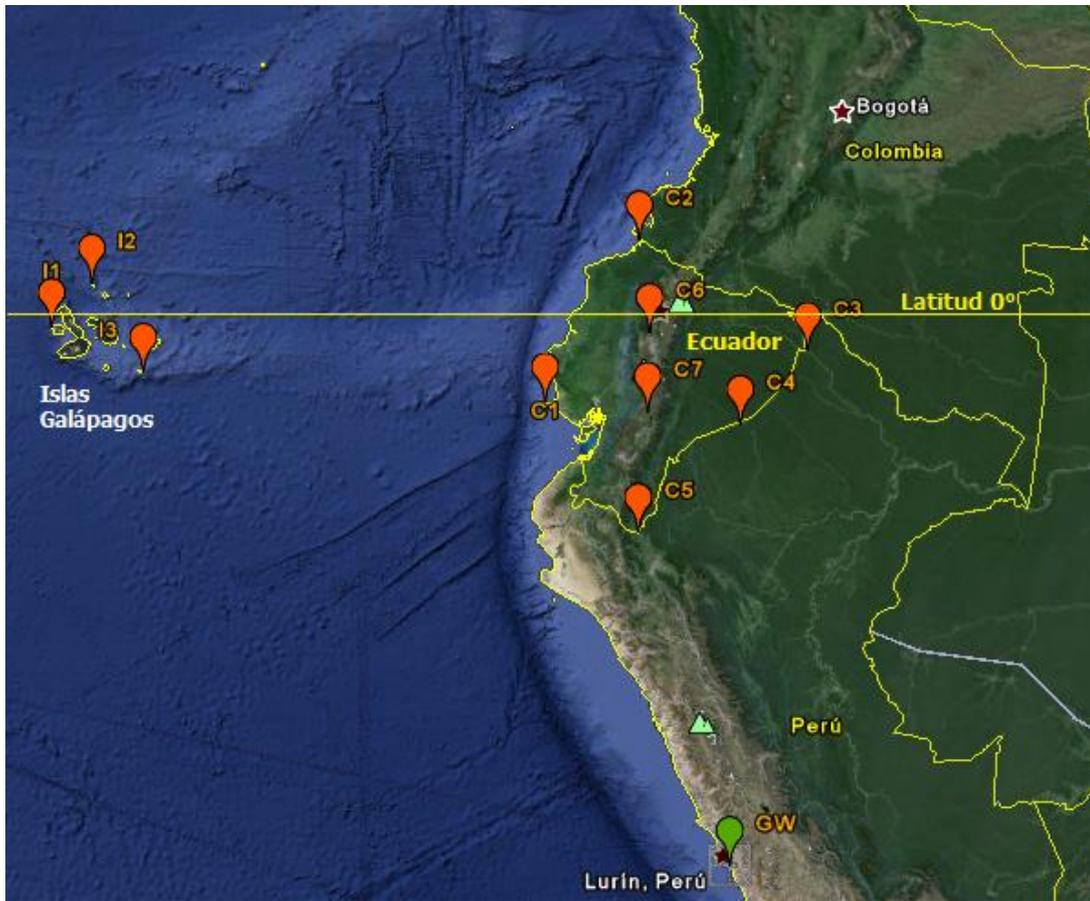


Figura 30: Conjunto de posibles localizaciones para TSIs en Ecuador

Se ha escogido por conveniencia un conjunto de lugares geográficos, a lo largo del territorio continental (representados como Cn) y del territorio insular (representados como In). Varias de estas ubicaciones representan las coordenadas con mayor latitud sobre la línea de frontera geopolítica al Norte y Sur, así como longitud Este y Oeste. Algunas localizaciones se distribuyen por conveniencia a la largo de la zona central del país en las provincias con mayor altura, cuya orografía está definida por la presencia de la cordillera de los Andes, mientras el Gateway de la red más cercano a Ecuador definido para del sistema O3b está ubicado específicamente en el estado de Lurín (cerca de Lima – capital de Perú), como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5: Coordenadas de localización para posibles ubicaciones de un TSI genérico.

UBICACIÓN TSI - GW	Territorio	PAIS	LATITUD [Grados]	LONGITUD [Grados]
C1	Continental	Ecuador	2° 11' 25.89" S	81° 0'9.57" O
C2	Continental	Ecuador	1°25'58.38" N	78°52'18.19" O
C3	Continental	Ecuador	0°58'11.51" S	75°22'47.19" O
C4	Continental	Ecuador	2°37'52.87" S	76°44'22.02" O
C5	Continental	Ecuador	5° 0'23.74" S	79° 1'16.24" O
C6	Continental	Ecuador	0°38'57.54" S	78°42'33.68" O
C7	Continental	Ecuador	2°23'0.44" S	78°47'23.58" O
I1	Insular	Ecuador	0°19'30.63" S	91°39'36.47" O
I2	Insular	Ecuador	0°37'38.40" N	90°46'15.76" O
I3	Insular	Ecuador	1°24'12.87" S	89°37'32.74" O
GW	Continental	Perú	12°15'9.46" S	76°53'2.52" O

Al Gateway (GW) contenido en la Tabla anterior, se enlazan los TSI ubicados en Ecuador hacia los satélites de la constelación de la red, durante su periodo de avistamiento.

4.1.2 Mapa Hidro-meteorológico

En la Figura 31, de acuerdo al mapa de las ITU se muestran las diferentes zonas hidro-meteorológicas, categorizadas desde A hasta P en función de la *intensidad de lluvia*, donde las zonas con mayores niveles se encuentran cercanas a la línea Ecuatorial coincidiendo con la región donde la red satelital O3b tiene focalizada su cobertura, desde los - 45° hasta 45° de latitud.

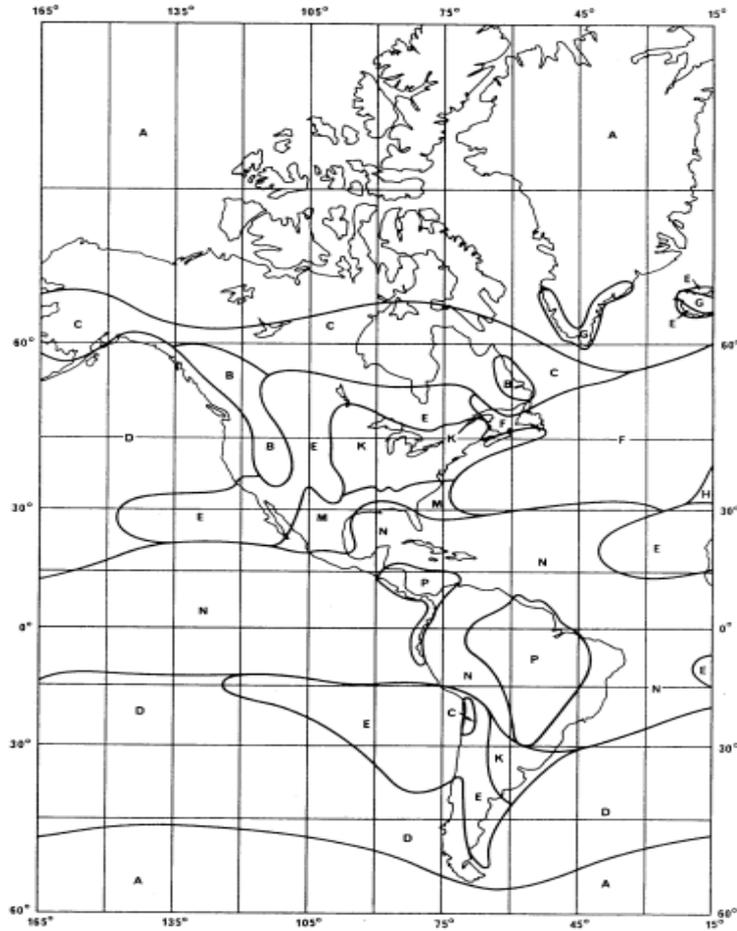


Figura 31: Zonas Hidro meteorológicas

Lo anterior es un punto importante a tener en consideración para definir el comportamiento, calidad, desempeño alcanzable en zonas tropicales y en nuestro problema en particular para los TSIs que se ubiquen en Ecuador, al ser utilizada la frecuencia de la portadora en banda Ka con los transpondedores de la red O3b.

Como se muestra en Tabla 6, si asociamos las zonas divididas por la ITU, dentro de las cuales podrían ser requeridos los TSI, para Ecuador corresponden las zonas N y P. La zona delimitada como N abarca el conjunto de: las Islas Galápagos, Regiones de la Sierra y Región Oriental del Ecuador, mientras que en ésta aproximación gráfica según la Figura 31 la región Costa corresponde a la zona P donde se presentan en promedio las lluvias más abundantes a lo largo del año

Tabla 6: Indisponibilidad en función de la Intensidad de Lluvia [mm/h]

Porcentaje de tiempo (%)	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q
1,0	< 0,1	0,5	0,7	2,1	0,6	1,7	3	2	8	1,5	2	4	5	12	24
0,3	0,8	2	2,8	4,5	2,4	4,5	7	4	13	4,2	7	11	15	34	49
0,1	2	3	5	8	6	8	12	10	20	12	15	22	35	65	72
0,03	5	6	9	13	12	15	20	18	28	23	33	40	65	105	96
0,01	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145	115
0,003	14	21	26	29	41	54	45	55	45	70	105	95	140	200	142
0,001	22	32	42	42	70	78	65	83	55	100	150	120	180	250	170

Por otro lado, el Gateway más cercano de la red O3b ubicado en Lurín se encuentra dentro de la una zona hidro-meteorológica N.

Sin embargo a lo anterior, particularmente a lo que se puede desprender analizando esta aproximación a través del mapa de lluvia, es conocido que la zona selvática del país es dominante en la región oriental, y se caracteriza por su clima tropical con intensas lluvias, por lo cual será necesario considerar otra mejor aproximación para obtener los valores de lluvia.

4.1.3 Escenario proyectado de uso

Entre los casos particulares a ser tomados en consideración se presentan escenarios dependiendo del lugar donde vaya a ser implementado un TSI, siendo el principal dado que trabajamos en Banda Ka y zonas tropicales:

- La intensidad de lluvia en función de la zona hidro-meteorológica
- La altura de la estación (respecto a la atmósfera)
- La distancia del enlace entre el satélite y la ubicación particular de un TSI.

La mayor distancia respecto al destino (GW) se dará para los posibles TSI que se ubiquen en las Islas Galápagos, las cuales están ubicadas a 972 Km de la costa Ecuatoriana siendo el punto más alejado del territorio continental, magnitud que relativamente no representa una restricción preponderante dentro de los factores que pueden modificar la calidad de un enlace satelital, al diferencia como sí lo podrían hacer las condiciones de atenuación por lluvia que se analizan en apartados posteriores.

4.2 Cálculo de parámetros del enlace

4.2.1 Distancia, handover y posición relativa

Dadas las características propias del handover que se produce en el sistema O3b, se debe analizar previo al cálculo del balance del enlace la distancia variable (d) que se produce entre las antenas del satélite y las antenas de seguimiento del TSI, particularmente el momento de la transferencia de la comunicación hacia el siguiente satélite adyacente de la constelación.

Una condición conveniente a un primer análisis, se ilustra en una aproximación simplificada en la Figura 32, donde la distancia a ambos satélites es igual en un momento específico para una estación terrena (E_t) ubicada sobre el plano del Ecuador.

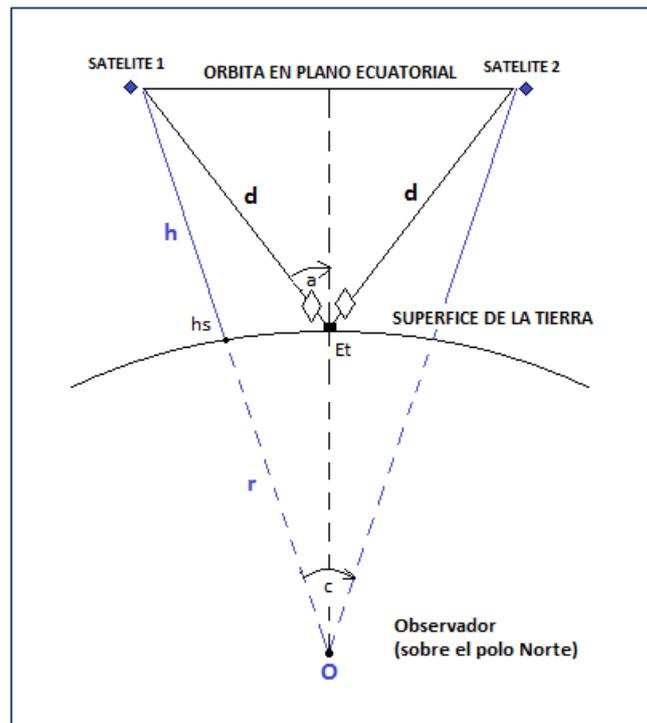


Figura 32: Esquema aproximado el momento del Handover

Dado que los satélites se trasladan siguiendo una órbita MEO, solo uno de ellos estará activo iluminando con sus múltiples haces las estaciones terminales de usuario dentro de su zona de cobertura por un periodo de 45 minutos, durante los cuales se mantendrá activa la comunicación. Durante estos 45 minutos, variará la distancia entre el satélite activo y la estación terrena, así como el ángulo de elevación producto del seguimiento automático que realiza una de las antenas del TSI .

En función de la posición relativa de una Et(n) respecto al momento que los satélites ejecutan el handover, se tendrán implicaciones como la variación de distancia $d_1 < d < d_2$ como se ilustra en la Figura 33, produciendo mayores pérdidas en el espacio libre y acumulando el retardo. Conforme una Et (o TSI) tiende a estar ubicada cerca de los puntos *subsatelitales* (S), la distancia tiende a coincidir con la altura del satélite. Sin embargo, la distancia se incrementará conforme la estación se aleje de la línea ecuatorial (latitud 0°).

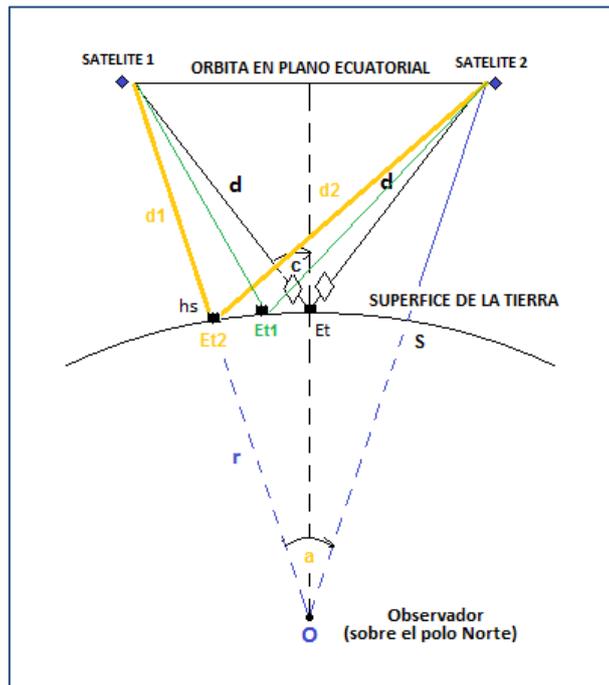


Figura 33: Posición de una TSI respecto al handover

4.2.2 Consideraciones generales

Tomando como base la información disponible del sistema O3b, para los cálculos del enlace se ha considerado las siguientes condiciones:

- Frecuencias de enlaces: ascendente 30 GHz, descendente 20 GHz.
- Antena del terminal de usuario (o TSI) será de 1.8m^{16} y el HPA de 40W tipo TWTA.
- La antena del GW es de 7.3m^{17} y el HPA de 500W tipo TWTA.
- El PIRE del satélite se considera 50 dB y su G/T con valor de 5.5 dB
- Se asumen varias velocidades R para el ejercicio: 1, 4, 10, 100 y 800 Mbps.
- Pérdidas entre la guía de onda y antena 1 dB

¹⁶http://www.o3bnetworks.com/wp-content/uploads/2015/02/O3b_General-Dynamics_1.8m-Dual-Tracking-Antenna.pdf

¹⁷ <http://www.o3bnetworks.com/equipment-data-sheets/>

- Pérdidas adicionales 1dB.
- Factor de Roll-Off de 0.20,
- Back off HPA 3dB.
- La condición de handover lejano se produce con una diferencia de longitud de 45° respecto de la longitud del TSI. El handover cercano se produce con una diferencia de longitud de 0° respecto de la longitud del TSI, es decir si un TSI está ubicado sobre la línea ecuatorial, el satélite estará exactamente sobre el TSI.
- Se calcula el valor de atenuación por lluvia mediante las recomendaciones para las diferentes ubicaciones seleccionadas (no se toma un valor único por zona hidro meteorológica).
- No se consideran ruido de intermodulación o interferencias entre enlaces (co-canal).
- El terminal satelital cumple el estándar DVB-S2 y RCS2, con acceso del tipo MF-TDMA, permitiendo interactividad a nivel de estación terminal de usuario, TSI.
- No se considera la posible ganancia por diversidad del sistema de RF en el GW.

Como un tema complementario con miras a operatividad:

- En particular el perfil escogido será el TDMA (no multi-frecuencia), donde cada una de las posibles TSI transmite en un determinado tiempo que le ha sido asignado por la NCC. Esto a fin de disminuir complejidad y por consiguiente el costo de la infraestructura del terminal. Adicionalmente, evitar los efectos de la interferencia en el transpondedor por canal adyacente.

4.2.3 Cálculo de distancia, ángulo de elevación y Azimut

Considerando que no se conoce en qué posición (coordenadas) la constelación de satélites O3b ejecuta los handover, si éstas son ejecutadas en posiciones fijas o incluso si van variando en el transcurso del tiempo, sin embargo podemos analizar el escenario crítico donde se combinan condiciones exigentes de las mayores distancias y menores ángulos de elevación que se presentarían el momento del handover.

Analizando el comportamiento del sistema, tendremos un escenario en particular donde el instante en que se realiza el handover respecto a la ubicación de los TSI tiene repercusiones particulares y podemos establecer algunos límites importantes:

- El handover hacia un estado pasivo se ejecuta el momento justo en que el satélite está sobre el TSI (o sobre su proyección sobre la línea Ecuatorial), como consecuencia en ese instante tendremos la menor distancia entre el TSI y el satélite, siendo a la altura del satélite el mayor ángulo de elevación, y el Azimut se acercará a 0 o 180° dependiendo si el TSI se ubica con latitud norte o sur

respectivamente. En la Tabla 7 se muestra los valores obtenidos mediante los cálculos, siguiendo ecuaciones que consideramos conocidas¹⁸ sin ser el objeto de este trabajo entrar en el detalle de su obtención.

Tabla 7: Distancia, Ángulo de Elevación y Azimut en condición de handover más cercano

UBICACIÓN TSIs - GW	LATITUD TSI [Decimal]	LONGITUD TSI [Decimal]	HANDOVER MAS CERCANO (HC)			
			LONGITUD SAT MC [Decimal]	Azimut HC [Decimal]	Elevación HC [Decimal]	Distancia HC [Km]
C1	-2.191	-81.003	-81.003	0.000	86.078	8070.330
C2	1.433	-78.872	-78.872	180.000	87.434	8065.566
C3	-0.970	-75.380	-75.180	0.000	88.263	8063.634
C4	-2.631	-76.739	-76.739	0.000	85.291	8074.017
C5	-5.007	-79.021	-79.021	0.000	81.055	8105.400
C6	-0.649	-78.709	-78.709	0.000	88.838	8062.732
C7	-2.383	-78.790	-78.790	0.000	85.734	8071.861
I1	-0.325	-91.660	-91.660	0.000	89.418	8062.184
I2	0.627	-90.771	-90.771	180.000	88.877	8062.684
I3	-1.404	-89.626	-89.626	0.000	87.486	8065.421
GW	-12.253	-76.884	-76.884	0.000	68.382	8317.749

Prácticamente de forma simultánea, se ejecuta otro handover hacia el nuevo satélite adyacente en estado activo. Este proceso inicia previamente a ejecutar el handover (en sí mismo) con el satélite adyacente, solo unos minutos antes mediante la segunda antena del TSI a fin de impedir una caída temporal de la comunicación. Estos minutos previos tendrían un límite bajo un comportamiento cíclico, estando limitados por el número (n) de satélites que conforman la constelación y su periodo de avistamiento desde tierra. Así para la configuración de 8 satélites en nuestro caso de estudio, se tendría $45/(n-1)$.

El handover en sí mismo se produce, cuando el satélite se encuentre con 45° de diferencia en su posición de longitud respecto a la posición del TSI (o su proyección sobre la línea Ecuatorial). Resultando así en la condición extrema, produciéndose la máxima distancia que tendrá que viajar la señal entre el TSI y el satélite, así como los límites de los ángulos de elevación. Mientras que el azimut también cambiará pero sin representar un valor determinante. En la Tabla 8 se muestra los valores obtenidos para

¹⁸ Ecuaciones tomadas de Murillo, J.J. "Radiación y Radiocomunicación, 4to. Ing. De Telecomunicaciones, Tema 10. Sistemas de comunicaciones por Satélite" Universidad de Sevilla. <http://personal.us.es/murillo/docente/radio/documentos/tema10.pdf>

el escenario con la posición del satélite *más lejana* a los TSIs el momento de realizar el handover.

Tabla 8: Distancia, Ángulo de Elevación y Azimut en condición de handover más lejano

UBICACIÓN TSIs -GW	LATITUD TSI [Decimal]	LONGITUD TSI [Decimal]	HANDOVER MAS LEJANO (HL)			
			LONGITUD SAT HL [Decimal]	Azimut HL [Decimal]	Elevación HL [Decimal]	Distancia HL [Km]
C1	-2.191	-81.003	-126.003	272.189	20.524	10906.671
C2	1.433	-78.872	-123.872	268.567	20.552	10904.179
C3	-0.970	-75.380	-120.180	270.970	20.564	10903.169
C4	-2.631	-76.739	-121.739	272.628	20.501	10908.601
C5	-5.007	-79.021	-124.021	274.988	20.311	10925.045
C6	-0.649	-78.709	-123.709	270.649	20.570	10902.697
C7	-2.383	-78.790	-123.790	272.381	20.514	10907.472
I1	-0.325	-91.660	-136.660	270.325	20.573	10902.410
I2	0.627	-90.771	-135.771	269.373	20.570	10902.672
I3	-1.404	-89.626	-134.626	271.404	20.553	10904.103
GW	-12.253	-76.884	-121.884	281.982	19.029	11037.328

Del análisis de los resultados en las tablas anteriores, se muestra que la condición más exigente se produce en el segundo caso, *incrementándose la distancia promedio en un 35.14% lo que repercute en el retardo de propagación, a la vez que el ángulo de elevación de la antena del TSI se ha reducido en promedio a 20.523, es decir se redujo un 75.6% del valor en mejor condición.*

4.3 Pérdidas en la Atmósfera

Las pérdidas atmosféricas son altamente dependientes de la ubicación geográfica, lo cual afecta la potencial disponibilidad tanto en el GW como en el TSI, especialmente en áreas tropicales. Las pérdidas atmosféricas son resultado de las siguientes causas:

- Pérdidas por lluvia (ITU-R P.618): Atenuación debido principalmente a eventos de lluvia
- Pérdidas por nubes (ITU-R P.840): Pérdidas debido a contenido de humedad o niebla, consistiendo en pequeñas gotitas generalmente menores de 0.01 cm.
- Pérdida por gases (ITU-R 676): Pérdidas que se producen principalmente debido al oxígeno.

- Centelleo (ITU-R 618): Pérdidas debido principalmente a inestabilidad atmosférica en la ionósfera y tropósfera.
- Tormentas de polvo (ITU-R 618): Atenuación debido a partículas dentro de la atmósfera

Como regla general, con una elevación mayor los 10 grados, solamente las atenuaciones por: lluvia, nubes, gases y posiblemente por centelleo serán significativas, dependiendo de las condiciones de propagación (ITU-R 618-11).

Entre los factores adversos anteriores y en el cual enfocaremos el presente estudio, la lluvia es la que más contribuye en la atenuación de la señal.

4.3.1 Atenuación por lluvia

Las condiciones climáticas afectan en las pérdidas de propagación de la señal portadora, siendo la lluvia conforme se incrementa la frecuencia el factor restrictivo predominante para su atenuación en frecuencias superiores a los 10GHz.

Las portadoras de los satélites comerciales utilizan generalmente las bandas de frecuencia comercial C, Ku y Ka para transmisiones entre los 4 y 30 GHz del espectro radioeléctrico.

En la banda Ka, la cual es de interés particular en el presente trabajo, es conocido en términos aproximados que la señal puede disminuir su potencia entre 3 y 20dB. En la Figura 34 se aprecia cómo la atenuación de la señal varía en función de la frecuencia considerando varios niveles de densidad de lluvia, que se presentan en función de la ubicación geográfica.

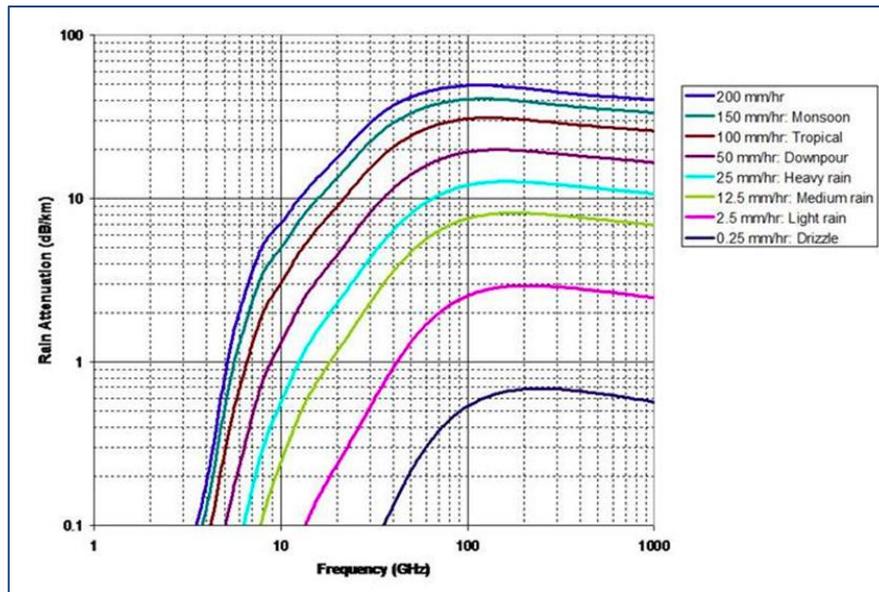


Figura 34: Atenuación en función de la frecuencia e intensidad de la lluvia

Tomando el caso de un valor de 200mm/hr como intensidad de lluvia, para las frecuencias cercanas al límite superior de la banda Ka (30GHz), se presenta una atenuación de aproximadamente 20dB.

De presentarse lluvia cuando se haga uso de frecuencias cercanas al límite superior de la banda Ka, el nivel será 100 veces más pequeño del valor inicial de la señal, por ello su importancia como factor restrictivo en el cálculo del balance del enlace.

Dentro de la infraestructura terrestre, el escenario se torna adverso particularmente para un TSIs (respecto al GW), al haber la posibilidad de que se ubique dentro de la zona P, adicionalmente su antena es de menor tamaño y posee menor disponibilidad de potencia y en general prestaciones para hacer frente a la atenuación por lluvia.

La pregunta en éste punto es: ¿Que tanta seguridad nos proporciona considerar un nivel de atenuación genérico como el de la Figura 34 si el territorio Ecuatoriano presenta una orografía y las condiciones de lluvia pueden variar drásticamente para cada región del país?

4.3.2 Predicción de la Intensidad de lluvia

La Recomendación ITU-R P.1144-6 constituye una guía consolidada de referencia hacia un conjunto de Recomendaciones del Grupo de Estudio de Radiocomunicaciones 3 de la ITU, dentro de la cual se encuentran los métodos de *predicción para propagación* en varios escenarios en función de diferentes parámetros como el tipo de aplicación terrestre o satelital, frecuencias de trabajo, localización, etc...

Para nuestro caso de estudio, al tratarse de satélites en banda Ka, se desarrollarán los cálculos predictivos de la atenuación ocasionada por lluvia siguiendo las recomendaciones Rec: P.837-6, P.838-3, P.839-3 y P.618-11 de la ITU.

El factor determinante que afecta la comunicación está determinado por la ubicación geográfica dentro del país dentro de zonas de tipo tropical características por la presencia de lluvias.

Las lluvias de las zonas cercanas al Ecuador, se originan por la presencia de nubes que se encuentran debajo de la Isoterma 0°C. Estas lluvias tropicales son típicamente de corta duración, se producen en áreas relativamente pequeñas y se caracterizan por sus elevadas tasas de precipitación frente a las que se producen en otros lugares.

Siguiendo la recomendación ITU P.837-6, para nuestro caso de estudio se ha extraído la información de intensidad de lluvia en mm/h como se muestra en la Tabla 9 para diferentes valores de probabilidad de lluvia. Para esto, se ha utilizado realizado uso del programa MatLab y una función como se lo sugiere en la misma recomendación.

Tabla 9: Intensidad de lluvia para diferentes valores de probabilidad

Intensidad de lluvia R [mm/h]							
Ubicación TSI - GW	0.001%	0.01%	0.50%	0.10%	1%	2%	5%
C1	78.341	33.714	3.688	9.631	2.265	1.202	0.159
C2	106.003	55.392	5.942	17.102	3.679	2.144	0.768
C3	171.930	117.198	26.222	62.857	12.629	4.304	0.826
C4	131.444	77.612	6.188	27.336	2.969	1.288	0.079
C5	99.997	48.781	3.241	11.735	1.697	0.667	0.000
C6	108.533	57.393	5.847	17.604	3.546	2.013	0.661
C7	105.496	54.213	4.631	15.122	2.667	1.365	0.218
I1	95.750	43.753	1.427	7.602	0.419	0.000	0.000
I2	100.911	48.387	1.683	9.035	0.568	0.000	0.000
I3	100.930	48.474	1.776	9.230	0.632	0.000	0.000
GW	43.700	14.431	1.222	4.114	0.412	0.000	0.000

Cabe puntualizar que al analizar la recomendación ITU P.837-6, esta contiene información de lluvia con una granularidad definida por intervalos de 1.125° tanto para la latitud como para la longitud. A partir de la base de datos y siguiendo procedimientos como interpolación bilineal se pueden obtener los valores de predicción internos dentro de cada área, que se calculan mediante una función en

Matlab tomando como base los parámetros de los cuatro puntos geográficos más cercanos.

La información de lluvia es extraída de bases de datos recolectadas durante varios años, en algunos países cerca de 40 años, por el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Plazo Medio (CEPMPM), pero tiene una limitación en su granularidad. Por lo que, si se cuenta con estadísticas confiables del índice de pluviosidad para una ubicación particular, se puede utilizar la herramienta descrita en la recomendación en su Anexo 3 que considera un tiempo de integración de 1 mm. En el caso de nuestro análisis para el Ecuador, no se cuenta con estadísticas propias de lluvia para lugares con poca población, menos aún para lugares remotos considerando el posible uso a lo largo del territorio nacional e insular, por lo que se sigue la recomendación ITU P.837-6 con su Anexo 1 como mejor aproximación.

4.3.3 Atenuación específica

La atenuación específica determina la atenuación en decibeles producida por cada kilómetro en el trayecto de la señal del enlace. El Ecuador está atravesado de norte a sur por la cordillera de los Andes, siendo la montaña más alta El Chimborazo con 6.268 msnm, y una orografía bastante irregular presentándose poblados pequeños con alturas típicas desde unos pocos metros de altitud en la región Costa hasta los 4000 en la región Sierra.

Para considerar el efecto de la atenuación por lluvia, se describe un modelo de atenuación específico de lluvia para uso en métodos de predicción. *La atenuación específica γ_R (dB/km)* se obtiene a partir de la intensidad de lluvia R (mm/h) utilizando las ecuaciones especificadas en la Rec. ITU-R P.838-3 y de acuerdo a la polarización utilizada por el sistema, en nuestro caso de estudio circular.

Polarización Circular

Para el caso de los satélites O3b los transpondedores trabajan con polarización circular. Para nuestro caso en particular, partiendo de los datos de los coeficientes ya disponibles para polarización horizontal y en función de las frecuencias de trabajo se calculan los coeficientes para polarización circular α_C y k_C , cuyo resultado se muestra en la Tabla 10. La recomendación con el detalle para obtener los valores se encuentra como Anexo 1 (Rec. ITU-R P.838-3)

Tabla 10: Cálculo de los coeficientes para polarización circular en banda Ka.

Frecuencia	Polarización Horizontal		Polarización Vertical		Polarización Circular	
	F (GHz)	kH	α H	kV	α V	kc
20	0.09164	1.0568	0.09611	0.9847	0.0939	1.0199
30	0.2403	0.9485	0.2291	0.9129	0.2347	0.9311

Cálculo de la Atenuación Específica

Un hito importante en el estudio es obtener la atenuación específica por lluvia que se tendrá para las posibles ubicaciones seleccionadas dentro del Ecuador. Para esto, el análisis se basa en el modelo presentado en la recomendación ITU 618-9 y considera la tasa de lluvia $R(p)$ con probabilidad 0,01%.

A partir de los valores de los coeficientes calculados de la Tabla 10, $R(0.01\%)$ de la Tabla 9, y siguiendo las ecuaciones de la recomendación, se determinan los valores de atenuación específica γR (dB/km) para las frecuencias de 30 GHz del enlace ascendente y 20 GHz del enlace descendente. La recomendación con el detalle para obtener los valores se encuentra como Anexo 1 (Rec. ITU-R P.838-3)

Tabla 11: Atenuación específica en posibles ubicaciones para 20 y 30 GHz

Ubicación TSIs - GW	R(0.01%)	Frecuencia (GHz)	Atenuación Específica [dB/Km]	Frecuencia (GHz)	Atenuación Específica [dB/Km]
C1	33.714	20	3.394	30	6.210
C2	55.392	20	5.632	30	9.860
C3	117.198	20	12.096	30	19.812
C4	77.612	20	7.945	30	13.498
C5	48.781	20	4.947	30	8.760
C6	57.393	20	5.840	30	10.191
C7	54.213	20	5.510	30	9.665
I1	43.753	20	4.428	30	7.916
I2	48.387	20	4.907	30	8.694
I3	48.474	20	4.916	30	8.708
GW	14.431	20	1.429	30	2.818

Para un TSI con ubicación C3 se presentan los valores más elevados de atenuación específica por lluvia, lo que significa que los posibles TSIs que funcionen en el área A3,6 (o cercanos a una zona selvática), presentarán mayores requerimientos de margen de protección.

-91.688 -90.563 -89.438			-81.000 -79.875 -78.750 -77.625 -76.500 -75.375						Longitud																																																			
Rango de coordenadas Islas Galápagos <table border="1"> <tr><td>I1,1</td><td>I1,2</td><td>I1,3</td></tr> <tr><td>I2,1</td><td>I2,2</td><td>I2,3</td></tr> <tr><td>I3,1</td><td>I3,2</td><td>I3,3</td></tr> </table>			I1,1	I1,2	I1,3	I2,1	I2,2	I2,3	I3,1	I3,2	I3,3	Rango de coordenadas Ecuador Continental <table border="1"> <tr><td>A1,1</td><td>A1,2</td><td>A1,3</td><td>A1,4</td><td>A1,5</td><td>A1,6</td></tr> <tr><td>A2,1</td><td>A2,2</td><td>A2,3</td><td>A2,4</td><td>A2,5</td><td>A2,6</td></tr> <tr><td>A3,1</td><td>A3,2</td><td>A3,3</td><td>A3,4</td><td>A3,5</td><td>A3,6</td></tr> <tr><td>A4,1</td><td>A4,2</td><td>A4,3</td><td>A4,4</td><td>A4,5</td><td>A4,6</td></tr> <tr><td>A5,1</td><td>A5,2</td><td>A5,3</td><td>A5,4</td><td>A5,5</td><td>A5,6</td></tr> <tr><td>A6,1</td><td>A6,2</td><td>A6,3</td><td>A6,4</td><td>A6,5</td><td>A6,6</td></tr> <tr><td>A7,1</td><td>A7,2</td><td>A7,3</td><td>A7,4</td><td>A7,5</td><td>A7,6</td></tr> </table>						A1,1	A1,2	A1,3	A1,4	A1,5	A1,6	A2,1	A2,2	A2,3	A2,4	A2,5	A2,6	A3,1	A3,2	A3,3	A3,4	A3,5	A3,6	A4,1	A4,2	A4,3	A4,4	A4,5	A4,6	A5,1	A5,2	A5,3	A5,4	A5,5	A5,6	A6,1	A6,2	A6,3	A6,4	A6,5	A6,6	A7,1	A7,2	A7,3	A7,4	A7,5	A7,6	Latitud
			I1,1	I1,2	I1,3																																																							
I2,1	I2,2	I2,3																																																										
I3,1	I3,2	I3,3																																																										
A1,1	A1,2	A1,3	A1,4	A1,5	A1,6																																																							
A2,1	A2,2	A2,3	A2,4	A2,5	A2,6																																																							
A3,1	A3,2	A3,3	A3,4	A3,5	A3,6																																																							
A4,1	A4,2	A4,3	A4,4	A4,5	A4,6																																																							
A5,1	A5,2	A5,3	A5,4	A5,5	A5,6																																																							
A6,1	A6,2	A6,3	A6,4	A6,5	A6,6																																																							
A7,1	A7,2	A7,3	A7,4	A7,5	A7,6																																																							
								2.25																																																				
								1.125																																																				
								0°																																																				
								-1.125																																																				
								-2.25																																																				
								-3.375																																																				
								-4.5																																																				
								-5.625																																																				

Figura 35: Ubicación de C3 según la granularidad de Áreas para Ecuador.

Los datos obtenidos en la Tabla 11 muestran que la atenuación específica sigue un comportamiento muy similar que la tasa de intensidad de lluvia, dado que el coeficiente α_c es cercano a la unidad para la ecuación $\gamma_r = kR^\alpha$.

4.4 Cálculo de la Atenuación por lluvia

Durante la propagación de la portadora entre la estación terrena y el satélite, en frecuencias altas como Ka, se produce atenuación elevada siendo fundamental considerarla en especial en los trayectos donde se conoce existe mayor probabilidad de precipitaciones frecuentes e intensas, algo característico de las zonas tropicales.

El cálculo de atenuación por lluvia se basa en la recomendación ITU 618-11 (sección 2.2.1.1), que es un método de predicción que proporciona estimaciones a largo plazo de la atenuación debida a la lluvia sobre trayectos oblicuos en un determinado punto para frecuencias de hasta 55 GHz, como se muestra en la Figura 36.

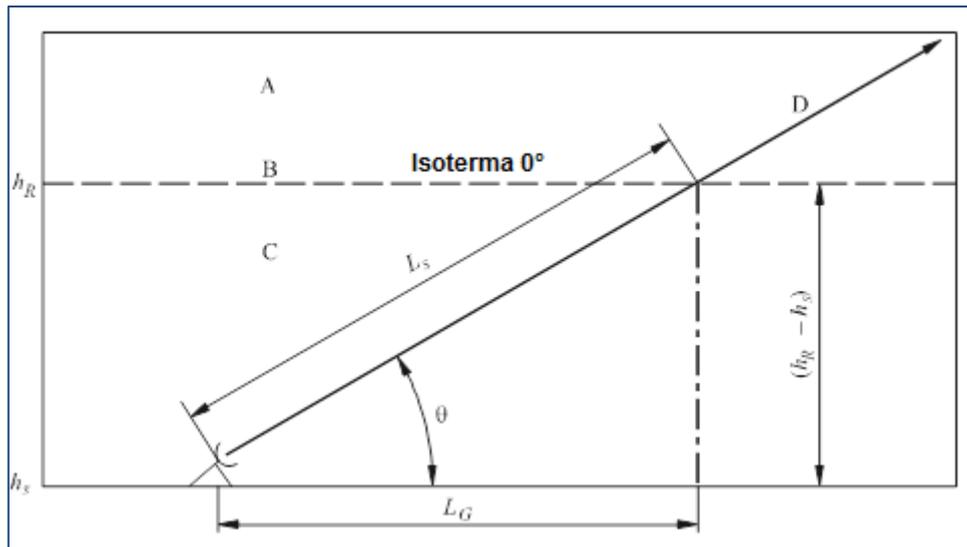


Figura 36: Esquema para enlace satelital (tierra - espacio)

Dónde:

- h_R : Altura de lluvia
- h_s : Altitud del TSI (sobre el nivel del mar)
- L_s : Longitud del trayecto oblicuo
- θ : Ángulo de elevación
- L_G : Longitud de proyección (horizontal)
- B : Isoterma a 0°

El Ecuador está atravesado de norte a sur por la cordillera de los Andes, siendo la montaña más alta El Chimborazo con 6.268 msnm, y una orografía bastante irregular, pudiendo llegar a encontrarse poblaciones pequeñas alrededor de los 4000m en la región Sierra. Los valores de altura h_s (altitud sobre el nivel del mar) para las posibles ubicaciones seleccionadas se muestran en la Tabla 12.

Otro parámetro necesario es el valor de h_o (altura a la isoterma a 0°C), la cual se obtiene a partir de la recomendación ITU R 839-3. Se toma el valor promedio de los valores de los cuatro puntos más cercanos disponibles.

Tabla 12: Valores de altura y ho de ubicaciones seleccionadas

UBICACIÓN	LATITUD (Decimal)	LONGITUD (Decimal)	Altura h_s [Km]	ho [Km]
C1	-2.191	-81.003	0.020	4.715
C2	1.433	-78.872	0.030	4.539
C3	-0.970	-75.380	0.210	4.497
C4	-2.631	-76.739	0.240	4.475
C5	-5.007	-79.021	0.790	4.513
C6	-0.649	-78.709	3.070	4.527
C7	-2.383	-78.790	3.200	4.666
I1	-0.325	-91.660	0.010	4.673
I2	0.627	-90.771	0.010	4.686
I3	-1.404	-89.626	0.010	4.703

El objetivo ahora es determinar la *longitud efectiva del trayecto* (L_E) considerando factores de ajuste para el 0,01% del tiempo, para lo cual se muestran en la Tabla 13 los valores calculados de L_G , L_S , h_R para las distintas ubicaciones geográficas con las que venimos trabajando.

La recomendación con el detalle para obtener los valores presentados en Tabla 13 se encuentra en el Anexo 2 (Rec. ITU-R P. 618-11, sección 2.2.1.1).

Particularmente en nuestro caso de estudio es necesario hacer una distinción, consideramos analizar las dos condiciones para el *handover: más cercano (HC) y más lejano (HL)*.

Tabla 13: Valores calculados para, h_R , L_S , L_G

Ubicación	HANDOVER MAS CERCANO (HC)				HANDOVER MAS LEJANO (HL)			
	Angulo Elevación [Decimal]	Altura Lluvia h_R [Km]	Trayecto Oblicuo L_S [Km]	Proyec. Horizont. L_G [Km]	Angulo Elevación [Decimal]	Altura Lluvia h_R [Km]	Trayecto Oblicuo L_S [Km]	Proyec. Horizont. L_G [Km]
C1	86.076	5.075	5.067	0.347	20.499	5.075	14.435	13.521
C2	87.433	4.899	4.874	0.218	20.528	4.899	13.885	13.003
C3	88.262	4.857	4.649	0.141	20.540	4.857	13.245	12.403
C4	85.287	4.835	4.611	0.379	20.477	4.835	13.135	12.305
C5	81.050	4.873	4.133	0.643	20.287	4.873	11.776	11.045
C6	88.836	4.887	1.817	0.037	20.545	4.887	5.177	4.848
C7	85.731	5.026	1.831	0.136	20.490	5.026	5.216	4.886
I1	89.417	5.033	5.023	0.051	20.549	5.033	14.310	13.400
I2	88.876	5.046	5.037	0.099	20.546	5.046	14.349	13.437
I3	87.485	5.063	5.058	0.222	20.529	5.063	14.409	13.494
GW	68.370	5.189	5.206	1.919	19.005	5.189	14.859	14.049

Con base en los resultados anteriores, se calcula L_E como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14: Valores calculados de longitud efectiva (L_E) a frecuencias de 20 y 30 GHz

Ubicación	HANDOVER MAS CERCANO		HANDOVER MAS LEJANO	
	L_E @(20 GHz) [Km]	L_E @(30 GHz) [Km]	L_E @(20 GHz) [Km]	L_E @(30 GHz) [Km]
C1	5.814	6.815	13.686	15.577
C2	5.098	6.178	12.187	14.282
C3	4.110	5.279	10.076	12.449
C4	4.525	5.609	10.927	13.068
C5	4.587	5.448	10.870	12.514
C6	2.265	2.603	5.252	5.872
C7	2.299	2.633	5.325	5.938
I1	5.487	6.547	13.023	15.054
I2	5.385	6.475	12.827	14.927
I3	5.401	6.495	12.868	14.978
GW	6.761	7.508	15.692	17.072

Esta sección toma como entrada los cálculos de la $R(p)$ con una probabilidad de 0,01% para calcular la atenuación a 0.01%. A partir de esta es posible obtener otras probabilidades de atenuación en un rango de 0.001% hasta 5%, mediante ecuaciones de ajuste provistas en la misma recomendación.

Los resultados de atenuación para diferentes tasas de probabilidad para la condición de **handover más cercano (HC)** se muestran en la Tabla 15 y la Tabla 16 con frecuencias de 20 y 30 GHz respectivamente.

Tabla 15: Cálculo de Atenuación a frecuencia 20 GHz (handover cercano)

Ubicación	A(0.01)	A(0.05)	A(0.1)	A(0.5)	A (1)	A (5)
	F = 20 [GHz]					
C1	19.733	12.950	10.050	2.897	1.793	0.557
C2	28.712	19.480	15.329	4.501	2.820	0.901
C3	49.714	35.227	28.237	8.586	5.471	1.819
C4	35.946	24.547	19.385	5.854	3.699	1.201
C5	22.695	14.691	11.355	3.403	2.123	0.667
C6	13.225	8.535	6.571	1.810	1.106	0.334
C7	12.668	8.038	6.149	1.719	1.050	0.316
I1	24.295	16.428	12.900	3.705	2.305	0.727
I2	26.425	17.935	14.109	4.089	2.551	0.810
I3	26.550	17.915	14.065	4.109	2.565	0.815
GW	9.659	5.506	4.049	1.240	0.757	0.223

Tabla 16: Cálculo de Atenuación a frecuencia 30 GHz (handover cercano)

Ubicación	A (0.01)	A(0.05)	A (0.1)	A (0.5)	A (1)	A (5)
	F = 30 [GHz]					
C1	42.320	29.350	23.327	7.106	4.504	1.480
C2	60.917	43.644	35.160	10.902	6.992	2.359
C3	104.599	78.220	64.170	20.591	13.429	4.711
C4	75.708	54.566	44.105	14.058	9.090	3.115
C5	47.719	32.598	25.786	8.155	5.207	1.726
C6	26.525	18.004	14.164	4.103	2.563	0.814
C7	25.451	16.986	13.280	3.906	2.438	0.772
I1	51.828	37.022	29.767	9.031	5.753	1.918
I2	56.288	40.354	32.503	9.950	6.356	2.132
I3	56.562	40.316	32.407	10.001	6.393	2.145
GW	21.159	12.766	9.620	3.119	1.951	0.610

Así también, los resultados de atenuación a diferentes tasas de probabilidad para la condición de **handover más lejano (HL)** se muestran en la Tabla 17 y la Tabla 18 para frecuencias de 20 y 30 GHz respectivamente.

Tabla 17: Cálculo de Atenuación a frecuencia 20 GHz (handover lejano)

Ubicación	A (0.01)	A(0.05)	A (0.1)	A (0.5)	A (1)	A (5)
	F = 20 [GHz]					
C1	46.454	32.420	25.837	10.703	5.041	1.667
C2	68.637	49.339	39.821	16.968	8.075	2.748
C3	121.874	91.415	75.139	33.374	16.150	5.729
C4	86.808	63.350	51.470	22.311	10.722	3.711
C5	53.779	37.849	30.279	12.679	6.015	2.011
C6	30.668	20.831	16.405	6.593	3.053	0.980
C7	29.342	19.802	15.555	6.233	2.895	0.926
I1	57.663	41.032	32.966	13.868	6.544	2.199
I2	62.940	45.038	36.274	15.358	7.273	2.459
I3	63.254	45.205	36.392	15.415	7.317	2.475
GW	22.417	14.973	11.701	4.595	2.092	0.656

Tabla 18: Cálculo de Atenuación a frecuencia 30 GHz (handover lejano)

Ubicación	A (0.01)	A (0.05)	A (0.1)	A (0.5)	A (1)	A (5)
	F = 30 [GHz]					
C1	96.732	71.192	58.050	25.360	12.219	4.263
C2	140.824	106.639	88.019	39.509	19.229	6.893
C3	246.635	194.685	163.580	76.462	37.824	14.120
C4	176.395	135.512	112.561	51.364	25.237	9.195
C5	109.618	81.232	66.444	29.296	14.211	5.002
C6	59.848	42.668	34.310	14.474	6.844	2.306
C7	57.390	40.659	32.614	13.720	6.506	2.185
I1	119.166	89.373	73.449	32.567	15.718	5.567
I2	129.768	97.856	80.613	35.966	17.422	6.208
I3	130.433	98.230	80.886	36.106	17.529	6.249
GW	48.112	33.962	27.181	11.281	5.259	1.744

A diferencia de la atenuación específica γ_R , la atenuación por lluvia no es proporcional a la intensidad de lluvia, dado que en el cálculo de la atenuación por lluvia interviene el parámetro de la altitud y el territorio ecuatoriano tiene un perfil orográfico bastante variable como se puede apreciar en las ubicaciones seleccionadas.

Los valores de atenuación por lluvia se incrementan para la condición HL conforme disminuye la altitud seleccionada para la ubicación de los TSI, llegando en la frecuencia de 30 GHz por ejemplo en el caso de C3 a valores de 246.63 dB a una A(0.01%). Estos valores excesivos de atenuación por lluvia, limitan los valores de y desempeño y disponibilidad alcanzables con un mismo TSI genérico.

Como era de esperarse considerando el antecedente de la atenuación específica, C3 resulta ser la ubicación con los mayores niveles de atenuación. Estos valores se calcularon para una altura h_s específica a un punto, sin embargo por el perfil orográfico de la zona cuya altitud puede cambiar con el desplazamiento de unos pocos metros, es conveniente revisar la influencia sobre la atenuación calculando un rango de valores de altitud.

Tabla 19: Influencia de la Altitud para C3 a frecuencias de 20 y 30 GHz (HC)

Ubicación	hs [Km]	F [GHz]	A (0.01)	A(0.05)	A (0.1)	A (0.5)	A (1)	A (5)
C3	0.210	20	49.714	35.227	28.237	8.586	5.471	1.819
C3	0.300	20	48.996	34.244	27.313	8.428	5.376	1.785
C3	0.500	20	47.384	32.442	25.683	8.087	5.163	1.710
C3	1.000	20	43.239	30.405	24.287	7.288	4.623	1.521
C3	1.500	20	38.913	26.797	21.235	6.429	4.070	1.329
C3	2.000	20	34.377	23.834	18.919	5.567	3.505	1.134
Ubicación	hs [Km]	F [GHz]	A (0.01)	A(0.05)	A (0.1)	A (0.5)	A (1)	A (5)
C3	0.210	30	104.599	78.220	64.170	20.591	13.429	4.711
C3	0.300	30	102.949	75.927	61.978	20.182	13.174	4.616
C3	0.500	30	99.252	71.694	58.080	19.294	12.605	4.405
C3	1.000	30	89.816	66.590	54.418	17.218	11.172	3.877
C3	1.500	30	80.072	58.100	47.087	15.021	9.726	3.347
C3	2.000	30	69.978	51.080	41.455	12.842	8.266	2.817

Tabla 20: Influencia de la Altitud para C3 a frecuencias de 20 y 30 GHz (HL)

Ubicación	hs [Km]	F [GHz]	A (0.01)	A (0.05)	A (0.1)	A (0.5)	A (1)	A (5)
C3	0.210	20	121.874	91.415	75.139	33.374	16.150	5.729
C3	0.300	20	120.030	89.532	73.440	32.595	15.856	5.618
C3	0.500	20	115.892	85.679	70.044	31.023	15.198	5.372
C3	1.000	20	105.295	78.215	64.016	28.132	13.537	4.751
C3	1.500	20	94.296	69.165	56.321	24.562	11.849	4.126
C3	2.000	20	82.834	60.523	49.182	21.239	10.133	3.495
Ubicación	hs [Km]	F [GHz]	A (0.01)	A(0.05)	A (0.1)	A (0.5)	A (1)	A (5)
C3	0.210	30	246.635	194.685	163.580	76.462	37.824	14.120
C3	0.300	30	242.591	190.414	159.655	74.564	37.077	13.825
C3	0.500	30	233.543	181.647	151.780	70.725	35.414	13.168
C3	1.000	30	210.524	164.427	137.518	63.543	31.244	11.531
C3	1.500	30	186.880	144.035	119.818	54.908	27.059	9.900
C3	2.000	30	162.533	124.697	103.483	46.926	22.862	8.281

Por un lado se debe validar la posición del TSI respecto al handover teniendo presente existirán elevadas atenuaciones en condición lejana, y por otro seleccionar las ubicaciones con la mayor altitud posible a una cercanía razonable, esto puede hacer que como en el caso del cálculo para C3 la atenuación disminuya drásticamente.

Los valores elevados de atenuación sobre los 20dB implican una reducción en la disponibilidad del enlace satelital. En condición de handover cercano, se sobrepasa a una $A(0.5\%)$ y en condición de handover lejana a una $A(1\%)$ implicando una disponibilidad del 99.5% y 99% o menor respectivamente. Se puede considerar la implementación de algún método de mitigación para reducir el impacto que hemos visto provocaría las intensas lluvia en las zonas cercanas a C3, así como de C4 ubicadas en el territorio selvático.

4.5 Cálculos y análisis para escenarios específicos.

4.5.1 Calidad y valores requeridos E_b/N_0

Como se puede ver de los resultados previos, la atenuación por lluvia es elevada para los TSI, particularmente para el enlace ascendente (uplink) que trabaja a mayores frecuencias, produciendo una alta contribución a la atenuación de la señal, conforme se incremente la frecuencia de uso inclusive dentro de la misma banda Ka.

Una mejor calidad representada en términos de BER implicará una menor tasa de bits erróneos en el extremo, lo cual está asociado al nivel de E_b/N_0 (*Energía por Bit a Densidad Espectral de Potencia de Ruido*) recibido en el receptor a la salida del demodulador. En la Tabla 21 se muestran especificados los 28 diferentes esquemas de ModCod con sus valores de E_s/N_0 ó E_b/N_0 requeridos de acuerdo a lo publicado para implementación con el estándar DVB-S2 [23].

El escoger valores de ModCod más bajos brinda mayor seguridad, sin embargo reduce la eficiencia espectral requiriendo mayor capacidad del transpondedor para cursar la información.

Desde el punto de vista de fiabilidad el punto más crítico de la red es el satélite ya que toda la red depende de su disponibilidad. El problema no es muy grave si es a nivel de transpondedor, ya que los satélites de O3b poseen varios transpondedores (aproximadamente 20 por satélite), mientras que la falla es general resulta más fiable que un sistema del tipo GEO, dado que se trata de una constelación de satélites los cuales se turnan cíclicamente por periodos de 45 minutos mientras están visibles y por lo tanto activos en la comunicación, volviendo la duración de la falla por no disponibilidad del satélite limitada en el peor de los casos al tiempo que tarda en ponerse visible y activo el siguiente satélite adyacente de la constelación O3b.

Tabla 21: Valores de ModCod y Eb/No requerido para DVB-S2

No.	Modulación	Codificación (FEC)	Eficiencia Espectral	Es/No Requerido [dB]	Eb/No Requerido [dB]
1	QPSK	1/4	0.490243	-2.35	0.75
2	QPSK	1/3	0.656448	-1.24	0.59
3	QPSK	2/5	0.789412	-0.30	0.73
4	QPSK	1/2	0.988858	1.00	1.05
5	QPSK	3/5	1.188304	2.23	1.48
6	QPSK	2/3	1.322253	3.10	1.89
7	QPSK	3/4	1.487473	4.03	2.31
8	QPSK	4/5	1.587196	4.68	2.67
9	QPSK	5/6	1.654663	5.18	2.99
10	QPSK	8/9	1.766451	6.20	3.73
11	QPSK	9/10	1.788612	6.42	3.89
12	8PSK	3/5	1.779991	5.50	3.00
13	8PSK	2/3	1.980636	6.62	3.65
14	8PSK	3/4	2.228124	7.91	4.43
15	8PSK	5/6	2.478562	9.35	5.41
16	8PSK	8/9	2.646012	10.69	6.46
17	8PSK	9/10	2.679207	10.98	6.70
18	16APSK	2/3	2.637200	8.97	4.76
19	16APSK	3/4	2.966720	10.21	5.49
20	16APSK	4/5	3.165620	11.03	6.03
21	16APSK	5/6	3.300180	11.61	6.42
22	16APSK	8/9	3.523140	12.89	7.42
23	16APSK	9/10	3.567300	13.13	7.61
24	32APSK	3/4	3.703290	12.73	7.04
25	32APSK	4/5	3.951570	13.64	7.67
26	32APSK	5/6	4.119540	14.28	8.13
27	32APSK	8/9	4.397850	15.69	9.26
28	32APSK	9/10	4.453000	16.05	9.56

4.5.2 Escenarios por lluvia y handover.

En general se pueden considerar cuatro posibles escenarios en función de la presencia o no de lluvia en cada tramo, en los cuales variará la calidad del sistema de comunicación, teniendo escenarios de:

- *Cielo Despejado*, siendo la condición ideal y esperada para la mayor parte del tiempo
- *Lluvia sobre un TSI* (o varios de ellos).
- *Lluvia sobre el GW*.
- *Lluvia simultáneamente sobre TSIs y GW*, siendo la condición más crítica y menos probable.

Por otro lado, considerando la posición relativa de los TSI respecto al momento mismo del handover con el satélite, siguiendo el enfoque de nuestro análisis se tiene:

- *Handover cercano (HC)*, siendo la condición óptima de posición.
- *Handover lejano (HL)*, siendo la condición más crítica de posición.

A continuación se presenta una aproximación para casos puntuales, donde se combinan valores de atenuación por lluvia (disponibilidad), condición de handover, a diferentes tasas de velocidad binaria, de los cuáles obtendremos los esquemas de modulación y codificación ModCod con los que pueden operar TSIs en las ubicaciones sobre el territorio ecuatoriano.

Los datos y consideraciones realizadas para los cálculos se presentaron en el apartado 4.2.2 Consideraciones generales. Los resultados intermedios y finales se obtienen siguiendo las ecuaciones presentadas en el Anexo 3.

Cielo despejado-Handover cercano (HC)

Enlaces: TSI – Satélite – GW

Considerando el canal de la comunicación (Inbound) desde cada una de las posibles ubicaciones geográficas seleccionadas para un TSI, se determina el valor de la **C/No a** (*Potencia de Portadora/Densidad de Ruido*) para el enlace ascendente, hacia el satélite, como se muestra en la Tabla 22.

En la Tabla 22 (y las siguientes) de este apartado se usa acrónimos, donde:

- L el: Pérdidas en espacio libre
- L adc: Pérdidas adicionales

- L GO-Ant: Pérdidas entre la guía de onda y antena
- P (HPA): Potencia de trabajo del HPA
- G (Ant tx): Ganancia de la antena de transmisión
- PIRE TSI: Potencia Isotrópica Radiada Equivalente del TSI
- PIRE sat: Potencia Isotrópica Radiada Equivalente del satélite.
- G/T sat: Figura de mérito del satélite
- G/T GW: Figura de mérito del gateway
- Eb/No: Energía por bit/Densidad espectral de ruido
- C/No a: Potencia Portadora/densidad de ruido para enlace ascendente
- C/No d: Potencia Portadora/densidad de ruido para enlace descendente.

Tabla 22: Cálculo de C/No para el enlace ascendente con cielo despejado y HC

Ubicación	L el	L adc	P (HPA)	G(Ant tx)	PIRE TSI	G/T sat	C/No a
	[dB]	[dB]	[dB]	[dBi]	[dBW]	[dB/K]	[dB]
C1	200.12	1.00	13.02	52.8	64.82	5.24	97.54
C2	200.12	1.00	13.02	52.8	64.82	5.24	97.54
C3	200.11	1.00	13.02	52.8	64.82	5.24	97.55
C4	200.13	1.00	13.02	52.8	64.82	5.24	97.54
C5	200.16	1.00	13.02	52.8	64.82	5.24	97.50
C6	200.11	1.00	13.02	52.8	64.82	5.24	97.55
C7	200.12	1.00	13.02	52.8	64.82	5.24	97.54
I1	200.11	1.00	13.02	52.8	64.82	5.24	97.55
I2	200.11	1.00	13.02	52.8	64.82	5.24	97.55
I3	200.12	1.00	13.02	52.8	64.82	5.24	97.55

Consecuencia de la diferentes distancias y pérdidas por propagación entre las ubicaciones para los TSI y el satélite, el parámetro que varía son las pérdidas en el espacio libre (L el), sin embargo es muy poca la variación, esto hace a su vez que el valor C/No para el enlace ascendente sea prácticamente muy cercano para las diferentes ubicaciones.

Para el otro tramo, desde el satélite hacia el GW se determina en base a los parámetros mostrados en la Tabla 23 el valor de C/No para el enlace descendente el cual únicamente es enviado a través de un solo haz hacia el GW.

Tabla 23: Cálculo de C/No para enlace descendente con cielo despejado con HC

Ubicación	L el	L adc	G/T GW	PIRE sat	C/No d
	[dB]	[dB]	[dB/K]	[dBW]	[dB]
GW	196.86	1.00	37.00	50.00	117.74

Dado que el sistema O3b está formado por satélites transparentes, se calcula el valor de (C/No) Total para ambos enlaces, que es mostrado en la Tabla 24, con lo cual se puede calcular el Eb/No disponible para diferentes tasas de velocidad de transmisión binaria a nivel físico (Rn). Los valores a considerar son 1Mbps, 4 Mbps, 10Mbps, 100Mbps y 800Mbps en bps.

Tabla 24: Eb/No disponible a diferentes valores de velocidad de datos (Rn) con HC

		R1= 1x10 ⁶ [bps]	R2= 4x10 ⁶ [bps]	R3= 1x10 ⁷ [bps]	R4= 1x10 ⁸ [bps]	R5= 8x10 ⁸ [bps]
Ubicación	(C/No) Tot	Eb/No	Eb/No	Eb/No	Eb/No	Eb/No
	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
C1	97.50	37.50	31.48	27.50	17.50	8.47
C2	97.50	37.50	31.48	27.50	17.50	8.47
C3	97.51	37.51	31.49	27.51	17.51	8.47
C4	97.49	37.49	31.47	27.49	17.49	8.46
C5	97.46	37.46	31.44	27.46	17.46	8.43
C6	97.51	37.51	31.49	27.51	17.51	8.48
C7	97.50	37.50	31.48	27.50	17.50	8.47
I1	97.51	37.51	31.49	27.51	17.51	8.48
I2	97.51	37.51	31.49	27.51	17.51	8.48
I3	97.50	37.50	31.48	27.50	17.50	8.47

A partir de los valores de **Eb/No disponible**, es posible asociar diferentes valores especificados de **Eb/No requerido** por el estándar DVB-S2 mostrados en la Tabla 21. Con esto podremos seleccionar que tipos de ModCod es posible utilizar y si adicionalmente quedaría algún margen.

En condición de cielo despejado, la ubicación geográfica no afecta de manera significativa los valores de Eb/No disponible. En el lado del receptor, a la salida del demodulador, para cada una de las diferentes posibles ubicaciones los valores de Eb/No obtenidos en la Tabla 24 son muy cercanos entre sí.

Por otro lado, estos valores para tasas considerables de velocidad como de 800Mbps son relativamente elevados respecto al **Eb/No requerido** especificado para DVB-S2 en Tabla 21, por lo que *sin considerar pérdidas de implementación* sería posible utilizar elevados factores de ModCod de hasta 32APSK y FEC 5/6. Si fuera necesario mejorar la relación Eb/No, se podría utilizar antenas de mayor tamaño a 1.8m o aumentar la potencia de trabajo del HPA de ser el caso.

Enlaces: GW- Satélite - TSI

Ahora, considerando el canal de la comunicación desde el GW (Outbound) hacia el TSI, se determina el valor de C/No a para el enlace ascendente. El valor obtenido se muestra en la Tabla 25, siendo la portadora transmitida desde un único GW.

Tabla 25: Cálculo de C/No para enlace ascendente con cielo despejado desde GW

Ubicación	L el	L G.O-Ant	L adc	P (HPA)	G(Ant tx)	PIRE GW	G/T sat	C/No a
	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dBi]	[dBW]		[dB]
GW	200.38	1.00	1.00	23.99	58.7	81.69	5.24	114.15

Nótese que la pérdida en el espacio libre (L el) es mayor en 3.52 dB, dada la mayor frecuencia utilizada para el enlace ascendente de 30 GHz.

Tabla 26: Cálculo de C/No para enlace descendente con cielo despejado con HC

Ubicación	L el	L adc	G/T GW	PIRE sat	C/No d
	[dB]	[dB]	[dB/K]	[dBW]	[dB W/Hz]
C1	196.60	1.00	27.80	50.00	108.80
C2	196.60	1.00	27.80	50.00	108.81
C3	196.59	1.00	27.80	50.00	108.81
C4	196.60	1.00	27.80	50.00	108.80
C5	196.64	1.00	27.80	50.00	108.76
C6	196.59	1.00	27.80	50.00	108.81
C7	196.60	1.00	27.80	50.00	108.80
I1	196.59	1.00	27.80	50.00	108.81
I2	196.59	1.00	27.80	50.00	108.81
I3	196.59	1.00	27.80	50.00	108.81

En condición de cielo despejado, la ubicación geográfica no afecta de manera significativa los valores calculados de Eb/No disponible. En el lado del receptor para cada una de las diferentes posibles ubicaciones de TSIs los valores de Eb/No obtenidos en la Tabla 26 son muy cercanos entre sí, su pequeña diferencia es consecuencia del valor de las respectivas pérdidas en espacio libre.

En condición de cielo despejado para el Outbound, la ubicación geográfica tampoco afecta de manera significativa los valores de Eb/No disponible. En el lado del receptor, a la salida del demodulador, para cada una de las diferentes posibles ubicaciones los valores de Eb/No calculados en la Tabla 24 son muy cercanos entre sí.

Tabla 27: Eb/No disponible a diferentes valores de velocidad de datos (Rn) con HC

Ubicación		R1= 1x10 ⁶	R2= 4x10 ⁶	R3= 1x10 ⁷	R4= 1x10 ⁸	R5= 8x10 ⁸
	(C/No) Tot	Eb/No	Eb/No	Eb/No	Eb/No	Eb/No
	[dB W/Hz]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
C1	107.69	47.69	41.67	37.69	27.69	18.66
C2	107.69	47.69	41.67	37.69	27.69	18.66
C3	107.69	47.69	41.67	37.69	27.69	18.66
C4	107.69	47.69	41.66	37.69	27.69	18.65
C5	107.66	47.66	41.64	37.66	27.66	18.63
C6	107.69	47.69	41.67	37.69	27.69	18.66
C7	107.69	47.69	41.67	37.69	27.69	18.66
I1	107.70	47.70	41.67	37.70	27.70	18.66
I2	107.69	47.69	41.67	37.69	27.69	18.66
I3	107.69	47.69	41.67	37.69	27.69	18.66

Los valores obtenidos en la Tabla 27 son relativamente elevados respecto al *Eb/No* *requerido* especificado para DVB-S2 en Tabla 21, permitiendo un margen (sin considerar pérdidas de implementación) de aproximadamente 9dB a una tasa elevada de velocidad como de 800Mbps para el Outbound, por lo que sería posible utilizar elevados factores de ModCod de hasta 32APSK y FEC 9/10.

Comparando valores Eb/No para ambos sentidos de la comunicación, y bajo las consideraciones generales realizadas, es el canal Inbound (o de retorno) el que tiene una menor capacidad para soportar una posible atenuación por lluvia en banda Ka. Por otro lado, la atenuación es más crítica a frecuencias altas y en zonas lluviosas, por lo que es conveniente analizar el comportamiento en el lado del TSI en base a los resultados presentes y del cálculo de la atenuación a diferentes probabilidades de apartados anteriores.

Atenuación por lluvia sobre el tramo del TSI en Handover cercano (HC)

Tomando los cálculos de la sección anterior, ahora introducimos en el lado del TSI una atenuación por lluvia con una probabilidad A 0.5%.

Enlaces: TSI - Satélite - GW

Considerando los valores de atenuación calculados previamente para cada una de las ubicaciones en la Tabla 16, se obtienen los valores de Eb/No disponible a diferentes tasas de velocidad de transmisión Rn en bps.

Tabla 28: Eb/No disponible con atenuación por lluvia A 0.5% del lado del TSI en HC

			R1 = 1x10 ⁷	R2 = 1x10 ⁸	R3 = 8x10 ⁸
Ubicación	A 0.5%	(C/No) Tot	Eb/No	Eb/No	Eb/No
	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
C1	7.11	90.43	20.43	10.43	1.39
C2	10.90	86.64	16.64	6.64	-2.39
C3	20.59	76.96	6.96	-3.04	-12.08
C4	14.06	83.48	13.48	3.48	-5.55
C5	8.16	89.34	19.34	9.34	0.31
C6	4.10	93.43	23.43	13.43	4.40
C7	3.91	93.62	23.62	13.62	4.58
I1	9.03	88.51	18.51	8.51	-0.52
I2	9.95	87.59	17.59	7.59	-1.44
I3	10.00	87.54	17.54	7.54	-1.49

Los valores por debajo de 0.59 no posibilitan el uso de ningún valor de ModCod a dicha velocidad. Como era de esperarse C3 no admite un R de 100Mbps y C4 está limitado a uso de ModCod menos exigentes que QPSK a 5/6, esto sin considerar ningún margen adicional.

Por otro lado, si consideramos el comportamiento a una R de 10Mbps para una ubicación C3, donde tenemos una Eb/No de 6.96, si quisiéramos alcanzar el mismo rango de ModCod que alcanzamos con C4 (por tomar un ejemplo y relacionarla a otra ubicación), sería necesario contratar un mayor ancho de banda (BW), lo que encarecería el uso del sistema en la ubicación C3.

Enlaces: GW- Satélite – TSI

Considerando los valores de atenuación calculados previamente para cada una de las ubicaciones en la Tabla 15, se obtienen los valores de Eb/No disponible a diferentes tasas de velocidad de transmisión Rn en bps como se muestra en la Tabla 29.

Los valores de atenuación en este sentido de la comunicación son menores dada la frecuencia de trabajo del enlace descendente, así inclusive C3 admite un R de 100Mbps, aunque con un bajo margen adicional de 1.46 dB respecto al Eb/No requerido por DVB para un ModCod de 32APSK a 9/10.

Tabla 29: Eb/No disponible con atenuación por lluvia A 0.5% del lado del TSI en HC

			R1 = 1x10 ⁷	R2 = 1x10 ⁸	R3 = 8x10 ⁸
Ubicación	A 0.5%	(C/No) Tot	Eb/No	Eb/No	Eb/No
	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
C1	2.90	105.30	35.30	25.30	16.27
C2	4.50	103.88	33.88	23.88	14.85
C3	8.59	100.05	30.05	20.05	11.02
C4	5.85	102.63	32.63	22.63	13.59
C5	3.40	104.82	34.82	24.82	15.79
C6	1.81	106.23	36.23	26.23	17.20
C7	1.72	106.30	36.30	26.30	17.27
I1	3.70	104.59	34.59	24.59	15.56
I2	4.09	104.25	34.25	24.25	15.22
I3	4.11	104.23	34.23	24.23	15.20

Atenuación por lluvia A 0.5% en el lado del TSI en Handover Lejano (HL)

Ahora, se analiza cómo afecta al escenario anterior de atenuación por lluvia, la posición relativa del satélite en una condición de handover lejano.

Enlaces: TSI – Satélite –GW

Considerando los valores de atenuación calculados previamente para esta condición específica de handover en la Tabla 18, se obtienen los valores de Eb/No disponible a diferentes tasas de velocidad de transmisión Rn en bps.

Tabla 30: Eb/No disponible con atenuación por lluvia A 0.5% del lado del TSI en HL (Inbound)

	TSI		R1 = 1x10 ⁶	R2 = 4x10 ⁶	R3 = 1x10 ⁷
Ubicación	A 0.5%	(C/No) Tot	Eb/No	Eb/No	Eb/No
	[dB]	[dB W/Hz]	[dB]	[dB]	[dB]
C1	25.36	69.56	9.56	3.54	-0.44
C2	39.51	55.42	-4.58	-10.60	-14.58
C3	76.46	18.46	-41.54	-47.56	-51.54
C4	51.36	43.56	-16.44	-22.46	-26.44
C5	29.30	65.61	5.61	-0.41	-4.39
C6	14.47	80.45	20.45	14.43	10.45
C7	13.72	81.20	21.20	15.18	11.20
I1	32.57	62.36	2.36	-3.66	-7.64
I2	35.97	58.96	-1.04	-7.06	-11.04
I3	36.11	58.82	-1.18	-7.20	-11.18

La atenuación presenta valores más elevados respecto a la condición de handover cercano, lo cual disminuye los niveles de Eb/No disponibles obtenidos como se muestra en la Tabla 30. Particularmente limita las prestaciones de C3, así como de C4, C2 en el territorio continental, y I2 e I3 en el territorio insular. No alcanzan a cubrir el mínimo valor requerido por el estándar DVB-S2 para Eb/No de 0.59 (QPSK a 1/3) para ninguna de las velocidades tomadas como referencia para análisis.

Por otro lado, en el caso de ubicarse en C6 y C7 se obtendría un Eb/No de 11.2 dB, lo cual permite cubrir el valor Eb/No requerido para un ModCod 32APSK a 9/10 con un pequeño margen de 0.89 y 0.64 dB respectivamente para una Rn de 10 Mbps.

Enlaces: GW- Satélite - TSI

En este sentido de la comunicación (Outbound) los valores de atenuación del lado del TSI son menores respecto a los anteriores, principalmente por la frecuencia del enlace descendente. Lo cual permite que en el TSI se tengan mejores niveles de Eb/No disponible como se muestra en la Tabla 31, lográndose cubrir valores de Eb/No requerido y por consiguiente mejores combinaciones de ModCod. Particularmente, en la condición planteada, para A0.5% solo del lado del TSI y con cielo despejado del lado del lado GW, la disponibilidad del sistema¹⁹ sería aproximadamente 99.5% del año.

Tabla 31: Eb/No disponible con atenuación por lluvia A 0.5% del lado del TSI en HL (Outbound)

	TSI		R = 1x10 ⁷	R = 1x10 ⁸	R = 8x10 ⁸
Ubicación	A 0.5%	(C/No) Tot	Eb/No	Eb/No	Eb/No
	[dB]	[dB W/Hz]	[dB]	[dB]	[dB]
C1	10.70	95.43	25.43	15.43	6.40
C2	16.97	89.20	19.20	9.20	0.17
C3	33.37	72.81	2.81	-7.19	-16.22
C4	22.31	83.86	13.86	3.86	-5.17
C5	12.68	93.43	23.43	13.43	4.39
C6	6.59	99.33	29.33	19.33	10.30
C7	6.23	99.67	29.67	19.67	10.64
I1	13.87	92.27	22.27	12.27	3.24
I2	15.36	90.79	20.79	10.79	1.76
I3	15.42	90.74	20.74	10.74	1.71

Es importante notar bajo condiciones similares, como es variable la atenuación por lluvia para una misma probabilidad entre diferentes ubicaciones restringiendo el rendimiento que podría lograrse. Así, mientras en C7 la señal por lluvia se atenúa 6.23dB, en C3 se atenúa 33.37dB, es decir en C3 dispondremos de una señal

¹⁹ Para sistemas no GEO, en los que el ángulo de elevación es variable, la disponibilidad del enlace puede calcularse conociendo la gama operativa de los ángulos, UIT-R P.618-9 sec. 8.

aproximadamente 500 veces más atenuada y por lo tanto con mayores requerimientos de ModCod y menores niveles de velocidad de transmisión R_n .

Atenuación por Lluvia A 1% en ambos lados TSI y GW en Handover Lejano (HL)

Finalmente, se analiza cómo afectaría al escenario anterior de atenuación por lluvia en ambos tramos del sistema satelital, considerando la posición relativa del satélite en una condición de handover lejano.

Enlaces: TSI – Satélite –GW

Al considerar un incremento de la probabilidad de atenuación por lluvia hasta un 1% de probabilidad (A 1%) tanto en el tramo del TSI como en el GW, aumenta la indisponibilidad del sistema. La disponibilidad total se calcula como el producto de la disponibilidad de cada tramo (99% x 99%), resultando en una disponibilidad del sistema del 98% para aquellos valores de la Tabla 32 con un E_b/N_0 resultante que sean mayores a 0.57 para las diferentes velocidades R_n en bps.

Tabla 32: Cálculo de E_b/N_0 disponible con atenuación por lluvia A 1% en ambos tramos (Inbound)

	TSI	GW		R2= 4x10⁶	R3= 1x10⁷	R4= 1x10⁸
Ubicación	A 1%	A 1%	(C/No) Tot	E_b/N_0	E_b/N_0	E_b/N_0
	[dB]	[dB]	[dB W/Hz]	[dB]	[dB]	[dB]
C1	12.22	2.09	82.70	16.68	12.70	2.70
C2	19.23	2.09	75.70	9.68	5.70	-4.30
C3	37.82	2.09	57.10	-8.92	-12.90	-22.90
C4	25.24	2.09	69.69	3.66	-0.31	-10.31
C5	14.21	2.09	80.70	14.68	10.70	0.70
C6	6.84	2.09	88.07	22.05	18.07	8.07
C7	6.51	2.09	88.40	22.38	18.40	8.40
I1	15.72	2.09	79.21	13.19	9.21	-0.79
I2	17.42	2.09	77.50	11.48	7.50	-2.50
I3	17.53	2.09	77.40	11.37	7.40	-2.60

Para C3 la atenuación es elevada, por lo que a las tasas de velocidad de transmisión R analizadas no alcanza el valor de E_b/N_0 requerido para ninguno de los esquemas de ModCod. Si se quisiera lograr mayores niveles de E_b/N_0 disponible en el GW, se podría utilizar antenas de mayor tamaño recomendadas en la Web del sistema como 2.4 o 4.5m ó aumentar la potencia de trabajo del HPA de ser el caso.

Por otro lado, si bien la disponibilidad del enlace se ve reducida aproximadamente a 98% (o menos), es posible que podamos prever algún método de mitigación para las ubicaciones como C3, en las que la atenuación se encuentra por los 37.82 dB.

Enlaces: GW – Satélite – TSI

De forma similar se realizan los cálculos para un incremento de la probabilidad de atenuación por lluvia con un 1% de probabilidad (A 1%) tanto en el tramo del TSI como en el GW, como se muestra en la Tabla 33.

La disponibilidad total se calcula como el producto de la disponibilidad de cada tramo (99% x 99%), resultando en una disponibilidad del sistema aproximadamente del 98% para aquellos valores con un Eb/No resultante que sean mayores a 0.57 para las diferentes velocidades Rn en bps.

Tabla 33: Cálculo de Eb/No disponible con atenuación por lluvia 1% en ambos tramos (Outbound)

	GW	TSI		R1 = 1x10 ⁷	R2 = 1x10 ⁸	R3 = 8x10 ⁸
Ubicación	A 1%	A 1%	(C/No) Tot	Eb/No	Eb/No	Eb/No
	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
C1	5.26	5.04	100.54	30.54	20.54	11.51
C2	5.26	8.08	97.73	27.73	17.73	8.70
C3	5.26	16.15	89.94	19.94	9.94	0.91
C4	5.26	10.72	95.13	25.13	15.13	6.10
C5	5.26	6.02	99.24	29.24	19.24	10.20
C6	5.26	3.05	101.47	31.47	21.47	12.44
C7	5.26	2.89	101.57	31.57	21.57	12.54
I1	5.26	6.54	98.82	28.82	18.82	9.79
I2	5.26	7.27	98.21	28.21	18.21	9.18
I3	5.26	7.32	98.17	28.17	18.17	9.14

En este caso, al considerar una R de 800Mbps únicamente en la ubicación C3 apenas se dispone del Eb/No suficiente para cumplir con el Eb/No requerido para esquemas bajos de ModCod con QPSK a valores de FEC de 1/3, 1/4, 2/5, sin considerar pérdidas por implementación.

El escoger valores de ModCod más bajos brinda mayor seguridad, sin embargo reduce la eficiencia espectral requiriendo mayor capacidad del transpondedor para una cursar la información. Valores de ModCod elevados pueden ser utilizados hasta un límite (en función del Eb/No requerido de acuerdo al estándar DVB-S2) para aprovechar la capacidad del satélite, pero se reduce la probabilidad de una transmisión exitosa de los paquetes.

Justificación

Con lo expuesto en los anteriores apartados, a tener en cuenta el carácter aleatorio de la lluvia en cualquier tramo del sistema y considerando además existen áreas

tropicales donde la lluvia con su atenuación puede interrumpir la operación del sistema en una cierta configuración de parámetros, es recomendable el sistema incorpore el uso de técnicas o herramientas automáticas de mitigación para contrarrestar el desvanecimiento producido por lluvias fuertes particularmente en áreas tropicales a fin de mantener la operación y la capacidad del sistema en un área de servicio.

4.6 Técnicas de mitigación para desvanecimiento por lluvia (FMT)

Varias tecnologías, como se muestra en la Tabla 34, han sido desarrolladas para compensar el desvanecimiento por lluvia, en función del sentido de la comunicación [24]:

Tabla 34. Técnicas de mitigación para desvanecimiento por lluvia

<p>Canal de envío (Hacia el GW)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Codificación Adaptativa ✓ Modulación Adaptativa ✓ Control de potencia (enlace subida) ✓ Diversidad RFT ✓ Redundancia Geográfica NOC ✓ Dynamic Rate Adaptation (DRA) ✓ Combinación de varias (ACM)
<p>Canal de retorno (Hacia el Terminal)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Codificación LDPC ✓ Codificación FEC Adaptativa ✓ Selección de ruta Adaptativa ✓ Control de potencia (enlace subida) ✓ Dynamic Rate Adaptation (DRA) ✓ Combinación de varias (ACM)

A lo largo de una área de servicio satelital, que para el caso de O3b es de un diámetro de aproximadamente 700Km sobre la superficie terrestre, se puede producir significativa variabilidad en la atenuación de la señal producto de las diferentes y variadas condiciones climatológicas posibles y que tiene baja probabilidad que afectan

de forma simultánea a un número elevado de Terminales (TSI) que son parte de la red satelital, como se muestra en la Figura 37.

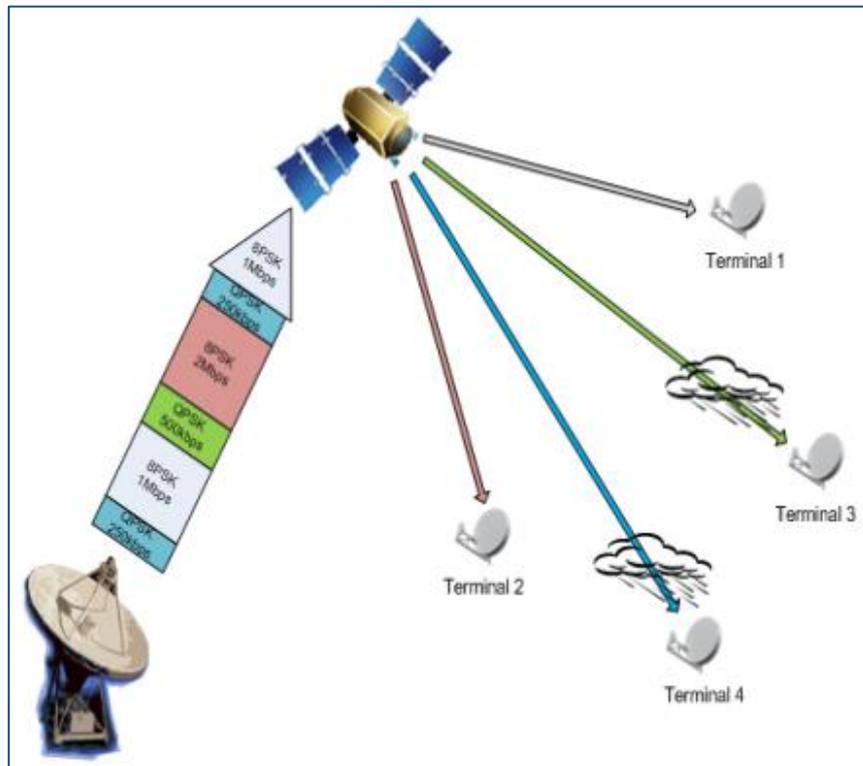


Figura 37: Técnica de mitigación ACM con determinados Terminales (TSI)

Un número de tecnologías y sus combinaciones pueden ser ajustados desde el GW para atender de forma particular a los TSI afectados, manteniendo una mayor capacidad a los que no sufren afectación. Entre los más típicos tenemos control de potencia, modulación y codificación adaptativos, para mitigar la variabilidad de los efectos de propagación.

Por su parte, los Terminales TSI que se hallan dentro del mismo haz de cobertura pueden variar su configuración de capa física y transmitir diferentes valores para cada una de las técnicas como son CODE (ejm: FEC), ModCod, Velocidad de símbolo, para lograr un comportamiento ante eventos adversos como el que se ilustra en Figura 38 ²⁰.

²⁰ Efficient and Effective Usage of Ka-band (ITU Region Seminar THAICOM 2012)

Particularmente el nuevo estándar DVB- 2, introduce el esquema de modulación y codificación dinámica (ACM) para el enlace de retorno, donde para mantener la disponibilidad del enlace se incrementa la energía por bit de la información transmitida a expensas de disminuir la velocidad de transmisión. Esta tecnología de equipamiento moderno, está disponible en ambas bandas Ku y Ka y minimizará las diferencias percibidas en la disponibilidad del enlace.

En sistemas interactivos que incorporan ACM se estiman ganancias experimentales de capacidad de los satélite de hasta un 200%. Adicionalmente con ACM la disponibilidad del servicio es mejorada en comparación con un sistema CCM. DBV-S2 presenta capacidades adaptativas para aprovechar mediante ACM los aproximadamente 4 - 8 dB (margen en cielo despejado) de potencia o incluso más, en función de la banda de trabajo.

El estándar DVB-S2 especifica 28 diferentes ModCod (Tabla 21) , de los cuales es seleccionado el más apropiado en función tanto de los valores C/No a la entrada del receptor, como de los algoritmos de predicción de la estimación del estado del canal, lográndose un valor estimado de relación Señal a Ruido (SNR) para la transmisión. Por su parte el estándar DVB-RCS especifica 14 diferentes ModCod. En un sistema ACM, los parámetros de transmisión típicamente cambian dinámicamente sobre una base trama a trama.

Existen estudios donde se abordan esquemas combinados de ACM junto con otras técnicas, como el realizado en [26], donde se compara el rendimiento para un sistema DVB-RCS2 usando ACM, respecto del obtenido en un esquema combinando ACM+DRA. Ambos esquemas presentan resultados muy similares respecto al throughput y eficiencia espectral, notándose únicamente picos más altos de tasas de datos para el esquema combinado ACM+DRA.

Justificación

La incorporación de una técnica ACM en la arquitectura satelital es fundamental en altas frecuencias como la banda Ka y más aún si un TSI estará localizado en zonas de clima tropical con eventos de elevada intensidad de lluvia, como el caso de las ubicaciones C3 y C2.

La gran ventaja de ACM (en comparación con CCM) cuando se opera en bandas de frecuencia Ka, cuya atenuación por desvanecimiento se hace grande en presencia de lluvia intensa, es que permite adaptar la configuración de capa física de los TSI de forma individual para mantener el servicio activo. De esta forma la prestación de servicios a los usuarios activos afectados por lluvia tiene un impacto mínimo en el

throughput agregado, ya que sólo un porcentaje muy pequeño son afectados al mismo tiempo sobre la región de cobertura del satélite.

El escoger valores de ModCod más bajos brinda mayor seguridad, sin embargo reduce la eficiencia espectral requiriendo mayor capacidad del transpondedor para una cursar la información. Valores de ModCod elevados pueden ser utilizados hasta un límite (en función a la SNR o E_s/N_0) para aprovechar la capacidad del satélite, pero se reduce la probabilidad de una transmisión exitosa de los paquetes.

4.7 Restricciones Banda Ku, Retardo, Jitter.

En las redes modernas basadas en IP existen procedimientos para mitigar las limitaciones propias de las comunicaciones. Así, el Jitter se compensa por implementación de **buffers** en los puntos finales, la pérdida de paquetes es muy baja en las redes que emplean códigos de corrección de errores de alto rendimiento tales como de LDPC (que se usa en DVB-S2), sin embargo el retardo y sus efectos son más difíciles de evitar ya que su causa fundamental está vinculada a las grandes distancias que debe recorrer la señal.

Respecto a la latencia se produce por la combinación de varias causas como: la propagación en el medio, el tiempo de trama, encolamiento (de buffers), procesamiento (protocolos, enrutamiento, conmutación), que a menudo producen perfiles de latencia de red complejos y variables [27].

En el caso del sistema O3b, las pruebas en campo realizadas a finales del 2013, desde el Gateway en Lurín (Lima) hacia una estación de prueba, utilizando los 4 satélites disponibles a esa fecha reporta que la variación de retardo que se produjo en cada handover para la comunicación es de aproximadamente 5mSeg. La Figura 39 muestra la variación de retardo en pruebas durante un período de 7.5 horas, donde se producen 5 handovers. Los resultados obtenidos son de un mínimo de 60mS hasta un máximo de 80mS de retardo conforme el satélite activo se traslada en su órbita. El valor máximo obtenido de 80mS se produce específicamente al realizarse el handover hacia el satélite que tomará parte en la comunicación (pasando a estado activo), el cual se encuentra más lejano respecto del que finaliza su periodo de avistamiento (pasando a estado inactivo) [28].

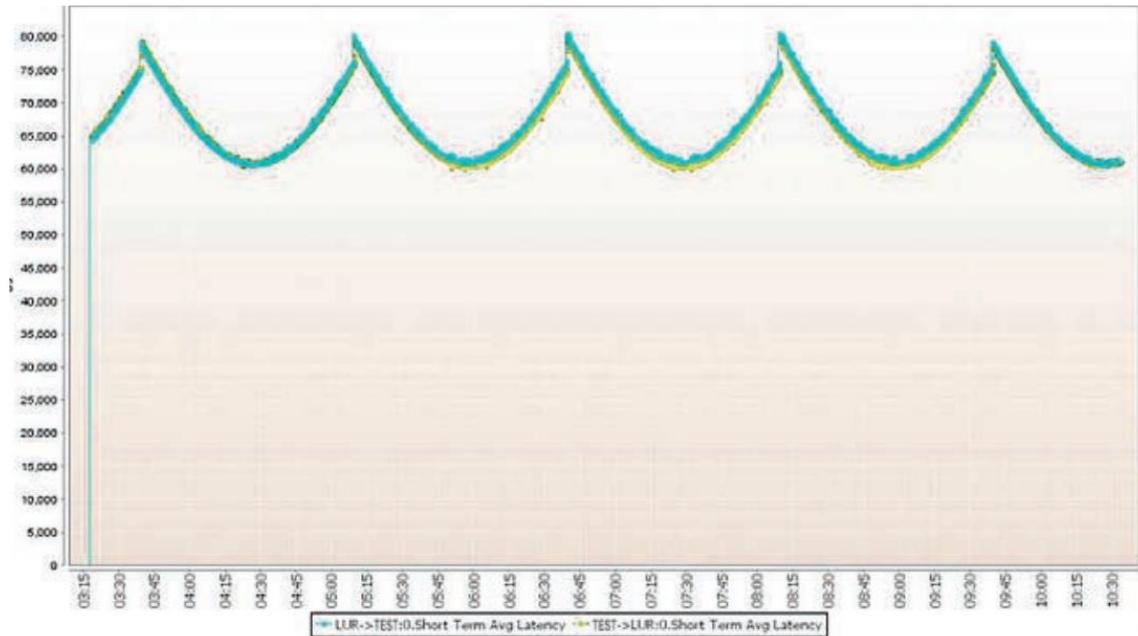


Figura 39: Prueba de retardo de propagación en la Red O3b.

En pruebas complementarias se reporta un RTT medido en el link satelital de aproximadamente 150mseg, con un rendimiento máximo (throughput) de 590Mbps en el enlace saliente y 240Mbps en el enlace de retorno [28].

4.7.1 Retardo y RTT del Sistema

El tipo de retardo que más afecta en los sistemas satelitales es el causado por la propagación de la señal.

A diferencia de un sistema GEO donde la distancia de propagación se considera constante y no existe handover, en el sistema O3b uno de los aspectos significativos a tomar en cuenta en el diseño de los TSI es el escenario en que se producen las mayores condiciones de retardo.

Dado el constante movimiento del satélite, la distancia entre un TSI y el satélite es variable, por consiguiente el retardo de propagación tendrá un rango de variación. Adicionalmente el retardo, dependerá de la ubicación de los TSI sobre el Ecuador y particularmente su posición relativa respecto al satélite activo *al momento en que se realiza el handover*.

En una primera aproximación, como se había esquematizado en la Figura 32, un terminal situado en Ecuador realizaría idealmente el Handover a un ángulo de 22.5 grados de forma que la distancia de sus dos antenas tanto al satélite activo y al adyacente resultan iguales, lo que implicaría una variación de retardo Δr entre trayectos de la señal cercana a 0, como se muestra en la Figura 40. Sin embargo,

analicemos que sucedería para ese mismo satélite, en ese mismo momento del handover, pero para otras TSI alejadas de esta condición y que se acerquen o incluso estén debajo del satélite activo; situación muy probable considerando que el objetivo es que el TSI genérico pueda operar desde cualquier lugar de la geografía ecuatoriana, particularmente en zonas remotas o con escasa población.

Los efectos serían los mostrados en la Figura 40, donde para un TSI(n) genérico que precisamente tienda a estar debajo del satélite (tienda a alinearse respecto al punto de proyección del satélite con el centro de la tierra), se tendrá una creciente variación del retardo Δr , el cual es acotado entre un valor máximo y un mínimo.

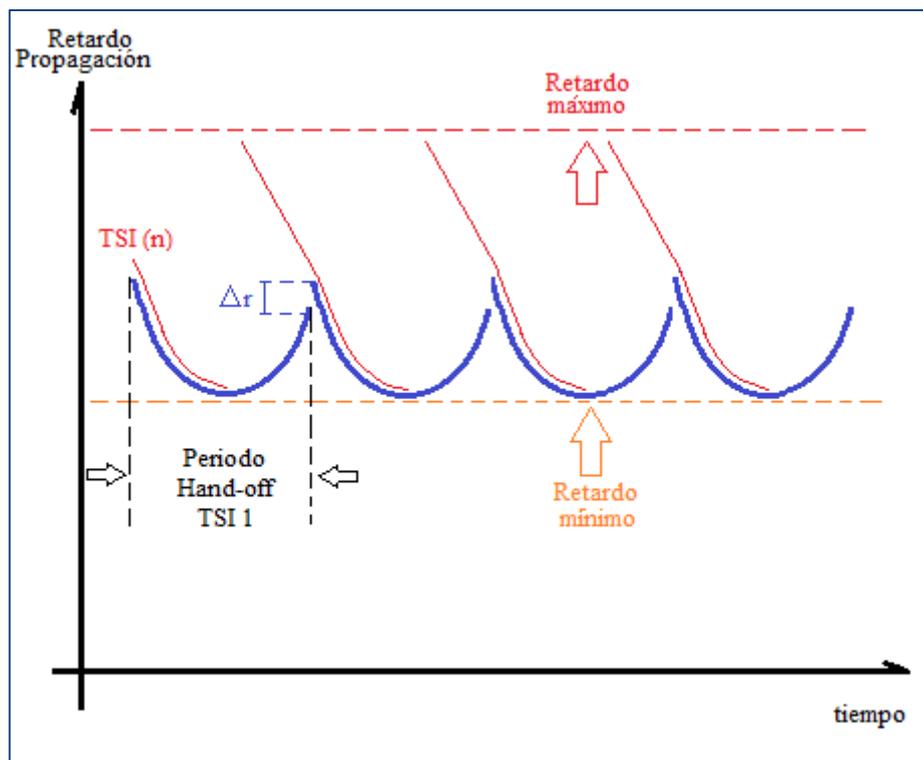


Figura 40: Variación del Retardo de Propagación para un TSI en el Sistema O3b

Así, durante el handover para la antena que ha mantenido activa la comunicación la distancia de propagación es mínima, disminuyendo el retardo hasta alcanzar un mínimo valor, mientras que simultáneamente la condición de mayor retardo se da para la antena que apunta al satélite adyacente pasando luego de unos momentos a estar activa, reflejándose un valor máximo de retardo para este trayecto de la señal.

Por lo tanto, el retardo depende del momento que se ejecuta el handover y de la posición relativa del TSI. A efectos de diseño y operación de un TSI genérico se consideran las condiciones más exigentes y dado que el efecto de retardo sobre la comunicación es acumulativo, se deberá considerar el mayor de los trayectos, lo cual

implica también considerar ubicaciones geográficas que no estén sobre la línea Ecuatorial.

Retardo de propagación en condición de Handover Cercano (HC)

La Tabla 35 muestra los valores de retardo obtenidos en diferentes ubicaciones de un TSI. El retardo promedio para solo salto completo (TSI-Satélite-GW) es de 54.63 mSeg, mientras que el RTT es de 109.25 mSeg.

Tabla 35: Cálculo del Retardo de propagación en condición HC

Ubicación (Cn)	Distancia TSI-sat [km]	Distancia GW-sat [Km]	Retardo GW [mSeg]	Retardo Cn [mSeg]	Retardo (GW+Cn) [mSeg]	RTT [mSeg]
C1	8070.33	8317.74	27.73	26.90	54.63	109.25
C2	8065.56	8317.74	27.73	26.89	54.61	109.22
C3	8063.63	8317.74	27.73	26.88	54.60	109.21
C4	8074.01	8317.74	27.73	26.91	54.64	109.28
C5	8105.40	8317.74	27.73	27.02	54.74	109.49
C6	8062.73	8317.74	27.73	26.88	54.60	109.20
C7	8071.86	8317.74	27.73	26.91	54.63	109.26
I1	8062.18	8317.74	27.73	26.87	54.60	109.20
I2	8062.68	8317.74	27.73	26.88	54.60	109.20
I3	8065.42	8317.74	27.73	26.88	54.61	109.22

Retardo de propagación en condición de Handover Lejano (HL)

La Tabla 36 muestra los valores de retardo obtenidos para diferentes ubicaciones de un TSI. El retardo promedio para un salto completo es de 73.15 mSeg, mientras que el RTT promedio es de 146.29 mSeg.

Tabla 36: Cálculo del Retardo de propagación en condición HL

Ubicación	Distancia TSI-sat [km]	Distancia GW-sat [Km]	Retardo GW [mSeg]	Retardo Cn [mSeg]	Retardo (GW+Cn) [mSeg]	RTT [mSeg]
C1	10906.67	11037.32	37	36	73.15	146.29
C2	10904.17	11037.32	37	36	73.14	146.28
C3	10903.16	11037.32	37	36	73.13	146.27
C4	10908.60	11037.32	37	36	73.15	146.31
C5	10925.04	11037.32	37	36	73.21	146.42
C6	10902.69	11037.32	37	36	73.13	146.27
C7	10907.47	11037.32	37	36	73.15	146.30
I1	10902.41	11037.32	37	36	73.13	146.26
I2	10902.67	11037.32	37	36	73.13	146.27
I3	10904.10	11037.32	37	36	73.14	146.28

Es importante notar que la condición de handover lejano genera un incremento del retardo de 37.04 mSeg para RTT, lo cual implica un *incremento de aproximadamente un 34% respecto a la condición de handover cercano*.

Los valores obtenidos, incluso en condición de HL, son muy convenientes respecto a un sistema tipo GEO donde típicamente tienen valores sobre los 500mSeg, de allí la potencialidad de este sistema para ser utilizado en aplicaciones de tipo interactivas que sean sensibles al retardo.

Por otro lado, los tiempos de procesamiento y almacenamiento por buffers son variables y dependen de varios factores como la configuración. Se considera para este caso tradicionalmente 20-30 ms.

Considerado el uso del estándar DVB-S2/RCS2, el retardo podrá ser desde pocos mSeg hasta el máximo tiempo de trama de 69.63 mSeg.

Por otro lado, al ser el satélite de tipo transparente no se considera retardo por *procesamiento a bordo (OBP)*.

En síntesis, para el sistema O3b, para cada sentido de la comunicación consideraríamos un retardo máximo estimado en condición HL de:

Retardo Total: $73.15+69.63+20 = 162.78$ mSeg

Casos reales del mundo comercial de Internet muestran que tiempos de respuesta elevados, a causa principalmente del retardo de propagación con satélites GEO, disminuyen considerablemente los ingresos de los proveedores de servicios.

Con la flexibilidad de escalabilidad de O3b, a futuro las condiciones de retardo de propagación por handoff lejano, así como atenuación consecuencia de los menores trayectos bajo la Isoterma 0°, se verían mejoradas conforme aumente la cantidad de satélites en la constelación.

4.8 Tecnologías seleccionadas DVB.

El estándar DVB, presenta varias alternativas para la implementación del canal de retorno en Inbound en *Servicios Interactivos (SI)*: DVB-RCS (EN-301-790), DVB-RCP (ETS-300-801), DVB-RCG (EN-301-195), y DVB-RCC (ES-200-800) con sus correspondientes nuevas versiones. Particularmente, considerando el caso más crítico

en poblaciones rurales de no existencia de infraestructura de comunicación terrestre, el enlace para retorno se lo realiza mediante satélite bajo el estándar DVB-RCS2.

Considerando el posible uso de aplicaciones por los potenciales usuarios finales de Servicios Interactivos (SI) sensibles al retardo, es necesaria una comunicación bidireccional con un bajo RTT. Como se analizó en apartado anterior, inclusive en condición de handover lejano, se obtiene un valor de RTT de 2x162.78 mSeg siendo conveniente respecto a los satélites GEO, por lo que la constelación de satélites O3b resulta adecuada.

Justificación DBV-S2/RCS

En la solución propuesta para el sistema, al definir un enlace de retorno mediante satélite se escogió el estándar **DVB-RCS2**, con lo cual:

- Se posibilita el funcionamiento con un esquema basado en ACM.
- Se logra ubicuidad dentro de la zona de servicio de la red satelital.
- Se consigue la interactividad a nivel de usuario final.
- Se pueden definir diferentes combinaciones de perfiles y configuración en función del tipo de servicios y clientes.
- Permite la compatibilidad con equipos que usan versiones previas DVB-S/RCS.
- Al ser un estándar oficial, su constante revisión facilita su evolución planificada, compatibilidad con versiones previas, así como su adopción por parte de fabricantes de equipos comerciales.

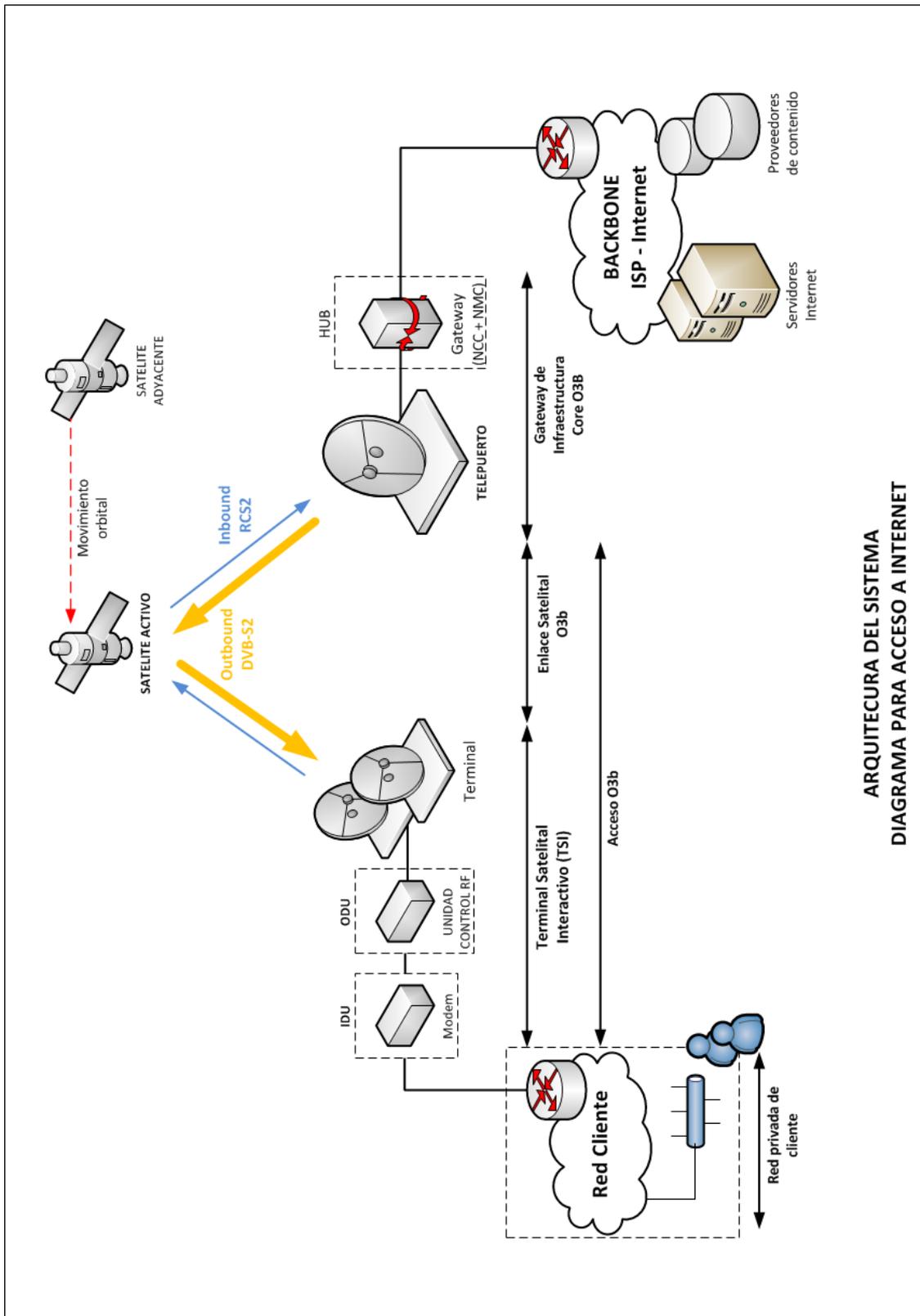
Justificación GSE

La utilización de GSE, permite maximizar la eficiencia en el encapsulamiento de los datagramas IP, reduciendo el gasto adicional (overhead) por un factor de entre 2 y 3 con respecto a anteriores técnicas como *MPE (Encapsulamiento Multi Protocolo)* sobre *MPEG-TS (MPEG Transport Stream)*. Lo anterior es alcanzado sin comprometer las funcionalidades provistas por el protocolo, debido a que en la capa 2 se soportan paquetes de longitud variable, resultando adecuado para las características típicas del tráfico IP. Por ejemplo, en un sistema interactivo DVB-S2, el gasto adicional es reducido en promedio alrededor de un 10% para MPE /MPEG-TS a un 2% o 3% en GSE. Por lo tanto, produce una ganancia completa de throughput de alrededor de 5% a 15% [5]. Este beneficio es por supuesto dependiente del tipo de sistema y de las características de tráfico.

Puede esperarse dar cabida a varios datagramas simultáneamente dentro de la carga útil al realizar el encapsulamiento GSE (o RLE para el canal de retorno), lo cual representa flexibilidad para varias opciones de optimización, aumentando el rendimiento total (throughput) o mejorando el retardo medio de paquetes de extremo a extremo.

4.9 Arquitectura genérica de la red

En la siguiente Figura 41 se muestra el diagrama genérico que tendría la red para acceso de banda ancha a Internet utilizando el sistema O3b, utilizando el estándar DVB-S2 /RCS2.



ARQUITECTURA DEL SISTEMA
DIAGRAMA PARA ACCESO A INTERNET

Figura 41: Arquitectura general del sistema para cobertura en Ecuador

Modo de acceso seleccionado

El modo seleccionado para acceso a la red desde la ubicación remota a la cual se tiene por objetivo brindar servicio de banda ancha de Internet, será el modo SCPC en el caso que se desee utilizar todo el ancho de banda disponible del transpondedor. Mientras que si el transpondedor va a ser compartido entre varios TSI simultáneamente, el modo a utilizar será el MCPC (Multiple Channel Per Carrier).

Con TDMA cada TSI dispone totalmente del BW del transpondedor usado durante el intervalo de tiempo que le haya sido asignado por la NCC. Al existir una sola portadora en el transpondedor se eliminan los productos de intermodulación permitiendo al amplificador trabajar cerca al punto de saturación, mejorando así su rendimiento.

Configuración del Sistema

El estándar DVB-S2, como se muestra en Tabla 37²¹, considera cuatro áreas de aplicación y perfiles: Difusión, Interactividad, DSNG y Profesional.

Tabla 37: Configuración de Sistemas y Áreas de Aplicación

System configurations		Broadcast services	Interactive services	DSNG	Professional services
QPSK	1/4, 1/3, 2/5	O	N	N	N
	1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9, 9/10	N	N	N	N
8PSK	3/5, 2/3, 3/4, 5/6, 8/9, 9/10	N	N	N	N
16APSK	2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9, 9/10	O	N	N	N
32APSK	3/4, 4/5, 5/6, 8/9, 9/10	O	N	N	N
CCM		N	N (see note 1)	N	N
VCM		O	O	O	O
ACM		NA	N (see note 2)	O	O
FECFRAME (normal)	64 800 (bits)	N	N	N	N
FECFRAME (short)	16 200 (bits)	NA	N	O	N
Single Transport Stream		N	N (see note 1)	N	N
Multiple Transport Streams		O	O (see note 2)	O	O
Single Generic Stream		NA	O (see note 2)	NA	O
Multiple Generic Streams		NA	O (see note 2)	NA	O
Roll-off 0,35, 0,25 and 0,20		N	N	N	N
Input Stream Synchronizer		NA except (see note 3)	O (see note 3)	O (see note 3)	O (see note 3)
Null Packet Deletion		NA except (see note 3)	O (see note 3)	O (see note 3)	O (see note 3)
Dummy Frame insertion		NA except (see note 3)	N	N	N
Wide-band mode	(see annex M)	O	O	O	O

N = normative, O = optional, NA = not applicable.

NOTE 1: Interactive service receivers shall implement CCM and Single Transport Stream.

NOTE 2: Interactive Service Receivers shall implement ACM at least in one of the two options: Multiple Transport Streams or Generic Stream (single/multiple input).

NOTE 3: Normative for single/multiple TS input stream(s) combined with ACM/VCM or for multiple TS input streams combined with CCM.

²¹ ETSI EN 302 307-1 V1.4.1 (2014-11)

La norma DVB-RSC está prevista para cubrir diferentes tipos de mercado, por lo que los TSI pueden adquirir un perfil particular con opciones de configuración variable y capacidad de acuerdo al escenario y servicio requerido a futuro.

Particularmente, siendo nuestro objetivo de acceso a Internet, el interés se centra en el *perfil de Servicios Interactivos*. Para la operación del TSI en este perfil, el estándar es flexible permitiendo determinadas configuraciones *opcionales (O)* de varios de los parámetros, bajo ciertas consideraciones especificadas (notas), que deben considerarse al momento de la configuración y operación del sistema.

Perfil seleccionado

El estándar DVB-RCS2 contempla el esquema MF-TDMA. En particular el perfil recomendable por el tipo de tráfico es el TDMA, donde cada uno de TSI transmite en un intervalo de tiempo específico que le ha sido asignado por la NCC de la red, con lo cual se podría disminuir la complejidad del sistema y por consiguiente el costo de la infraestructura a nivel de usuarios.

Particularmente un perfil TDMA (frente a un MF-TDMA) en sistemas multi-haz DVB-RCS2, permite disminuir los efectos relacionados a la interferencia co-canal y de canal adyacente en el transpondedor, los requerimientos de sincronismo entre el sistema central y el TSI, así como flexibilidad en los puntos de operación en back-off de los transpondedores.

4.9.1 Rendimiento PEPs Acelerador

Los *PEPs (Proxy Enhanced Protocol)*, definidos en el IETF (RFC 3115), constituyen agentes de red diseñados para mejorar el rendimiento extremo a extremo de protocolos de comunicación como es el caso de TCP [29]. Los PEPs son también conocidos como *Aceleradores de TCP*, siendo en principio las técnicas PEP posible implementarlas en las diferentes capas desde la capa aplicación hasta la de enlace de datos.

Existen dos técnicas o mecanismos principales de PEPs, TCP Spoofing y TCP Splitting, ambas utilizadas en las redes satelitales.

TCP Splitting (o Cascading) divide la conexión TCP en múltiples segmentos, presentando dos opciones de arquitectura:

- *PEPs Distribuidos y*
- *PEPs Integrados.*

En el caso de la arquitectura de *PEPs Integrados* únicamente una entidad PEP reside en el Gateway, mientras en *PEPs Distribuidos* tenemos 2 entidades: PEP Cliente y el PEP Servidor (Gateway PEP), que están localizados en cada uno los extremos del enlace satelital como se aprecia en la parte superior de la Figura 42 [30].

El esquema de división de la red en segmentos TCP, implica que la conexión extremo a extremo es dividida en múltiples conexiones o segmentos como se muestra mediante capas en la parte inferior de la Figura 42. Típicamente los límites de los segmentos en la red están definidos por los componentes terrestres y satelitales.

Particularmente, la conexión sobre el segmento satelital puede ser tratada de forma independiente con el fin de superar las deficiencias propias del enlace satelital expuestos en apartados anteriores. Este tipo de esquema es adecuado para redes punto a punto, donde el segmento 2 posibilita el empleo de un acelerador (T-PEP), mientras en los segmentos 1 y 3 se emplea TCP estándar.

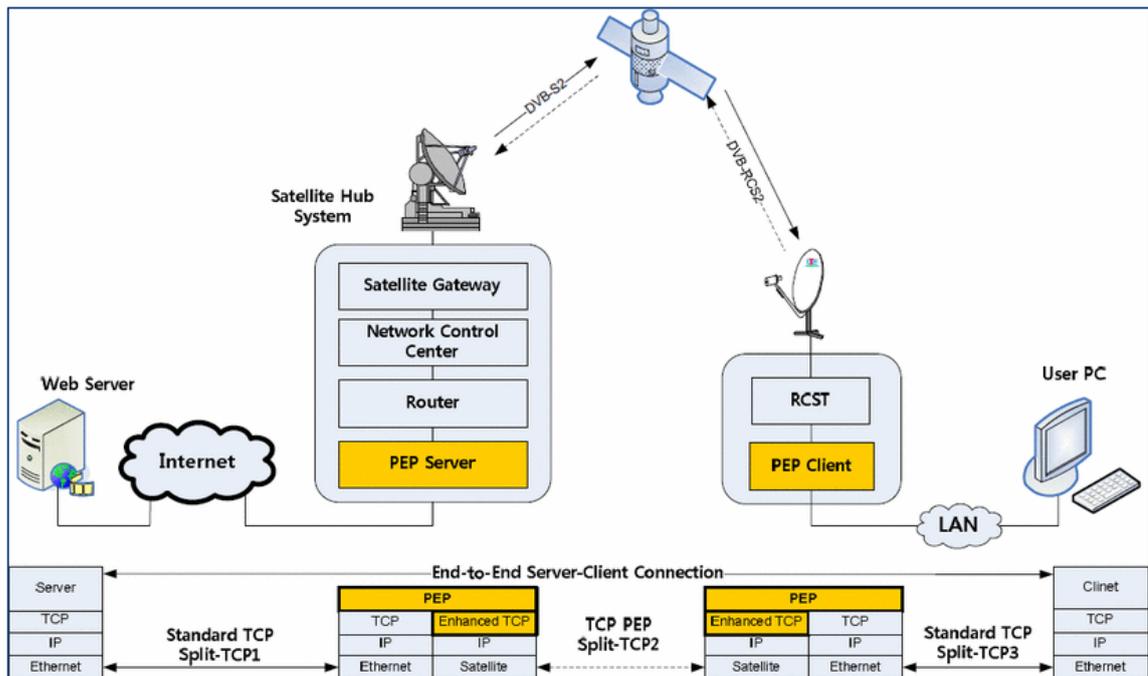


Figura 42: a) Arquitectura TC-PEP Distribuida. b) Esquema por capas de la división en 3 segmentos de la conexión TCP.

Los **PEPs Distribuidos** son agentes intermedios que actúan virtualmente como el destino final del sistema, generando paquetes ACK en representación de los sistemas finales, así como almacenando y enviando los paquetes de información hacia el siguiente segmento. Al disponer de esta información en un punto intermedio, es posible una recuperación más rápida de información perdida o errónea (ACK no exitoso). Adicionalmente, permite nuevas variantes de TCP en el segmento satelital y legados de TCP en el segmento terrestre.

Durante su operación, un PEP requiere tener acceso a los números de pódicos origen y destino, números de secuencia y otra información presente en la cabecera del segmento TCP, así como las direcciones de origen y destino que están presentes en la cabecera del datagrama IP.

A partir de esta división de la conexión, el RTT no será el mismo en los diferentes tramos de TCP. Particularmente el tramo de TCP del enlace satelital el RTO (temporizador para reenvío) deberá ser mayor al tiempo de RTT de los tramos adyacentes, considerando adicionalmente un margen de tiempo por encolamiento en los buffers de transmisión, recepción y por funciones de procesamiento, respecto a los tramos terrestres.

A fin de obtener un mejor rendimiento en un enlace satelital debido al elevado retardo, TCP necesita mantener un elevado número de paquetes enviados (sin recibir confirmación ACK), con lo cual los tipos de protocolos elegidos son aquellos que favorecen un buen tamaño de su ventana deslizante.

En el artículo presentado por Trivedi et al en 2010, se presenta una evaluación del desempeño extremo a extremo de TCP Hybla y TCP Cubic en un enlace vía satélite y en condiciones de baja tasa de error utilizando técnicas Forward Error Correction (FEC). Según las conclusiones de este estudio, Cubic tiene mejor rendimiento que Hybla. Una de las razones es que la política agresiva de cwnd (ventana de congestión) adoptada por Hybla se traduce en una disminución del rendimiento general en condiciones de un bajo PER.

Adicionalmente a las técnicas PEP TCP (T-PEP), hay otras soluciones complementarias como PEPs para la capa de Aplicación (A-PEP), con las que se busca principalmente mejorar la utilización del ancho de banda disponible, siendo la navegación web el objetivo principal. Con la utilización de A-PEP se logra mejoras en: HTTP pre-fetching, Compresión, administración de cookies, Priorización de transferencia, caché del navegador, entre otras. Los PEPs comerciales normalmente permiten combinan algunas de las técnicas de T-PEP y A-PEP [29]. Un HTTP PEP puede trabajar sin la presencia de un T- PEP

Justificación

Se elige una arquitectura PEP Distribuida, ya que permite:

- Delimita el protocolo TCP-PEP del tramo satelital, pudiendo ser escogido en función del segmento espacial, uso provisto por las aplicaciones y ser modificado o actualizado sin afectar a los sistemas finales.

- Al disponer de la información en un punto intermedio de la comunicación e2e, permitiría una recuperación y retransmisión más rápida de información perdida o errónea (ACK no exitoso).
- Una gestión interactiva en ambos sentidos de la comunicación, tanto para el enlace hacia el usuario (DVB-S2), como para el enlace de retorno (RCS2).
- Una implementación transparente a los sistemas finales, o aplicaciones involucradas, sin requerirse modificación para su implementación.

Del estudio realizado en [31], en el que con diferentes probabilidades de pérdida de paquetes en el enlace se analiza el comportamiento del throughput TCP frente a configuraciones de PEPs, se concluye que pueden ser introducidos PEPs para incrementar el throughput de TCP sobre enlaces satelitales a través de los gateways/PEPs Satelitales. Los resultados para el caso geoestacionario muestran un significativo mejoramiento en promedio de entre 300% y 800% en el throughput, para enlaces satelitales con alto retardo y pérdidas.

Por otro lado, nuevos estudios complementarios donde se analiza el comportamiento al variar el número de conexiones TCP, muestran que en el caso de una sola conexión TCP sobre el enlace satelital una solución con *PEPSal* sería lo más recomendado, así como también se afirma su conveniencia para situaciones donde muy pocas conexiones simultáneas de TCP compitan por los recursos del enlace satélite. Sin embargo, tan pronto varias conexiones TCP comparten los recursos del satélite, es preferible una solución basada con *TCP Cubic*, según el estudio y evaluaciones mostrados en [8]. Lo cual es conveniente para un escenario, donde se prevé un número considerable de TSI de baja o mediana capacidad.

Seguridad

Si bien el uso de Arquitectura de PEPs Distribuida implica mejoras importantes, es necesario considerar ciertas implicaciones desfavorables particularmente respecto a la seguridad de la comunicación.

Con la implementación T-PEPs, se produce una división de la conexión extremo a extremo no permitiendo la implementación directa de mecanismos de seguridad estandarizados para las redes IP como lo es IPSec, yendo en contra del paradigma inicial de concepción *extremo a extremo (e2e)* de Internet y adicionalmente imposibilita una movilidad para el usuario final.

Con IPSec la información es previamente *cifrada* en los hosts finales y las claves de seguridad para descifrarla únicamente se comparten entre dichos host finales, por lo tanto las entidades intermedias T-PEPs no son capaces de trabajar ya que no pueden

examinar las cabeceras de transporte o aplicación del flujo de información entrante, siendo necesarios considerar otros esquemas de seguridad o adaptaciones del IPsec tradicional.

SSL/TLS (Secure Sockets Layer / Transport Layer Security)

Siendo el objetivo disponer en conjunto con T-PEPs de un esquema de seguridad con protección e2e para la comunicación (no únicamente en determinados tramos), es necesario implementar mecanismos de seguridad a nivel de la capa de transporte o sobre esta.

Un esquema puede ser SSL ó TLS, ampliamente utilizado como se muestra en la Figura 43, permitiendo a la entidad T-PEP el acceso a las cabeceras de protocolo.

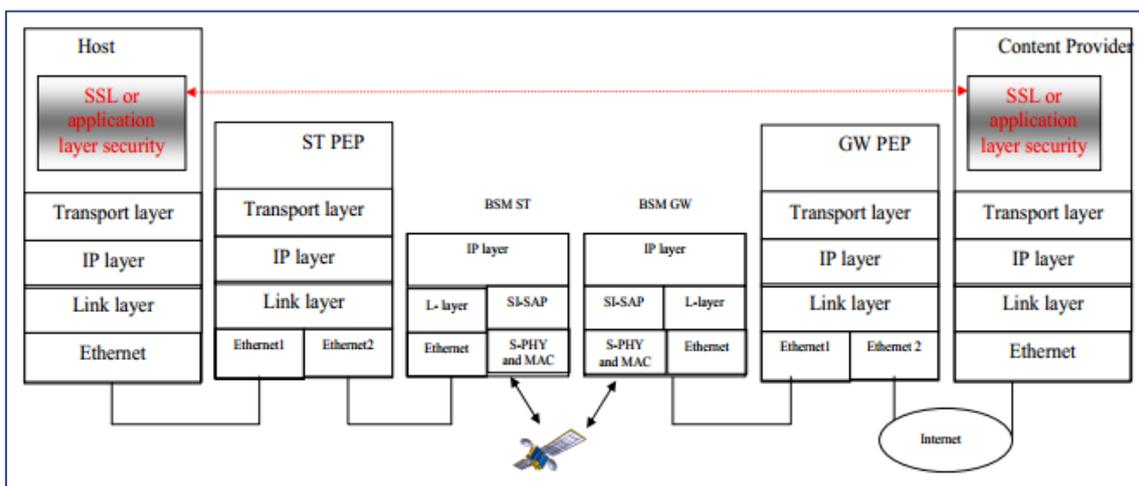


Figura 43: Esquema PEP con seguridad extremo a extremo

El esquema SSL/TLS proporciona servicios de seguridad para aplicaciones basadas en TCP, siendo compatible con el principio e2e, proporcionando autenticación y privacidad sobre la red, así como protección frente a escuchas ilegales de terceros e interceptación de información para aplicaciones del tipo cliente-servidor.

Este protocolo trabaja sobre la base del modelo cliente-servidor, donde las dos entidades que hacen parte de la comunicación negocian los términos de la conexión haciendo uso de un procedimiento para acordar los parámetros que serán utilizados para establecer y mantener una conexión segura. La seguridad de los protocolos SSL/TLS se basa en su diseño e implementación, su efectividad depende de utilizar algoritmos criptográficos fuertes y evitar almacenar los valores secretos en otras entidades.

En la Figura 44 se muestra la encapsulación de TLS, que al correr sobre TCP posibilita el uso de aceleradores con tráfico SSL/TLS, minimizando la limitación por

una potencial disminución de la tasa máxima de transferencia (throughput) de TCP como consecuencia del retardo en el enlace satelital.

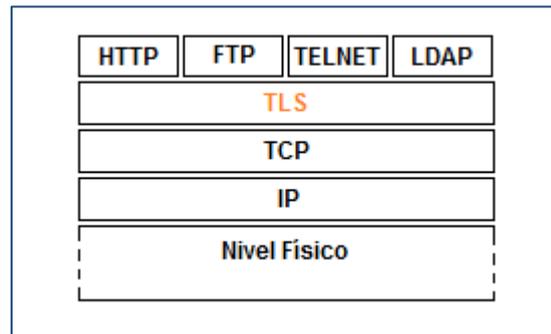


Figura 44: Encapsulamiento TLS

Por otro lado, de ser usado un acelerador HTTP (A-PEP) como un agente intermedio, se presentaría un problema en la red con la seguridad. La razón es que los datos de la capa de aplicación serán cifrados por el sistema de seguridad. Por lo tanto, no será posible ejecutar técnicas como HTTP prefetching, caching o compresión de cabeceras [29].

Justificación

De las dos opciones mencionadas, se escoge la opción de TLS como mecanismo de seguridad, puesto que IPSec presenta limitaciones con la implementación de elementos intermedios como el caso de PEPs y NATs, siendo de particular interés la compatibilidad con PEPs.

5 Conclusiones y Trabajos futuros

5.1 Conclusiones

A lo largo del presente Trabajo de Fin de Master, se obtienen un conjunto de conclusiones que se indican a continuación:

Respecto al uso de Bandas como C y Ku, la utilización de la banda Ka implica ventajas tales como, reducción de tamaño de antenas, mayor eficiencia espectral, mayor BW disponible, sin embargo es muy importante considerar la limitación dada la naturaleza de la longitud de onda en la banda Ka que al ser muy pequeña, resulta altamente vulnerable a los efectos climatológicos como la lluvia en las zonas tropicales.

Al realizar el balance del enlace y dimensionamiento de los enlaces, el considerar en una primera aproximación una atenuación genérica por lluvia en banda Ka, regularmente entre 10 a 20 dB en una extensa zona geográfica, e ignorando el relieve, hace que los resultados bajo este esquema tengan elevado nivel de error, por lo que no es la metodología más apropiada particularmente para zonas tropicales y con perfil orográfico variable. Por lo que se concluyó necesario el abordar con mayor nivel de profundidad la implicación de la atenuación por lluvia y perfil orográfico, en el método considerado en el capítulo 4 del presente trabajo.

Importante destacar que en un sistema MEO como O3b, conocer la posición relativa donde se ubica un TSI respecto al momento que se ejecutará el handover, influye en los principales parámetros para cálculo y características de calidad que afectan al enlace, tales como son sus mayores distancias, niveles retardo, atenuación e indisponibilidad.

Considerando condiciones de handover lejano para las diferentes ubicaciones, respecto a su condición cercana, se obtiene en promedio un aumento para la distancia del enlace de un 35.14%, lo que repercute en el retardo de total propagación, mientras que el ángulo de elevación de su antena se ha reducido en un 75.6%. Resultando, en valores de ángulos de elevación de aproximadamente 20°, que fueron tomados en consideración de acuerdo a las recomendaciones de la ITU.

La atenuación por lluvia se puede producir simultáneamente del lado de los TSIs o del lado del Gateway, sin embargo para el caso el caso estudiado la influencia sobre la calidad de la comunicación es más determinante si se presenta lluvia del lado de las TSI por estar en una zona tropical con mayor nivel de lluvia y disponer de menores recursos, como fue el caso particularmente de la ubicación C3. Por su parte, el Gateway

al estar situado en una zona geográfica con un menor índice de lluvia ejerce un menor contribución a la degradación de la comunicación.

La atenuación por lluvia, como se ha evidenciado para el territorio Ecuatoriano no es proporcional a la intensidad de lluvia, resultado en ubicaciones que un mayor índice de precipitación presentan menor atenuación por lluvia. Esto se debe a que en el cálculo de la atenuación interviene directamente la altura sobre el nivel del mar (msnm) de la ubicación seleccionada. Importante característica, más aún si se considera que para el caso Ecuatoriano la orografía es muy variable desde unos pocos metros de altura en la Costa, hasta alturas que pasan los 4.000 msnm en la cordillera de los Andes.

Respecto a la ubicación de un TSI en condición de lluvia, mientras esté ubicado a una mayor latitud presentará un menor ángulo de elevación requiriendo que su señal atraviese mayor distancia bajo lluvia, lo cual incrementa drásticamente la atenuación.

Los valores de desempeño que se pueden alcanzar, con antenas de 1.8m y amplificadores de 40W son recomendables solo para explotación con perfil de uso o aplicaciones de tipo Residencial, Educación, no así para el segmento Profesional o Empresarial que requieren un grado de disponibilidad mayor. Para alcanzar mayores niveles de disponibilidad, una alternativa sería implementar mejoras al segmento terrestre como pueden ser incrementar los niveles de PIRE considerando una antena de diámetro mayor o un transmisor de potencia más elevadas.

A fin de mitigar los efectos adversos de la lluvia en la banda Ka, como primera alternativa, se recomienda un estándar como DVB-S2/RSC que posibilita una modificación de parámetros de modulación y codificación con un esquema de tipo adaptativo ACM. Otra opción puede ser el modificar la potencia RF transmitida con lo que no existirá riesgo de un incremento de interferencia, o el requerir contratar mayor ancho de banda con el consiguiente costo.

En particular el perfil seleccionado para el canal de retorno es TDMA, donde cada uno de TSI transmite a la misma frecuencia en un intervalo de tiempo específico que le ha sido asignado por la NCC de la red, con lo cual se disminuye la complejidad del sistema y por consiguiente el costo de la infraestructura a nivel de usuarios.

Respecto a la arquitectura, de la revisión a las diferentes mejoras de TCP, se puede concluir que no existe una modificación de TCP (T-PEP) que se adapte perfectamente, pues dependen del escenario de implementación, número de conexiones TCP concurrentes, variación del retardo, sin embargo se sugiere alternativas específicas como CUBIC y PEPSal en función del número de conexiones concurrentes, así como el uso de un esquema de seguridad SSL/TLS.

5.2 Trabajos Futuros

En este apartado se sugieren futuras líneas de trabajo para continuar desarrollando el sistema, orientadas hacia mejoras y ampliaciones, como son:

Trabajar en la implementación de un algoritmo por SW asistido por alguna herramienta de simulación, que permita calcular los parámetros del enlace de forma más precisa en función de pasos incrementales del movimiento de los satélites, con mayor rapidez mediante iteraciones consecutivas. Pudiendo tomarse como punto de partida el procedimiento y valores sugeridos por UIT-R P.618-11

Profundizar el estudio de nuevas tecnologías y protocolos con enfoques basados en arquitecturas tipo Cross-Layer, con el fin de lograr una optimización de los recursos del satélite y prestaciones a los usuarios finales. Una de ellas, podría ser el desarrollo y pruebas de una versión PEP Adaptativa considerando un número de conexiones concurrentes y variación de Jitter particularmente durante los procesos cíclicos de handover.

Complementar el diseño del sistema para operación en lugares totalmente remotos, con el dimensionamiento de un subsistema de alimentación en base a energías renovables, como puede ser la solar o eólica de forma de brindar independencia y autonomía en ubicaciones donde no exista infraestructura eléctrica.

Analizar desde un enfoque de proyecto social, costos e inversiones requeridas, frente a otras opciones de acceso satelital, cuál resultaría más recomendable para masificar la disponibilidad de servicios de banda ancha a corto y mediano plazo. Con esto, se presentaría un estudio para posible financiamiento e incorporación dentro del plan gestionado por MINTEL (Ministerio de Telecomunicaciones) para incremento del índice de penetración de las Telecomunicaciones en Ecuador, particularmente para lugares remotos.

Bibliografía

- [1] A. Rogers, «BNamericas,» 03 06 2014. [En línea]. Available: <http://subscriber.bnamericas.com/Subscriber/index.jsp?idioma=E&tipoContenido=detalle&pagina=content&idContenido=647046&tipoDocumento=1>. [Último acceso: 18 09 2014].
- [2] ITU, «Regulation of Global Broadband Satellite Communications,» 2012.
- [3] DVB Group, «DVB Standards,» [En línea]. Available: <https://www.dvb.org/standards>. [Último acceso: 27 Noviembre 2014].
- [4] DVB Project Group, DVB-S2 2nd Generation Satellite, 2012.
- [5] ETSI TS 102 606-1 V1.2.1 , DVB-GSE Generic Stream Encapsulation; Part 1: Protocol, 2014.
- [6] E. Stefan y T. de Cola, «DVB-RCS2/S2 Testbed: A Distributed Testbed for Next-Generation Satellite System Design and Validation,» de 7th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 13th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC), Livorno, Italy, 2014.
- [7] G. Maral y M. Bousquet, Satellite Communications Systems, 5th ed., Willey, 2009.
- [8] A. Pirovano y F. Garcia, «A New Survey on Improving TCP Performances over Geostationary Satellite Link,» Network and Communication Technologies, vol. 2, n° 1, 2013.
- [9] O3b Networks, «O3b Networks,» [En línea]. Available: <http://www.o3bnetworks.com/o3b-advantage/our-technology>. [Último acceso: 01 09 2014].
- [10] <http://www.fitel.gob.pe/noticia-o3b-networks-anuncia-inicio-operaciones-peru.html>, 2013.
- [11] R. Gómez, «El País,» 14 Julio 2014. [En línea]. Available: http://sociedad.elpais.com/sociedad/2014/07/14/actualidad/1405331639_03

- 1784.html. [Último acceso: Agosto 2014].
- [12] «<http://www.o3bnetworks.com/media-centre/press-releases/2013/o3b-networks-opens-peru-gateway>».
- [13] S. H. Blumenthal, «Medium Earth Orbit Ka band Satellite Communications System,» MILCOM IEEE, pp. 273 - 277, 2013.
- [14] R. Barnett, «O3b - A different approach to Ka-band satellite system design and spectrum sharing,» de ITU Regional Seminar for RCC countries on Prospects for Use of the Ka-band by Satellite Communication Systems, Almaty, 2012.
- [15] S. D. Ilcev, «Medium and High Altitude Orbits,» de Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo), 20th International Crimean Conference, Sevastopol, IEEE 2010.
- [16] Iridium, «Iridium,» 07 2012. [En línea]. Available: <https://www.iridium.com/DownloadAttachment.aspx?attachmentID=1197>. [Último acceso: 06 09 2014].
- [17] J. Yu y P. Zong, «The Analysis and Simulation of Communication Network in Iridium System Based on OPNET,» Information Management and Engineering (ICIME), IEEE, 2010.
- [18] Globalstar, «Infraestructura Satelital Espacial,» [En línea]. Available: <http://www.globalstar.com.mx/Conoce-a-GdM/Infraestructura-Satelital-Espacial.html>. [Último acceso: 06 09 2014].
- [19] A. Durresi, M. Durresi, L. Barolli y F. Xhafa, «MPLS Traffic Engineering in Satellite Networks,» Computer Society IEEE, 2007.
- [20] K. Singarajah, «Overview of Ka-band Satellite System Developments & Key Regulatory Issues,» de ITU Conference On Prospects For Use Of The Ka-Band By Satellite Communication Systems, Almaty, 2012.
- [21] O3b Networks and Sofrecom, «Why Latency Matters to Mobile Backhaul,» [En línea]. Available: http://www.o3bnetworks.com/media/45606/o3b_latency_mobile%20backhaul_130417.pdf. [Último acceso: 22 09 2014].
- [22] O. Networks, «O3b Networks,» 14 09 2014. [En línea]. Available: http://www.o3bnetworks.com/media/45606/o3b_latency_mobile%20backha

ul_130417.pdf.

- [23] ETSI , EN 302 307-1 V1.4.1 Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1: DVB-S2, 2014.
- [24] K. Lanin, de Prospects for use of the Ka-band by satellite communication systems, Almaty, 2012.
- [25] A. Pietrabissa y A. Fiaschetti, «Dynamic Uplink Frame Optimization with ACM in DVB-RCS2 Satellite Networks,» de Satellite Telecommunications (ESTEL), Rome, IEEE, 2012.
- [26] M. Angelone, A. Ginesi, E. Re y S. Cioni, «Performance of a Combined Dynamic Rate adaptation and adaptive coding modulation technique for a DVB-RCS2 system,» de Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS) and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC), IEEE, Baiona, 2012.
- [27] O3b Networks, «What is Network Latency and Why Does It Matter?,» [En línea]. Available: http://www.o3bnetworks.com/media/40980/white%20paper_latency%20matters.pdf. [Último acceso: 17 09 2014].
- [28] O3b Networks, «End-to-End link and application performance test report,» [En línea]. Available: http://www.o3bnetworks.com/media/264680/o3b%20test%20report%20white%20paper_14apr.pdf. [Último acceso: 17 09 2014].
- [29] ETSI, «ETSI TR 102 676 V1.1.1 Satellite Earth Stations and Systems (SES); Broadband Satellite Multimedia (BSM); Performance Enhancing Proxies (PEPs),» 2009.
- [30] P. ManKyu y O. DeockGil, «Cross-layer design for improving TCP PEP performance in DVB-RCS2 networks,» de ICT Convergence (ICTC), IEEE, Jeju, 2013.
- [31] J. Vankka, «Performance of Satellite Gateway over Geostationary Satellite Links,» de IEEE Military Communications Conference, 2013.

- [32] <http://es.wikipedia.org/wiki/Galapagos>.
- [33] E. Rendon-Morales, J. Mata-Díaz, J. Alins, J. L. Muñoz y O. Esparza, «Adaptive IP scheduler design to support QoS guarantees over satellite systems,» *Journal of Internet Engineering*, vol. 5, n° 1, Junio 2012.
- [34] M. A. Vázquez Castro y F. Vieira, «DVB-S2 Full Cross-Layer Design for QoS Provision,» *IEEE Communications Magazine*, 2012.
- [35] NewSat, «Ka Band,» NewSat, pp. http://www.newsat.com/images/stories/downloads/whitepapers/Ka-band_white_paper.pdf, 2012.
- [36] A. Rozichner, *de Ka-band: Prospects*, Almaty, 2012.
- [37] J. Rodríguez, «Security in IP Satellite Networks: COMSEC and TRANSEC integration aspects,» de *Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS)*, IEEE, 2012.
- [38] P. Pillay y H. Yim-Fun, «Design and Analysis of Secure Transmission of IP over DVB-S/ RCS Satellite Systems,» de *IFIP International Conference*, IEEE, 2006.
- [39] C. Roseti, M. Luglio, S. Provenzano, S. Ramachandran y G. Fairhurst, «A Cross-Layer Architecture for Satellite Network Security CL-IPSec,» *Advanced Satellite Mobile Systems*, 2008.
- [40] C. ZHANG, J. Yu, SunWan y J. Su, «Internet Key Exchange Protocol Simulation of HAIPE in Security Network,» de *International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC)*, IEEE, 2010.
- [41] D. Demirel, F. Alagoz y M. U. Caglayan, «IPSEC over Satellite Links: A New Flow Identification Method,» de *International Symposium on Computer Networks*, IEEE, 2006.
- [42] W. Fritsche, «Solutions for securing broadband satellite communications,» de *Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference (ATNAC)*, IEEE, 2011.
- [43] M. Bhutta y H. Cruickshank, «Redesigning of IPSec for interworking with Satellite,» de *Communications and Networking in China (CHINACOM)*, IEEE,

2011.

- [44] A. Abdel Salam , M. Luglio, C. Roseti y F. Zampagnaro, «DVB-RCS Security Framework for ULE-Based Encapsulation,» de Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), IEEE, 2013.

Anexos:

- Anexo 1: Rec. ITU-R P.838-3
https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-!!!PDF-S.pdf
- Anexo 2: Rec. ITU-R P. 618-11, sección 2.2.1.1
https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.618-11-201309-!!!PDF-E.pdf
- Anexo 3: Ecuaciones utilizadas
<http://personal.us.es/murillo/docente/radio/documentos/tema10.pdf>
Redes por satélite: VSAT, móviles y por difusión de TV
Presentación expuesta durante el curso del Máster:
Apartado: Balance del enlace por satélite
- Anexo 4: Equipos
Antena TSI: 1.8m
http://www.o3bnetworks.com/wp-content/uploads/2015/02/O3b_General-Dynamics_1.8m-Dual-Tracking-Antenna.pdf

Antena TSI: 2.4m
http://www.o3bnetworks.com/wp-content/uploads/2015/02/O3b_General-Dynamics_2.4m-Dual-Tracking-Antenna.pdf

O3b Dual Tracking Antenna Terminals
4.5m y 7.3m; some HPA levels
http://www.o3bnetworks.com/wp-content/uploads/2015/02/O3b_ViaSat_4.5m_Dual-Tracking-Antenna.pdf

High Performance MEO/O3b Satellite Terminal
http://www.o3bnetworks.com/wp-content/uploads/2015/02/O3b_Gilat_SkyEdgeII_Modem.pdf