

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



“ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE LOS HTS DE BANDA KA PARA LA PRESTACIÓN DE SERVICIOS DE BANDA ANCHA SATELITAL EN EL PERÚ MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS EN EL DESARROLLO DE CÁLCULOS DE ENLACE”

**Tesis para optar el Grado Académico de
MAGÍSTER EN INGENIERÍA DE LAS TELECOMUNICACIONES**

Presentado por:

Ing. HENRY WILLIAM MERINO ACUÑA

Asesor:

Ms. Ing. CHRISTIAN CHEE CUCALON

Lima - Perú

Marzo 2014

DEDICATORIA

A mi esposa Cinthya, por su amor, apoyo incondicional y ánimo que me brinda día a día para alcanzar nuevas metas, tanto personales como profesionales. A mis padres Arturo y Delia, por ser el pilar fundamental en mi vida, con su esfuerzo y sacrificio hicieron posible el triunfo profesional alcanzado. Y a mis hermanos Roger, Angie y Sebastián, por equilibrar el desarrollo de este trabajo con momentos de alegría y amor fraternal.

INDICE

INDICE DE FIGURAS.....	6
INDICE DE TABLAS	8
GLOSARIO	10
RESUMEN	15
INTRODUCCIÓN	16
CAPITULO I: COMUNICACIONES POR SATÉLITE.....	19
1.1 Capas de la atmósfera	19
1.1.1 Tropósfera	20
1.1.2 Estratósfera	20
1.1.3 Mesósfera.....	20
1.1.4 Ionósfera o termósfera.....	21
1.1.5 Exósfera	21
1.2 Satélites y órbitas	21
1.3 Cobertura de los satélites	22
1.3.1 Cobertura global	22
1.3.2 Cobertura regional.....	23
1.3.3 Cobertura local	23
1.4 Bandas de frecuencia.....	24
1.5 Modulación digital.....	24
1.6 Forward Error Correction (FEC).....	26
1.7 Polarización	26
1.8 Técnicas de acceso al medio.....	26
1.8.1 Clasificación por la compartición de capacidad satelital	27
1.8.2 Clasificación por la forma de asignar recursos	30
1.9 Efectos de propagación causados por el clima	30
1.10 Tipos de atenuación	31
1.10.1 Atenuación por lluvia	31
1.10.2 Atenuación por nubes.....	32
1.10.3 Atenuación por gases.....	32
1.10.4 Centelleo	32
1.11 Técnicas de mitigación por desvanecimiento.....	33
1.11.1 Control de Potencia	33
1.11.2 Adaptación de la señal	33
1.11.3 Diversidad.....	35
1.12 Estándares utilizados en el mercado satelital.	35
1.12.1 Digital Video Broadcasting – Second Generation (DVB-S2).....	35
1.12.2 Digital Video Broadcasting – Return Channel Satellite (DVB- RCS2)	36
1.13 Cálculos de enlace	36
1.13.1 Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (PIRE)	37
1.13.2 Figura de Mérito (G/T)	37
1.13.3 Ancho de banda de una señal digital.....	39
1.13.4 Distancia entre la estación terrena y el satélite	39

1.13.5	Pérdidas de espacio Libre	39
1.13.6	Pérdidas por dispersión	40
1.13.7	Cálculo de PIRE de la estación terrena	40
1.13.8	Relación de portadora a densidad de potencia de ruido (C/No)	41
1.13.9	Relación de portadora a ruido (C/N)	41
1.13.10	Relación de portadora a densidad de ruido total del sistema	42
1.13.11	Relación de energía de bit a densidad de ruido Eb/No.....	43
1.13.12	Relación de energía de símbolo a densidad de ruido Es/No	43
CAPITULO II: ANALISIS COMPARATIVO DE LOS HTS DE BANDA KA CON LOS SATELITES CONVENCIONALES		44
2.1	Situación actual del mercado satelital.....	44
2.2	Disponibilidad espectral de la Banda Ka	47
2.2.1	Bandas identificadas para servicios fijos	47
2.2.2	Bandas utilizadas por varias administraciones	47
2.2.3	Bandas con los mismos derechos para satélites GEO y NO-GEO.....	48
2.2.4	Bandas donde se aplica Densidad de Flujo de Potencia Equivalente	48
2.2.5	Bandas de uso militar	49
2.3	Técnica de reuso de frecuencias	49
2.4	Arquitectura del sistema satelital de Banda Ka	51
2.4.1	Satélite.....	51
2.4.2	Gateway	51
2.4.3	Estación remota.....	52
2.5	Análisis comparativo frente a los satélites convencionales.....	53
2.5.1	Disponibilidad de frecuencia.....	53
2.5.2	Cobertura.....	54
2.5.3	Ganancia de antena y PIRE	54
2.5.4	Eficiencia	55
2.5.5	Posición orbital geoestacionaria	56
2.5.6	Pérdidas de espacio libre	56
2.5.7	Atenuación frente a efectos del clima	56
2.5.8	Costos de terminales y del servicio	57
CAPITULO III: CALCULO DE PREDICCIÓN DE ATENUACIÓN POR LLUVIA EN EL TERRITORIO PERUANO		59
3.1	Cálculo de predicción de intensidad de lluvia.....	59
3.2	Cálculo de atenuación específica (dB/Km).....	62
3.3	Cálculo de atenuación por lluvia (dB)	66
3.4	Comparación de atenuación por lluvia en Bandas C, Ku y Ka	73
CAPITULO IV: DESARROLLO DE LOS CÁLCULOS DE ENLACE EN BANDA KA SOBRE EL TERRITORIO PERUANO		76
4.1	Técnicas de mitigación por desvanecimiento utilizadas.....	77
4.2	Estándares de comunicación utilizados.....	77
4.2.1	Digital Video Broadcasting – Second Generation (DVB-S2).....	77
4.2.2	Digital Video Broadcasting – Return Channel Satellite (DVB- RCS)	77
4.3	Consideraciones técnicas para los cálculos de enlace	79
4.3.1	Especificaciones técnicas del satélite.....	79
4.3.2	Especificaciones de PIRE y Figura de Mérito G/T del satélite	79

4.3.3	Especificaciones técnicas de la portadora.....	81
4.3.4	Cálculos de la distancia entre la estación y el satélite	83
4.3.5	Cálculo y estimación de pérdidas	83
4.3.6	Especificaciones técnicas de la estación terrena y del terminal remoto	86
4.3.7	Cálculo de PIRE del terminal remoto.....	87
4.3.8	Cálculo de PIRE de la estación terrena.....	87
4.3.9	Cálculo de G/T de la estación terrena y terminal remoto.....	88
4.4	Pasos considerados para los cálculos de enlace.....	89
4.5	Desarrollo de los cálculos de enlace	89
4.5.1	Cálculo de relación de portadora a ruido del enlace ascendente	89
4.5.2	Cálculo de relación de portadora a ruido del enlace descendente	91
4.5.3	Relación de C/N requerido en el sistema	95
4.6	Resultados finales de los cálculos de enlace	96
4.6.1	Resultados de C/N total del sistema.....	96
4.6.2	Margen de enlace alcanzado por ciudad.....	97
4.6.3	Resultados de Disponibilidad	97
4.6.4	Modulación y codificación global alcanzada.....	102
4.6.5	Niveles de eficiencia espectral	104
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		106
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		110
ANEXOS		117

INDICE DE FIGURAS

Figura 01: Capas de la atmósfera	21
Figura 02: Satélites geoestacionarios con cobertura global	22
Figura 03: Tipos de coberturas.....	24
Figura 04: Tipos de modulación	25
Figura 05: Acceso Múltiple por División de Frecuencia	27
Figura 06: Acceso Múltiple por División de Tiempo	28
Figura 07: Técnicas de acceso múltiple	29
Figura 08: Técnica de modulación y codificación adaptativa en DVB.....	34
Figura 09: C/N requerido Vs Eficiencia espectral	36
Figura 10: Footprint del Satélite AMC-15 en Banda Ku.....	38
Figura 11: Demanda de accesos de banda ancha satelital	46
Figura 12: Asignación de frecuencias de Banda Ka para redes de comunicaciones por satélite.....	48
Figura 13: Plan de frecuencias con un patrón de 4 colores y un reuso de frecuencia/polaridad por 12 veces.....	50
Figura 14: Cobertura del Satélite Kasat de Eutelsat, con patrón de cuatro colores	50
Figura 15: Satélite con un arreglo de reflectores de 4 colores	52
Figura 16: Topología de una red de Banda Ka con reuso de frecuencias	53
Figura 17: Plan de frecuencias de conexión y usuario del satélite Kasat	54
Figura 18: Ganancia de antena de usuario Vs tamaño de antena	55
Figura 19: Atenuación por lluvia en función de la frecuencia y la intensidad de lluvias.....	57
Figura 20: Intensidad de lluvia vs tasa de probabilidad	62
Figura 21: Atenuación específica para las Banda C, Ku y Ka	65
Figura 22: Enlace satelital Tierra-Espacio.....	66
Figura 23: Comparación de atenuación vs probabilidad de lluvia sobre un enlace de 30 GHz.....	71
Figura 24: Comparación de atenuación vs probabilidad de lluvia sobre un enlace de 20 GHz.....	73
Figura 25: Comparación de atenuación por lluvia (dB) con 0.1% de probabilidad entre las Bandas C, Ku y Ka.....	74
Figura 26: Comparación de atenuación por lluvia (dB) con 0.5% de probabilidad entre las Bandas C, Ku y Ka.....	74
Figura 27: Comparación de atenuación por lluvia (dB) con 1% de probabilidad entre las Bandas C, Ku y Ka.....	75
Figura 28: Características de PIRE y G/T por spot beam.....	80
Figura 29: Arreglo de spot beams en el territorio peruano	80
Figura 30: Disponibilidad del enlace Outbound por ciudad	100
Figura 31: Disponibilidad global del enlace Outbound.....	101
Figura 32: Disponibilidad del enlace Inbound por tamaño de portadora	101

Figura 33: Esquemas de modulación y codificación operables para una portadora Outbound de 120000Kbps en el territorio Peruano 103

Figura 34: Esquemas de modulación y codificación operables para portadoras Inbound de 2048, 4096, 6144, 8192, 10240 Kbps en el territorio Peruano 103

Figura 35: Esquemas de modulación y codificación para un canal DVB-RCS vs tamaño de portadora 104



INDICE DE TABLAS

Tabla 01: Tipos de órbita	22
Tabla 02: Asignación de frecuencias por tipo de banda	24
Tabla 03: Sistemas de modulación usados en sistemas por satélite	25
Tabla 04: Diferencias entre HTS de Banda Ka y los satélites convencionales	58
Tabla 05: Ángulos de elevación y altura para las capitales del Perú	60
Tabla 06: Datos de intensidad de lluvia por localidad en mm/h	63
Tabla 07: Coeficientes de polarización para las Bandas C, Ku y Ka.....	64
Tabla 08: Atenuación específica en dB/Km en las ciudades del Perú	64
Tabla 09: Resultados de los valores de LG, LS y hR para cada ciudad.....	68
Tabla 10: Valores de la longitud efectiva por ciudad para frecuencias de 20 y 30 GHz.....	70
Tabla 11: Valores de atenuación para la frecuencia de 30 GHz, enlace ascendente de Banda Ka	71
Tabla 12: Valores de Atenuación para la frecuencia de 20 GHz, enlace descendente de Banda Ka	72
Tabla 13: Requerimientos de Eb/No para una canal Outbound DVD-S2.....	78
Tabla 14: Requerimientos de Eb/No para una canal Inbound DVB-RCS2	78
Tabla 15: Especificaciones técnicas del satélite	79
Tabla 16: Valores de PIRE y G/T por ciudad	81
Tabla 17: Ancho de banda en KHz ocupado por esquema de modulación y codificación	82
Tabla 18: Distancia entre las estaciones en tierra y el satélite	83
Tabla 19: Atenuación por lluvia por ciudad a 20 GHz y 30 GHz	84
Tabla 20: Pérdidas de espacio libre por ciudad	85
Tabla 21: Pérdidas por dispersión y pérdidas adicionales por ciudad	86
Tabla 22: Especificaciones de RF de la estación terrena y terminal remoto	87
Tabla 23: G/T de la ET y terminal remoto por ciudad durante cielo despejado y a diversas tasas de probabilidad de lluvia	88
Tabla 24: Relación de C/N ascendente para una portadora de 2048 Kbps	91
Tabla 25: Potencia requerida del satélite por ciudad	93
Tabla 26: Relación de C/N descendente para una portadora de 2048 Kbps.....	94
Tabla 27: C/N requerido por tipo de modulación y codificación disponibles para el enlace Outbound e Inbound	95
Tabla 28: Relación de C/N total del sistema para una portadora de 2048 Kbps	96
Tabla 29: Margen de enlace y ModCod alcanzado en la portadora Outbound de 120000 Kbps.....	98
Tabla 30: Margen de enlace y ModCod alcanzado en la portadora Inbound de 2048 Kbps.....	99
Tabla 31: Utilización de los esquemas de modulación y codificación en el enlace Outbound	105
Tabla 32: Eficiencia global alcanzada en Bit/Hz	105
Tabla A1.1: Coeficientes de polarización lineal y circular	117

Tabla A2.1: Atenuación específica para polarización circular en las ciudades de Moquegua, Tacna, Arequipa, Ica, Lima, Piura, Chiclayo y Trujillo	118
Tabla A2.2: Atenuación específica para polarización circular en las ciudades de Puno, Tumbes, Abancay, Huancavelica, Pasco, Huaraz, Cusco y Ayacucho	119
Tabla A2.3: Atenuación específica para polarización Circular en las ciudades de Huancayo, Cajamarca, Huánuco, Puerto Maldonado, Moyobamba, Chachapoyas, Pucallpa e Iquitos.	120
Tabla A3.1: Datos de atenuación para las Bandas C, Ku y Ka, con tasa de probabilidad de 0.01%.	121
Tabla A3.2: Datos de atenuación para las Bandas C, Ku y Ka, con tasa de probabilidad de 0.1%.	121
Tabla A3.3: Datos de atenuación para las Bandas C, Ku y Ka, con tasa de probabilidad de 0.5%.	122
Tabla A3.4: Datos de atenuación para las Bandas C, Ku y Ka, con tasa de probabilidad de 1%.	122
Tabla A6.1: Relación de C/N ascendente para una portadora de 4096 Kbps	125
Tabla A6.2: Relación de C/N ascendente para una portadora de 6144 Kbps	125
Tabla A6.3: Relación de C/N ascendente para una portadora de 8192 Kbps	126
Tabla A6.4: Relación de C/N ascendente para una portadora de 10240 Kbps	126
Tabla A7.1: Relación de C/N descendente para una portadora de 4096 Kbps	127
Tabla A7.2: Relación de C/N descendente para una portadora de 6144 Kbps	127
Tabla A7.3: Relación de C/N descendente para una portadora de 8192 Kbps	128
Tabla A7.4: Relación de C/N descendente para una portadora de 10240 Kbps ...	128
Tabla A8.1: Relación de C/N total del sistema para una portadora de 4096 Kbps	129
Tabla A8.2: Relación de C/N total del sistema para una portadora de 6144 Kbps	129
Tabla A8.3: Relación de C/N total del sistema para una portadora de 8192 Kbps	130
Tabla A8.4: Relación de C/N total del sistema para una portadora de 10240 Kbps	130
Tabla A9.1: Margen de enlace y ModCod alcanzado en la portadora Inbound de 4096 Kbps	131
Tabla A9.2: Margen de enlace y ModCod alcanzado en la portadora Inbound de 6144 Kbps	132
Tabla A9.3: Margen de enlace y ModCod alcanzado en la portadora Inbound de 8192Kbps	133
Tabla A9.4: Margen de enlace y ModCod alcanzado en la portadora Inbound de 10240 Kbps	134

GLOSARIO

Amplificador: Dispositivo diseñado para aumentar el nivel de potencia, voltaje o corriente de señales eléctricas o electromagnéticas.

Amplificador de Alta Potencia: También conocido como HPA (*High Power Amplifier*) por sus siglas en inglés. Es un dispositivo electrónico utilizado en sistemas de comunicación vía satélite para incrementar la potencia de acceso al satélite de una señal.

Ancho de banda: Rango de frecuencias requerida para propagar información a través de un sistema. El ancho de banda de un sistema de comunicación debe ser lo suficientemente ancho para que pasen todas las frecuencias significativas de la información.

Angulo de elevación: Angulo de apuntamiento de una antena con respecto al plano horizontal.

Apogeo: Es el punto más alejado del centro de la Tierra en la órbita de un satélite.

Atenuación: Término general para denotar una disminución en la magnitud de una señal en una transmisión de un punto a otro. Puede ser expresada como la relación entre la magnitud de entrada y la magnitud de salida, o en decibeles.

Atenuación por lluvia: Pérdida o reducción de las características de potencia y polarización de las ondas radioeléctricas debido a la lluvia o a nubes muy densas. Varía de región a región de acuerdo a la tasa de pluviosidad.

Atenuador de posición (ATP): Dispositivo que reduce la potencia a la entrada del sistema. En un satélite de comunicaciones disminuye la sensibilidad a la recepción. Su valor se expresa en dB.

Azimut: Ángulo de orientación de una antena, se mide en grados y se realiza en el sentido de las manecillas del reloj a partir del Norte (0°).

Back off: Nivel de reducción de potencia a la entrada de un amplificador para asegurar su operación en la región lineal, logrando con esto reducir al mínimo posible el ruido por intermodulación.

Banda base: Banda de baja frecuencia que ocupan las señales antes de modular la señal portadora de transmisión.

Bit Error Rate (BER): Tasa de bits erróneos. Relación del número de bits erróneos al total de bits transmitidos en un determinado intervalo de tiempo.

Enlace ascendente: Arreglo de equipos de telecomunicaciones utilizados en la transmisión de señales al satélite.

Enlace descendente: Arreglo de equipos de telecomunicaciones utilizados en la recepción de señales desde el satélite.

Enlace saliente (Outbound): Arreglo de equipos de telecomunicaciones utilizados en la transmisión de señales desde la estación terrena hacia el terminal remoto.

Enlace entrante (Inbound): Arreglo de equipos de telecomunicaciones utilizados en la transmisión de señales desde el terminal remoto hacia la estación terrena.

ETSI: European Telecommunications Standards Institute (ETSI) o Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones

CDMA: Acceso Múltiple por División de Código; también conocida como Acceso Múltiple de Espectro Disperso. Técnica de acceso al satélite mediante la cual la señal es transmitida dentro de un determinado ancho de banda en ciertos períodos de tiempo a través de un código de transformación.

Cobertura: Región de tierra que es alcanzada por la radiofrecuencia emitida por un satélite.

Constante de Boltzmann: Relación de la energía promedio de una molécula a la temperatura absoluta del medio. Su valor es $k=1.38 \times 10^{-23}$ Joules/kelvin = 228.5992 dBJ/K.

dB: Unidad para expresar la relación entre dos parámetros utilizando logaritmos de base 10. Se utiliza debido a que facilita los cálculos cuando intervienen cantidades muy grandes y muy pequeñas como en el caso de los enlaces vía satélite.

dBW: Decibeles referidos a la potencia expresada en Watts. La potencia de los satélites se expresa en dBW.

Densidad de potencia de ruido: Es la potencia de ruido generada por unidad de ancho de banda o en un determinado ancho de banda de referencia.

DVB: Digital Video Broadcasting (DVB) es una organización que promueve estándares aceptados internacionalmente de televisión digital, en especial para HDTV y televisión vía satélite, así como para comunicaciones de datos vía satélite (unidireccionales, denominado DVB-IP, y bidireccionales, llamados DVB-RCS).

DVB-S2: Digital Video Broadcasting by Satellite - Second Generation (DVB-S2) es un estándar de transmisión de datos y televisión digital considerado el sucesor del sistema DVB-S

DVB-RCS2: Digital Video Broadcasting – Return Channel Satellite es un estándar abierto de comunicaciones interactivas por satélite, Permite la comunicación bidireccional de una estación VSAT (Very Small Aperture Terminal)

Eb/No: Relación de energía por bit a densidad espectral de ruido en Watts por Hertz.

Estación terrena: Estación situada en un punto fijo en la Tierra destinada a establecer comunicación con una o varias estaciones espaciales, puede ser transmisora, receptora o transreceptora.

FEC: Corrección de errores sin canal de retorno que pueden ser de $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$.

FDMA: Acceso Múltiple por División de Frecuencia. Técnica de acceso al satélite en la que cada portadora se transmite de manera constante en una frecuencia exclusiva durante todo el tiempo.

Figura de Mérito (G/T): Es un indicador de la sensibilidad del sistema de recepción. Se define como la relación de la ganancia de la antena a la recepción con respecto a la temperatura de ruido del sistema a la recepción; sus unidades normalmente son dBi/K.

Figura de ruido: Representada como la relación señal a ruido a la entrada de un sistema con respecto a la relación señal a ruido a la salida del mismo sistema. Es la medida de la degradación de la relación señal a ruido en un sistema de comunicaciones.

Portadora: Señal de frecuencia fija generalmente, que es modulada por la señal de información a fin de transportarla.

PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Efectivamente): Producto de la potencia suministrada a la antena por su ganancia en relación con una antena isotrópica (ideal, radiando en todas direcciones) en una dirección dada.

Posición orbital: Es la ubicación de un satélite en el arco orbital. Se expresa en grados (Este / Oeste) a partir del meridiano de Greenwich.

QPSK: PSK en cuadratura; utiliza PSK tanto en fase como en cuadratura para proporcionar información.

Relación portadora a densidad de ruido (C/No): Relación de potencia entre la portadora y la densidad de potencia de ruido en un ancho de banda de 1 Hz. Se expresa en dB/Hz.

Relación portadora a ruido (C/N): Relación de la potencia de una portadora digital con respecto a la potencia de ruido en el ancho de banda que ocupa. Se expresa en dB.

Ruido: Señales indeseables en un circuito de comunicaciones, se expresa en dB.

Ruido térmico: Ruido producido por el movimiento aleatorio de los electrones tanto en un medio de transmisión como en los equipos de comunicación.

Ruido de intermodulación: Se presenta cuando una o más señales pasan a través de un dispositivo no lineal con niveles de entrada demasiado altos produciendo señales espurias.

Satélite: Cuerpo que gira alrededor de otro y cuyo movimiento está determinado por la fuerza de atracción de éste último. En comunicaciones, artefacto puesto alrededor de la Tierra como repetidor de señales de radiofrecuencia.

Satélite geoestacionario: Satélite geosíncrono cuya órbita circular se encuentra sobre el plano ecuatorial y que aparentemente permanece fijo con respecto a un punto determinado sobre la Tierra. La altura de la órbita geoestacionaria es de aproximadamente 36,000 kilómetros.

TDMA: Acceso Múltiple por División de Tiempo. Técnica de acceso al satélite en la que un determinado ancho de banda es utilizado por múltiples estaciones en diferentes intervalos de tiempo.

Transpondedor: Parte esencial del subsistema de comunicaciones de un satélite que tiene como función principal la de amplificar la señal que recibe de la estación terrena, cambiar la frecuencia y retransmitirla nuevamente a una estación terrena ubicada dentro de su área de cobertura.

Temperatura de ruido: Temperatura provocada por el ruido térmico. Cuando ésta afecta a un rango de frecuencias dado, el poder del mismo es proporcional a la temperatura absoluta y al rango de frecuencias en cuestión. La temperatura de ruido está referida a la salida de la antena receptora de la estación terrena que corresponda a la potencia de ruido de radiofrecuencias que produce el ruido total observado en la salida del enlace por satélite, con exclusión del ruido debido a las interferencias provocadas por los enlaces adyacentes que utilizan otros satélites y por los sistemas terrestres.

UIT: Unión Internacional de Telecomunicaciones (International Telecommunications Union).

VSAT: Terminal de apertura muy pequeña. Estaciones terrenas con antenas de diámetro igual o menor a 2.4 metros.

RESUMEN

Los satélites de alto rendimiento (HTS, por sus siglas en inglés) que operan en Banda Ka ofrecen ventajas significativas sobre los sistemas convencionales de Bandas C y Ku, entre las que destaca el mayor ancho de banda en los servicios hacia el usuario final. Por el contrario, la principal desventaja se debe principalmente a las degradaciones que sufren los enlaces frente a condiciones de lluvia, en especial en zonas tropicales como Sudamérica. Sin embargo con una correcta planificación y la implementación de los equipos de tierra con un diseño apropiado, podemos mitigar estos efectos manteniendo la eficiencia que caracteriza a este tipo de tecnología.

El presente trabajo de tesis, busca evaluar la Banda Ka para la prestación de servicios fijos por satélite en el Perú, brindando una metodología de análisis técnico con la finalidad que sector público y privado puedan considerarlo en futuros proyectos relacionados con el despliegue de servicios de banda ancha satelital en el país, en complemento con el actual despliegue de la Red Dorsal Nacional de fibra óptica, además de las tecnologías de acceso móvil de última generación como es el caso de las redes 3G y 4G.

La investigación se basa en la utilización de los esquemas de modulación y codificación de los estándares DVB-S2 y DVB-RCS2. En primer lugar se hace una descripción de los sistemas de comunicación por satélite, y se fundamenta la utilización de la Banda Ka mediante un análisis comparativo de los HTS con los satélites convencionales. Seguidamente, se realiza el cálculo predictivo de los índices de atenuación por lluvia para cada una de las capitales de departamento, mediante los modelos matemáticos de las recomendaciones P.618-9, P.838-3 y P.837-6 de la ITU. Luego, se utilizan estos resultados como datos de entrada para el desarrollo de los cálculos de enlace, en los cuales se evalúan los esquemas de modulación y codificación existentes en los estándares DVB-S2 y DVB-RCS2, obteniendo como resultado los niveles de disponibilidad alcanzables por cada ciudad, los niveles de eficiencia y por último los lineamientos de modulación y codificación a considerar en los equipos de tierra, frente a condiciones de lluvia.

INTRODUCCIÓN

El creciente interés por los servicios de internet de banda ancha satelital a nivel mundial ha incrementado la necesidad de encontrar nuevas soluciones que permitan cubrir dicha demanda. En el 2012 la cantidad de suscriptores de servicios satelitales superaron los 1.5 millones, en su mayoría demandados desde Norteamérica. Al 2016 se espera que la demanda total se duplique mientras que para el 2020 se estima llegar a 5.8 millones de suscriptores [NSR12]. Este incremento está ligado principalmente al crecimiento conjunto de demanda, en Europa, Norteamérica y Latinoamérica, por servicios de banda ancha en zonas donde aún no se logra cubrir con tecnologías terrestres.

Por otro lado, es cada vez es más difícil encontrar posiciones orbitales para satélites geoestacionarios. Hoy en día las posiciones que están sobre las poblaciones más densas se encuentran agotadas, y los nuevos lanzamientos de satélites en Bandas C, Ku y que incluyen Ka, corresponden al reemplazo de los que se encuentran actualmente en órbita debido al término de su vida útil, que en la mayoría de casos es de 15 años. En ese sentido, se necesitan desarrollar tecnologías satelitales que permitan hacer eficiente el espacio orbital y el espectro disponible, es así que la orientación actual en la fabricación de los nuevos satélites se basa en el uso de la Banda Ka, ya que al operar con un rango de frecuencia más amplia y mayor a la de las Bandas C y Ku, permite diseñar satélites con capacidades muy superiores mediante la aplicación de técnicas como el reúso de frecuencias.

Hoy en día, existen satélites de alto rendimiento (HTS, por sus siglas en inglés) de Banda Ka desplegados en Norteamérica como es el caso de Viasat-1 y Jupiter-1 con capacidades mayores a 100 Gbps, y en Europa por su parte con el satélite Kasat con una capacidad de 70 Gbps. Otros satélites con capacidades menores a 10 Gbps fueron precedentes en varios países como USA, Nigeria, Japón entre otros y cuya base sirvió para el diseño de los actuales satélites de alto rendimiento.

En Sudamérica, el lanzamiento más reciente que incluye Banda Ka fue la del satélite Amazonas 3 operado por Hispasat, el cual se puso en órbita en Mayo del 2013 en reemplazo del Amazonas-1 y cuya nueva capacidad adiciona nueve spots beams de Banda Ka en varias ciudades de Sudamérica, entre los cuáles se encuentran cubiertas algunas ciudades del Perú como: Piura, Cajamarca,

Amazonas y Chiclayo. Existen otras iniciativas importantes para el despliegue de satélites de alto rendimiento con cobertura sobre Latinoamérica, entre ellos se encuentran Global Xpress cuya flota de tres satélites serán operados por Inmarsat a partir del 2014, EPIC-NG de Intelsat y el satélite D1 de Embratel, operado por StarOne, estos últimos con lanzamiento previsto en el año 2016.

Por otra parte, una de las principales dificultades que tiene la utilización de la Banda Ka, es la degradación que sufren los servicios ante presencia de lluvias, es así que trabajos como [DEP05] y [ALB07] demuestran que la prestación de estos servicios tienen rangos de operación limitados en Europa, y en [PET12] hacen lo mismo para Norteamérica, a pesar de tener índices de lluvia más bajos que en Sudamérica. Por su parte ANATEL en [LIN12] hace un estudio de los niveles de atenuación y disponibilidad que se obtienen en el territorio brasileño.

Ante esta dificultad, diversos fabricantes de tecnología satelital han adoptado técnicas de mitigación de atenuación por lluvia en sus equipos, como es el caso de la modulación y codificación adaptativa de los estándares DVB-S2 y DVB-RCS2, sin embargo éstas técnicas son las mismas que se aplican en los servicios de Banda C y Ku, por lo cual es de vital importancia identificar los parámetros que permitan obtener niveles de servicio aceptables para la prestación de servicios de Banda Ka en cada una de las ciudades del Perú, puesto que no se han encontrado divulgaciones académicas de esta índole en nuestro país, a pesar de encontrarnos en una zona tropical y de tener ciudades con altos índices de lluvia como en la Selva.

El presente trabajo tiene como principal objetivo, evaluar la Banda Ka para la prestación de servicios fijos de banda ancha en el Perú mediante satélites de alto rendimiento (HTS), brindando una metodología de análisis técnico con la finalidad que el sector público y privado puedan considerarlo en futuros proyectos relacionados con el despliegue de servicios de banda ancha satelital, en complemento con el despliegue de la Red Dorsal Nacional de fibra óptica, además de otras tecnologías de acceso de última generación como es el caso de las redes 3G y 4G, pues el desarrollo de la banda ancha constituye una herramienta de desarrollo social y económico de un país.

Para llegar a ello, desarrollaremos los siguientes objetivos específicos:

- Fundamentar porque es necesario la utilización de los servicios de Banda Ka para el despliegue de servicios fijos de banda ancha por satélite en el Perú.

- Calcular los niveles de atenuación producido por los efectos de la lluvia sobre las frecuencias de Banda Ka en las capitales de departamento del Perú.
- Identificar los niveles de disponibilidad que se pueden alcanzar en cada una de las capitales de departamento del Perú.
- Determinar el nicho de mercado en los que se pueden orientar los servicios de Banda Ka.
- Proponer lineamientos de configuración de modulación y codificación en los servicios satelitales, frente a condiciones climáticas adversas como la lluvia.
- Identificar los niveles de eficiencia espectral que se puede obtener al brindar servicios con Banda Ka en el país.

Para cumplir el objetivo principal, se ha dividido la tesis en cuatro capítulos que desarrollarán cada uno de los objetivos específicos. En el primer capítulo se realizará una revisión de los conceptos generales de las comunicaciones por satélite que sirven de base para la obtención de resultados del presente trabajo, se revisarán temas como los tipos de atenuación por desvanecimiento, técnicas de mitigación de atenuación por lluvia y los parámetros fundamentales para la elaboración de los cálculos de enlace. Seguidamente, en el segundo capítulo realizaremos un análisis comparativo entre los satélites geoestacionarios de alto rendimiento en Banda Ka y los satélites convencionales actuales, en este mismo capítulo trataremos la situación actual del mercado internacional, así como la creciente demanda de los servicios fijos de banda ancha satelital.

El tercer capítulo consta de los cálculos de predicción de la atenuación causada por la lluvia sobre los servicios de Banda Ka en cada una de las capitales del Perú, tomando como base las recomendaciones P.618-9, P.838-3 y P.837-6 de la ITU, del cual se rigen los fabricantes del sector satelital para realizar sus estimaciones, estos resultados serán la información fundamental a utilizar en el último capítulo. En el cuarto capítulo realizaremos los cálculos de enlace para cada una de las capitales del Perú considerando los esquemas de modulación y codificación adaptativa que ofrecen los actuales fabricantes de tecnología satelital mediante los estándares DVB-S2 y DVB-RCS2, estos cálculos se realizan mediante las ecuaciones descritas en el primer capítulo y tomando como fuente de información los resultados de atenuación del tercer capítulo, además del diseño conceptual de un HTS con cobertura sobre el territorio nacional. Por último daremos algunas recomendaciones de operación según los resultados obtenidos.



CAPITULO I: COMUNICACIONES POR SATÉLITE

En el presente capítulo se mostrará la teoría básica de las comunicaciones por satélite mediante la descripción de algunos conceptos importantes como modulación, codificación, técnicas de acceso al medio, estándares de la industria y ecuaciones generales que servirán de base para los cálculos de enlace que desarrollaremos en la tesis.

1.1 Capas de la atmósfera

La atmósfera es una capa externa que rodea la tierra, se compone por una mezcla de gases como el nitrógeno, oxígeno y argón, los cuáles son los que se encuentran en mayor cantidad, y el polvo atmosférico que generalmente proceden del suelo, mar y volcanes. Un gran porcentaje, cerca de 95% de los componentes de la atmósfera se encuentran comprimidos en los primeros kilómetros cerca a la superficie terrestre, y se van reduciendo a medida que aumenta la altura. Su límite inferior es la parte sólida y líquida del planeta, pero su límite superior es impreciso.

Según su composición química, la atmósfera puede ser Homósfera o Heterósfera. La capa Homosférica se extiende hasta unos 80 Km de altitud y se caracteriza por tener una composición homogénea. La capa Heterósfera, en cambio, se caracteriza por tener una composición separada según la densidad, entre las capas que la componen se encuentra el nitrógeno, oxígeno molecular y atómico, helio e hidrógeno atómico.

Considerando la variación de la temperatura, la atmósfera se divide en las siguientes capas, las cuáles podemos apreciar de forma gráfica en la Figura 01.

1.1.1 Tropósfera

Esta capa se inicia en la superficie de la tierra y puede llegar hasta los 18Km en la tropopausa, dependiendo de la ubicación de la tierra, aproximadamente 9Km en los polos y el máximo nivel en la zona ecuatorial. Es la capa más densa puesto que contiene alrededor del 90% del peso de la atmósfera, la cual se encuentra en los primeros kilómetros y va disminuyendo con la altura. La temperatura en esta capa se reduce de forma constante, llegando hasta aproximadamente -60°C con un descenso medio de $6.5^{\circ}\text{C}/\text{Km}$ desde los 20°C . En esta capa ocurren la gran parte de los efectos atmosféricos que constituyen el clima.

1.1.2 Estratósfera

Se extiende desde la Tropopausa hasta unos 55 Km de altura, llegando hasta la estratopausa, que es donde empieza la capa Mesósfera. En esta capa se encuentra la mayor parte del ozono atmosférico entre los 15 y 30Km de altura, este rango es la que se denominada capa de ozono. La temperatura en esta capa empieza a elevarse hasta llegar a unos 5°C a medida que llega a la estratopausa, este incremento de temperatura se debe principalmente a la absorción de radiación solar ultravioleta que realizan las moléculas de ozono. Dentro de esta capa hay movimientos horizontales de aire, pero no verticales como sucede en la tropósfera.

1.1.3 Mesósfera

Esta capa se extiende desde la estratopausa hasta unos 80Km de altura llegando a la mesopausa. Es la zona más fría de la tierra, la temperatura varía de 5°C hasta -90°C en la capa superior. La densidad de aires es reducida, sin embargo las partículas de la mesósfera pueden ocasionar la desintegración de los restos de meteoritos debido al rozamiento, con lo que pueden generar lo que denominamos estrellas fugaces.

1.1.4 Ionósfera o termósfera

Se extiende hasta unos 600Km de altura hasta la termopausa, contiene sólo el 0.1% de los gases. La temperatura se vuelve nuevamente a incrementar, la cual puede llegar hasta los 1000°C, debido a la absorción de onda más corta (rayos X y gamma) que realizan las moléculas de oxígeno y nitrógeno, que a su vez logran una ionización positiva. Es así que en la parte superior se puede apreciar auroras boreales. Por otro lado, en esta capa se realiza la reflexión de ondas de radio y televisión emitidas desde dos puntos de la tierra lejanos y sin visibilidad directa.

1.1.5 Exósfera

Es la última capa de la tierra, se extiende desde los 800Km hasta unos 10000km, el límite superior es desconocido puesto que la densidad de aire es muy baja, casi similar a la del espacio exterior. El cielo es oscuro debido a que no hay materia que absorba la luz.

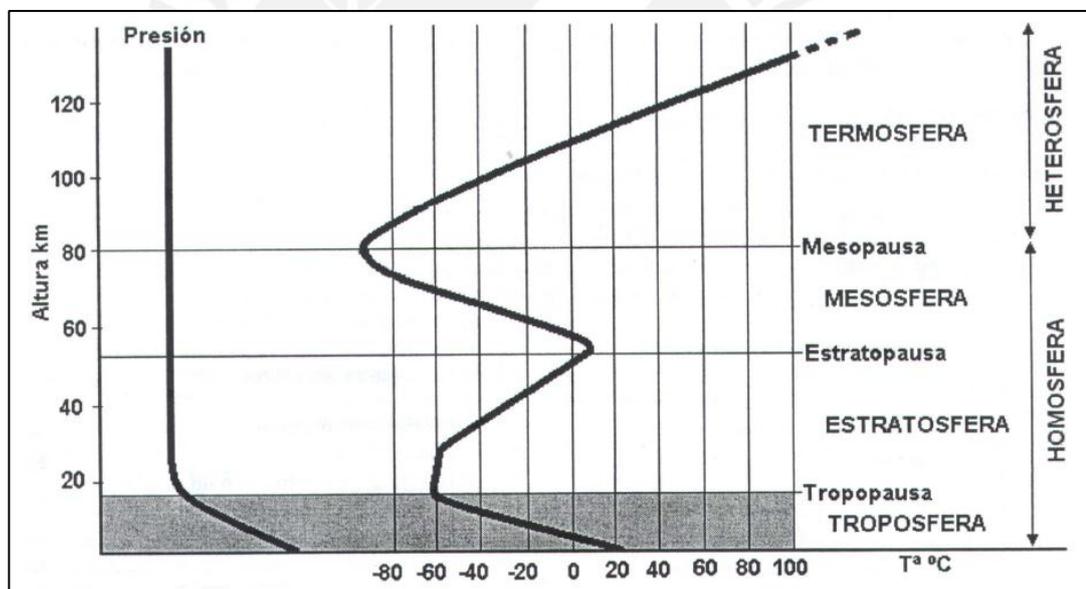


Figura 01: Capas de la atmósfera [MOR13]

1.2 Satélites y órbitas

Se denomina satélite a todo cuerpo que gravita en una órbita cerrada alrededor de un planeta, éstos se clasifican en satélites naturales y artificiales.

Los satélites naturales son aquellos cuerpos que se encuentran gravitando alrededor de otros de mayor masa atraídos por la fuerza gravitacional, actualmente la Luna es el único satélite natural de la Tierra. Por otro lado los satélites artificiales son cuerpos prefabricados y enviados al espacio mediante un lanzamiento de

cohete, estos cuerpos pueden orbitar alrededor de cualquier otro cuerpo como planetas, estrellas, lunas entre otros, y se clasifican según la órbita en la cual operan.

Tabla 01: Tipos de órbita (Elaboración propia)

Parámetro	Órbita Baja	Órbita Media	Órbita Geostacionario
Altura	500 – 2000 Km	5000-20000 Km	35786 Km
Inclinación Ecuador	90°	50°	0°
Periodo de rotación	1.5 - 2 horas	6 horas	24 horas

1.3 Cobertura de los satélites

La cobertura del satélite está representada por la Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (PIRE) en forma de huella, detallada más adelante, la cual depende principalmente por las características de la antena, de la posición orbital del satélite y de la geografía del territorio donde se ilumina. La cobertura puede darse de forma global, regional y local.

1.3.1 Cobertura global

Comúnmente encontrada en satélites con cobertura en Banda C, se utiliza con un ancho de haz de alrededor de 17.4° que es el límite para cubrir la superficie de la tierra, un ancho de haz mayor sobrepasaría esta cobertura, ver Figura 02. Este ancho de haz grande trae como implicancia una poca ganancia, por el rango de los 20dBi. Tiene como principal ventaja, al tener una cobertura extensa, que las terminales remotas pueden encontrarse en cualquier lugar del planeta, inclusive en los océanos.



Figura 02: Satélites geoestacionarios con cobertura global (Elaboración propia)

El precio de estos satélites es el más bajo puesto que no necesitan múltiples reflectores, por consiguiente menor peso. Todo el territorio de la tierra, a excepción de los polos, queda cubierto con tres satélites geoestacionarios de cobertura global, ubicados en latitudes comprendidas entre los 75° Norte y 75° Sur.

1.3.2 Cobertura regional

Para obtener este tipo de cobertura se requiere un haz con mayor ganancia en el rango de los 25 dBi, además de una mayor directividad, es decir un ancho de haz más pequeño con ángulos que van desde 1 a 10° y puede cubrir desde un país hasta un continente dependiendo del ancho de haz y la ganancia. Es comúnmente utilizado en banda Ku.

Debido a que se requieren antenas con reflectores, estas pueden apuntar a regiones distintas, dejando espacios en tierra sin cubrir para no desperdiciar potencia en zonas donde no se requiere dar servicios. El costo de estos satélites se incrementa debido a que los reflectores incrementan la carga útil del satélite y por ende el precio de lanzamiento, pero su esto se sustenta en la ventaja que trae al ofrecer una cobertura focalizada.

1.3.3 Cobertura local

Cubre un área muy pequeña de alrededor de 500Km de diámetro, con lo cual se puede cubrir una ciudad o grupo de ciudades. Requiere un haz con apertura mínima, en el orden de 0.5° a 1° y una ganancia en el orden de los 50 dBi. Su costo es más elevado debido a que se requieren aún más reflectores y por ende mayor carga útil del satélite. Esta cobertura se utiliza actualmente en satélites de Banda Ka para dar servicios de internet masivo y es de la cual hablaremos en detalle más adelante.

En la Figura 03 se aprecia una gráfica comparativa de los tres tipos de cobertura sobre la tierra, donde la cobertura global se muestra en azul, la regional en naranja y la local en rojo.

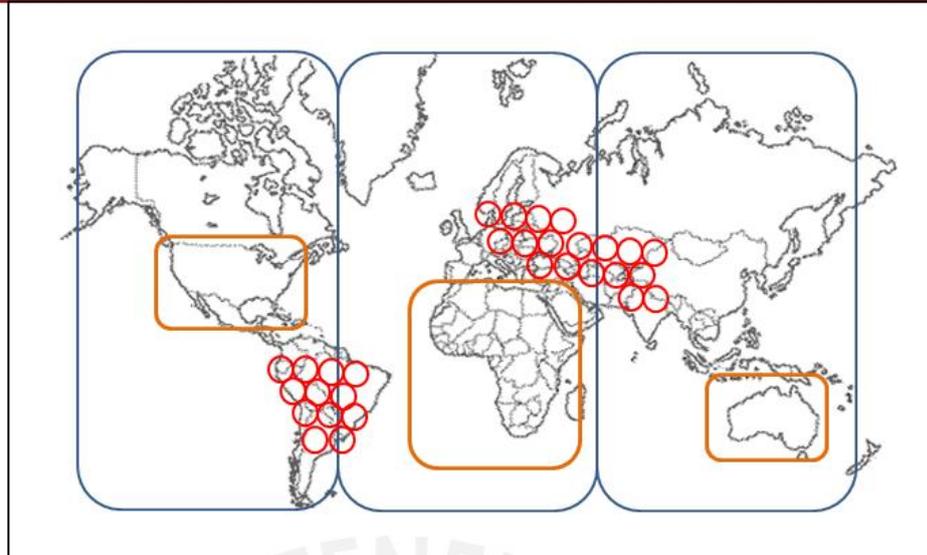


Figura 03: Tipos de coberturas (Elaboración propia)

1.4 Bandas de frecuencia

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) planificó las bandas de frecuencias radioeléctricas atribuidas a los servicios radiocomunicación espacial y a los servicios fijos y móviles por satélite. Estas bandas se conocen comercialmente con letras alfabéticas, como es el caso de las Bandas C, Ku o Ka, en [ROS08] se describe la atribución de frecuencias para las Américas, las cuales se muestran en la Tabla 02.

Tabla 02: Asignación de frecuencias por tipo de banda

Banda	Asignación de Frecuencias (Ghz)
L	1.525 - 1.71
S	1.99 - 2.22 ; 2.5 - 2.69
C	3.4 - 4.2 ; 4.5 - 4.8 ; 5.15 - 5.25 ; 5.85 - 7.075
X	7.2 - 8.4
Ku	10.7 - 13.25 ; 13.75 - 14.8
Ka	17.3 – 21.0; 27.0 - 31.0

1.5 Modulación digital

La modulación digital es el proceso mediante la cual los símbolos son transformados en formas de onda que son compatibles con la característica espectral de un canal de comunicaciones. En el caso de la modulación paso banda, la señal de información deseada modula una senoide llamada onda portadora o simplemente portadora. Por el contrario la demodulación consiste en recuperar el flujo de bits a partir de la forma de onda recibida [AGU06].

Para enviar información digital, la onda portadora puede variarse en amplitud, frecuencia, fase o una combinación de ellas de acuerdo a la información a ser transmitida, esta variación en la onda es la que conocemos como señal modulada. Los tipos básicos de modulación son Desplazamiento de Amplitud (ASK por sus siglas en inglés), Desplazamiento de Frecuencia (FSK) y Desplazamiento de Fase (PSK), ver figura 04.

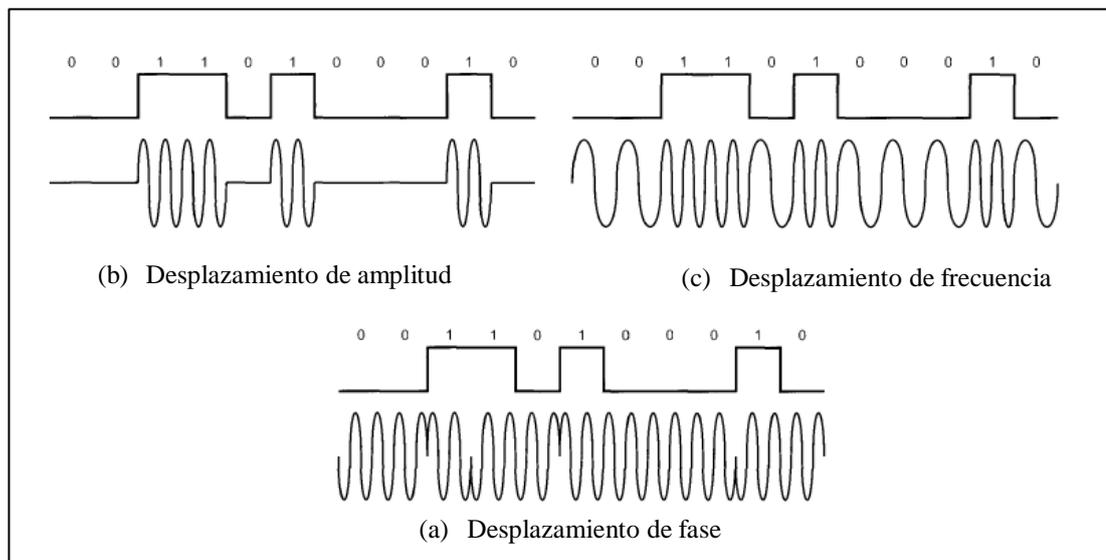


Figura 04: Tipos de modulación [BLA04]

En sistemas por satélite se usa de forma común la modulación de fase PSK. La fase de la portadora adopta un número finito de M valores. Es así entonces que un sistema de modulación es nombrado de acuerdo a la cantidad de fases o símbolos que tienen, por ejemplo sistema de dos símbolos se denomina BPSK y uno de cuatro se llama QPSK.

La cantidad de bits que se transmiten por símbolo dependerá de forma logarítmica de la cantidad de fases del sistema según la fórmula $N_b = \log_2 M$. Donde N_b es el número de bits y M es la cantidad de fases del sistema.

En la Tabla 03 se muestran las modulaciones utilizadas con mayor frecuencia en sistemas satelitales.

Tabla 03: Sistemas de modulación usados en sistemas por satélite

Modulación	Fases	Bits/símbolo
QPSK	4	2
8PSK	8	3
16APSK	16	4
32APSK	32	5

1.6 Forward Error Correction (FEC)

Es una técnica de codificación utilizada para dar redundancia a la información enviada a través de un enlace, para posteriormente se puedan corregir cualquier tipo de error en la recepción de los bits en presencia de altos niveles de ruido o interferencia.

Se representa como la relación entre el número de bits enviados como información y la cantidad total de bits enviados incluyendo el bit de corrección, pueden ser $1/2$, $2/3$, $3/4$, $6/7$, $9/10$, entre otros. Para dar un ejemplo, un FEC $2/3$ indica que por cada tres bits enviados, un bit corresponde al bit de corrección y dos bits contienen información.

1.7 Polarización

La polarización es un fenómeno que corresponde a la orientación del vector eléctrico de una onda radiada. Para entenderlo mejor, en una onda electromagnética los campos eléctricos y magnéticos son vectores que apuntan de forma perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Además, si conocemos la dirección de propagación de la onda sabremos que el campo eléctrico debe apuntar en alguna dirección perpendicular a dicho plano de propagación, dirección a la que llamamos polarización. Por tanto, la polarización se encuentra en un plano perpendicular a la dirección de propagación.

- Polarización Lineal: Se da cuando el campo eléctrico oscila en una única dirección. Estas se dan de forma horizontal o vertical. Este tipo de polarización es común en satélites de Banda C y Banda Ku.
- Polarización Circular: Es muy común en satélites de Banda C y Banda Ka, en este caso el campo eléctrico, en lugar de oscilar en un mismo plano, gira en torno al plano de propagación de la onda manteniendo una amplitud constante. La dirección del campo de esta onda se da en una especie de hélice y tiene dos modos de giro: Izquierdo y Derecho, los cuáles ayudan a identificar la dirección de giro. Por ejemplo si utilizamos la mano derecha, el dedo pulgar nos indicará la dirección de propagación y los dedos girarán en sentido antihorario, el cuál es la dirección de polarización. Por consiguiente la Polarización izquierda gira en sentido horario [PER04].

1.8 Técnicas de acceso al medio

Las técnicas de acceso al medio permiten a varias estaciones utilizar el mismo segmento satelital, es decir que puede ser compartida por más de una señal. Las

técnicas de acceso puede clasificarse de dos maneras, la primera de acuerdo a como varias estaciones de la misma red comparten capacidad a través de un único nodo, en este caso el satélite, y la segunda de la forma de cómo se asignan recursos satelitales a los usuarios [ROS08].

1.8.1 Clasificación por la compartición de capacidad satelital

1.8.1.1 Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA)

FDMA, por sus siglas en inglés, fue la primera técnica de acceso en sistemas satelitales, actualmente es utilizada para servicios SCPC (Single carrier per channel). Con esta técnica cada estación utiliza una parte distinta de frecuencia de la capacidad satelital, de modo que las estaciones transmitan y/o reciban información de forma continua en frecuencias diferentes para evitar la interferencia, esto también es utilizado por los operadores satelitales cuando un transpondedor opera con más de una portadora.

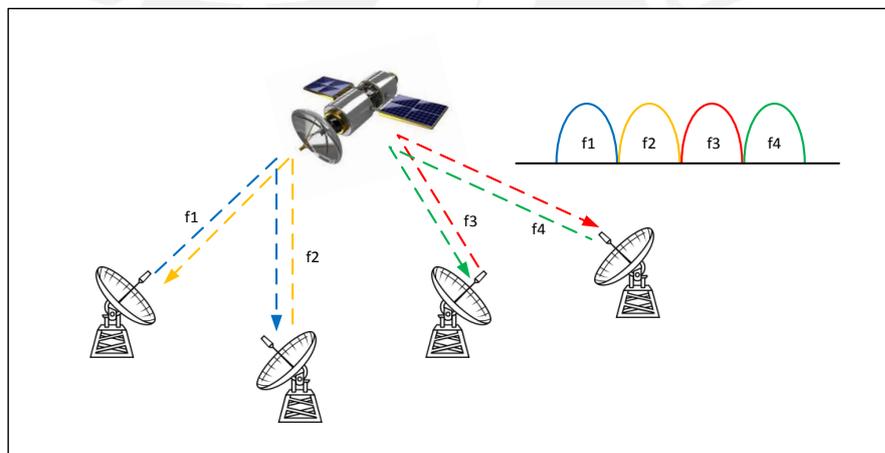


Figura 05: Acceso Múltiple por División de Frecuencia (elaboración propia)

Como ventaja principal podemos resaltar su simplicidad y bajo costo de inversión en redes punto a punto, sin embargo el inconveniente es la aparición de intermodulación en la capacidad utilizada debido a la no linealidad de los amplificadores de potencia, además de utilizar la capacidad de forma ineficiente puesto que la frecuencia no se utiliza mientras la terminal asignada no transmita información.

Esta forma de acceso es típica en redes SCPC para redes privadas y backhaul celular en los que se pueden transmitir voz y datos comprimidos en un ancho de banda fijo con transferencia de información continua. Actualmente no se utiliza la

técnica FDMA de forma individual, pero si es utilizado dentro del esquema de acceso FTDMA, que combina la técnica de división de tiempo y frecuencia.

1.8.1.2 Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA)

Esta técnica consiste en compartir la capacidad de una misma portadora en varias estaciones de una red, cada terminal hace uso de la capacidad en intervalos de tiempos diferentes pero de forma sincronizada y con duraciones fijas que se repiten en cada trama. Esta técnica de acceso solo es aplicable a portadoras digitales y es ideal para evitar las limitaciones de la técnica FDMA originadas por los efectos de intermodulación [ROS08].

Su funcionamiento es muy sencillo, una trama está constituida por cuatro tipos de ráfagas, una de referencia, una redundante de referencia, ráfagas de comunicación de cada terminal remoto y las guardas de tiempo, todas en conjunto demandan unos cuantos milisegundos. Las tramas se inician una vez que todas las terminales terminen de transmitir una ráfaga. De este modo, se recibe la misma portadora en todas las estaciones de forma sincronizada gracias a la información adicional que tiene cada ráfaga para identificar la terminal del cuál proviene.

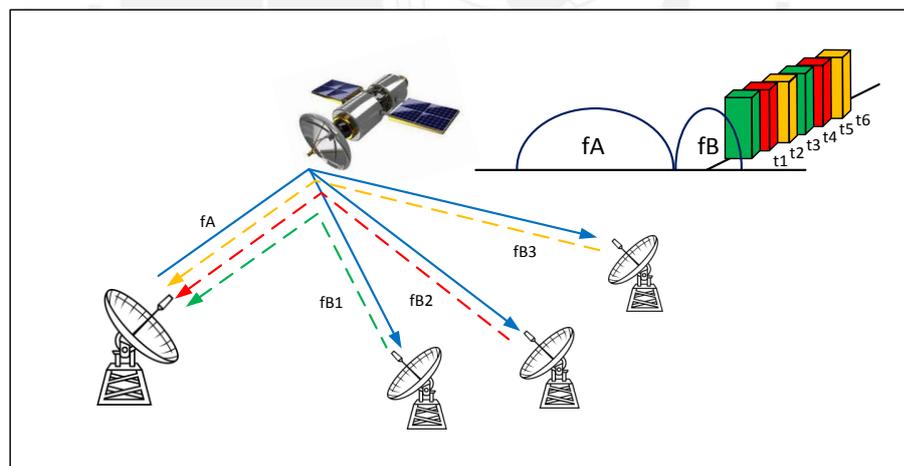


Figura 06: Acceso Múltiple por División de Tiempo (elaboración propia)

Esta técnica es muy usada en sistemas Vsat con topología estrella. Entre las ventajas más resaltantes podemos destacar la facilidad para modificar configuraciones y parámetros de la red sin la realización de cambios en los equipos terminales. Por otro lado la capacidad se puede aprovechar en su máxima eficiencia puesto que te permite trabajar en la zona de saturación. Todas las terminales trabajan a la misma potencia y frecuencia. Por el contrario esta técnica

tiene como principal inconveniente la necesidad de una sincronización fina [HER10].

1.8.1.3 Acceso Múltiple por División de Tiempo y Frecuencia (FTDMA)

FTDMA, es una técnica patentada para utilizarlo en servicios por satélite, combina las ventajas de las técnicas TDMA y FDMA. Esta técnica segmenta un conjunto de portadoras en frecuencia y los sub-segmenta en slots de tiempo, los cuáles son utilizadas en de forma aleatoria por las terminales Vsat cuando necesitan transmitir hacia la estación terrena.

Entre sus ventajas se tiene una mayor eficiencia en el uso del segmento satelital, en el orden de 30%. Además que es posible utilizar un slot de tiempo de portadoras de forma fija cuando se requiera asegurar un ancho de banda determinado, como por ejemplo para servicios de voz.

1.8.1.4 Acceso Múltiple por División de Código (CDMA)

CDMA es una técnica que en lugar de realizar el acceso múltiple por frecuencia o tiempo, lo hace mediante la asignación den código único pseudoaleatorio logrando que se realicen múltiples transmisiones en un mismo canal mediante la técnica de espectro ensanchado (Spread Spectrum). De este modo, si el receptor recibe múltiples señales de información usará el código asignado al terminal para transformar la señal y recuperar la información [TEC06].

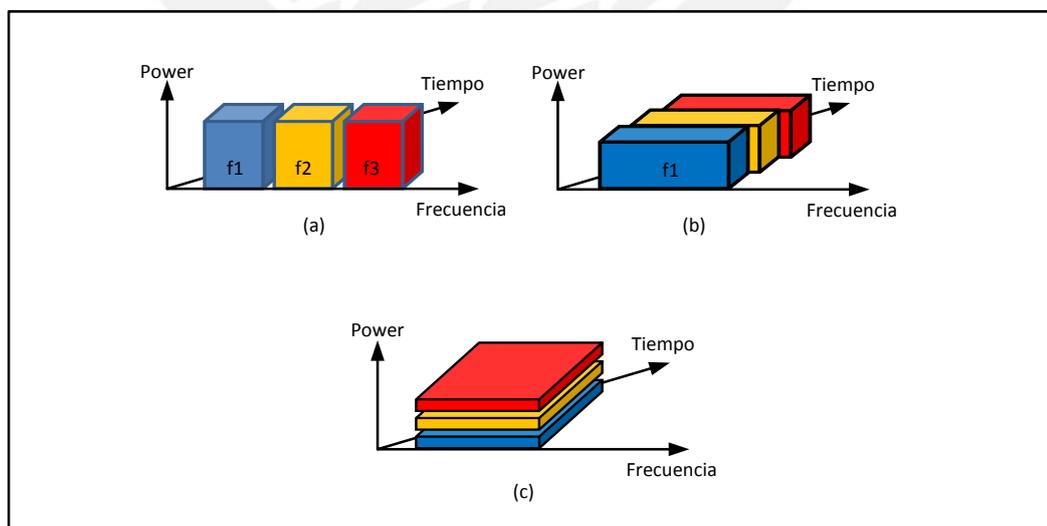


Figura 07: Técnicas de acceso múltiple (a) FDMA, (b) TDMA y (c) CDMA (elaboración propia)

La ventaja al usar CDMA es la cantidad de usuarios que pueden transmitir al mismo tiempo y en una misma portadora, distinguiéndose por el código único. Además, al hacer uso de códigos pseudoaleatorios es posible aumentar la potencia de las señales sin que éstas se interfieran. Por otro lado, este modo de acceso tiene mayor seguridad y privacidad puesto que es más difícil capturar y descifrar la señal [TEC06].

1.8.2 Clasificación por la forma de asignar recursos

Adicional a la clasificación anterior, se hace la siguiente clasificación por la forma en la cual se les asigna a los terminales la capacidad satelital en el tiempo

- Acceso múltiple con asignación previa o permanente (PAMA en inglés): Cada canal de cada estación tiene asignada permanentemente una parte de la capacidad en frecuencia en la forma de acceso FDMA o una posición determinada de ráfaga en la forma de acceso TDMA [ROS08].
- Acceso múltiple con asignación por demanda (DAMA en inglés): Las terminales no tienen una asignación permanente fija en tiempo o frecuencia, se asignan los recursos satelitales que no estén ocupados en el momento en que la terminal lo requiera, los cuáles son reasignados a otras terminales cuando ésta deja de utilizarlo.
- Acceso múltiple aleatorio (RMA en inglés): Se asigna un intervalo de tiempo de una portadora para la transmisión de forma aleatoria, la cual puede ser la misma que otra terminal este utilizando en ese instante.

1.9 Efectos de propagación causados por el clima

Entre las capas atmosféricas que tienen mayor afectación sobre las comunicaciones satelitales, especialmente de Banda Ka, la tropósfera es la más significativa, la cual se extiende hasta una altura de 15 Km. Prácticamente toda la precipitación se produce dentro de la tropósfera, ya que contiene aproximadamente el 99% del vapor de agua en la atmósfera [PET12].

En el presente trabajo, consideramos a la lluvia como el efecto que impacta en mayor medida, si bien la lluvia puede darse en tiempos prolongados, la mayor atenuación se debe a lluvias que se producen durante periodos cortos pero de forma muy intensa.

Para fines de medición, la atenuación por lluvia se refleja en función de la disponibilidad del enlace, la cual indica la probabilidad en la que la atenuación no será superior a un valor esperado. Por ejemplo si tenemos una disponibilidad de 99.95% y la atenuación esperada es de 4dB, significa que la atenuación no debería exceder los 4dB durante más del 0.05% del tiempo en un año, lo que es equivalente a 4.38 horas.

1.10 Tipos de atenuación

Las altas frecuencias se ven afectadas drásticamente por fenómenos de propagación entre las que se encuentran la atenuación por gases, atenuación por nubes, centelleo, despolarización y atenuación por lluvia, siendo este último el que representa el mayor porcentaje de afectación en los enlaces satelitales.

1.10.1 Atenuación por lluvia

La atenuación por lluvia es causada por la absorción y dispersión de las gotas de lluvia. Esta se encuentra relacionada a la frecuencia, ángulo de elevación de la terminal, polarización, intensidad de lluvia, distribución de los tamaños y la temperatura de las gotas de lluvia. La atenuación por lluvia es el principal fenómeno que afecta a la propagación en la Banda Ka para porcentajes de tiempo cortos, lo que ocasiona desvanecimientos de la señal [MON08, EDU04]. Su valor es muy variable, sin embargo suele considerarse hasta un valor del orden de 10 dB para tener un nivel de disponibilidad mayor a 99.5% en Banda Ka. En la Figura 19 se aprecia, de forma general, la atenuación específica causada por la lluvia en función de la frecuencia y la intensidad de lluvia.

Por otro lado, en el caso de los fenómenos atmosféricos, particularmente la lluvia, la despolarización es reconocida como una de las principales causas que alteran la propagación de la energía de las señales electromagnética, en pérdida o reducción de las características de potencia y polarización, llegando hasta la interrupción total de la comunicación [FER10].

La atenuación por lluvia se debe a la absorción y dispersión de energía propagante por las partículas de agua. Las gotas de lluvia se comportan como un medio dieléctrico disipador y reflector para los campos eléctricos incidentes, absorbiendo energía o dispersándola en diferentes direcciones. La absorción corresponde a la disipación térmica, siendo función de la conductividad del agua. La dispersión está asociada a múltiples reflexiones de la onda, de modo a satisfacer las condiciones

de contorno sobre cada gota. Un campo eléctrico linealmente polarizado que alcanza una gota de lluvia, sufre mayor o menor atenuación conforme su orientación coincide con el mayor eje de la sección transversal de la gota, esto porque la gota posee la forma de un esferoide con la orientación de su mayor eje caso horizontal, ya que es aplanada por causa de la acción gravitatoria y de la resistencia del aire [EDU04].

1.10.2 Atenuación por nubes

La atenuación por nubes dependen básicamente del contenido de agua líquida y de la temperatura de las gotas que las constituyen, este puede ser un factor muy importante para los sistemas con baja disponibilidad debido a mayor persistencia de nubes en el trayecto que en situaciones de precipitación. Dependiendo del ángulo de elevación y de los tipos de nubes en la ubicación donde se encuentra la estación terrestre [MON08]. El uso de modelos UIT-R con 99.5% de disponibilidad, atenuación de pico varía de 0,1 a 0,8 dB a 20 GHz y varía desde 0,3 hasta 1,7 dB a 30 GHz [PET12].

1.10.3 Atenuación por gases

Es causado por los gases en la atmósfera que absorben la radiación electromagnética, generalmente, la contribución del oxígeno es prácticamente constante, sin embargo la atenuación por vapor de agua es muy variable puesto que depende de las variaciones de humedad y temperatura de cada localidad [MON08, PAN04]. En general, la atenuación gaseosa es altamente dependiente de la frecuencia, pero la atenuación es aproximadamente igual a 20 GHz y 30 GHz. Esta atenuación es muy pequeña comparada con otros efectos de absorción, puede variar de 0,2 dB y 0,7 dB [PET12].

1.10.4 Centelleo

El centelleo es una variación en la amplitud de la señal causada por las variaciones en el índice de refracción, principalmente en la ionósfera, aunque también se produce en la tropósfera para el caso de Banda Ka. Como estimación con modelos de la UIT, la atenuación de pico debido a centelleo varía de 0,2 a 0,5 dB a 20 GHz y 0,2-0,7 dB a 30 GHz, como se estima usando modelos UIT-R con 99.5% de disponibilidad [PET12].

1.11 Técnicas de mitigación por desvanecimiento

Las técnicas de mitigación surgen con la necesidad de contrarrestar las dificultades que tienen los enlaces frente a condiciones de desvanecimiento, y más aún a medida que incrementamos la frecuencia de operación en el enlace, éste se vuelve más vulnerable a caídas y se requiere de un mayor énfasis en la aplicación de éstas técnicas. En [SAH11] se detallan las principales técnicas de mitigación de las cuáles resumiremos a continuación.

1.11.1 Control de Potencia

Se pueden considerar cuatro tipos de control de potencia, entre ellas se encuentran: Control de potencia ascendente, Control de potencia extremo a extremo y Control de potencia descendente.

1.11.1.1 Control de potencia ascendente

Tiene como objetivo incrementar la potencia de subida en la estación terrena o remota en variación de las condiciones de clima despejado o ante los cambios imprevistos de la PIRE del satélite.

1.11.1.2 Control de potencia extremo a extremo

Es utilizado en comunicaciones transparentes, o punto-punto, con esta técnica la potencia de salida de la estación terrena son equiparados con el desvanecimiento en el enlace ascendente o descendente, es decir, la potencia de transmisión se incrementa para contrarrestar el desvanecimiento o disminuye cuando se recuperan las condiciones de propagación más favorables para limitar la interferencia y optimizar la capacidad del satélite.

1.11.1.3 Control de potencia descendente

El control de Potencia descendente se realizar en el satélite para el enlace descendente. El satélite asigna una potencia adicional a un beam en particular con la finalidad de compensar una posible degradación de señal. Esta mejora en la PIRE se traslada a todas las terminales cubiertas por dicho haz en tierra. No se considerará en el presente estudio, debido a que es una característica propia del satélite y del cual no se tendrá injerencia,

1.11.2 Adaptación de la señal

Se da mediante esquemas de compensación del desvanecimiento con la adaptación de modulaciones más eficientes, múltiples esquemas de codificación y

cambios de velocidad de transferencia, por otras más robustas cuando ocurre algún efecto climático.

1.11.2.1 Codificación adaptativa

Consiste en la aplicación de una tasa de codificación variable de acuerdo a las condiciones del clima, es decir en condiciones favorables se utiliza una codificación más eficiente a fin de reducir la energía que se requiere por la transmisión de un bit de información. Como conocemos, los bits redundantes a los bits de información permiten la detección y corrección de errores en la transferencia de información.

1.11.2.2 Modulación adaptativa

El objetivo de la modulación adaptativa es la de sacar mayor provecho del espectro satelital, mediante la utilización de modulaciones más eficientes durante condiciones favorables de clima despejado. Esto se plasma en que a medida que tengamos una menor energía para transmitir un bit de información, va a ser necesaria la aplicación de una modulación más robusta, o de nivel inferior, lo cual conlleva a una reducción de eficiencia espectral, es decir se utilizan más Hz para un mismo servicio.

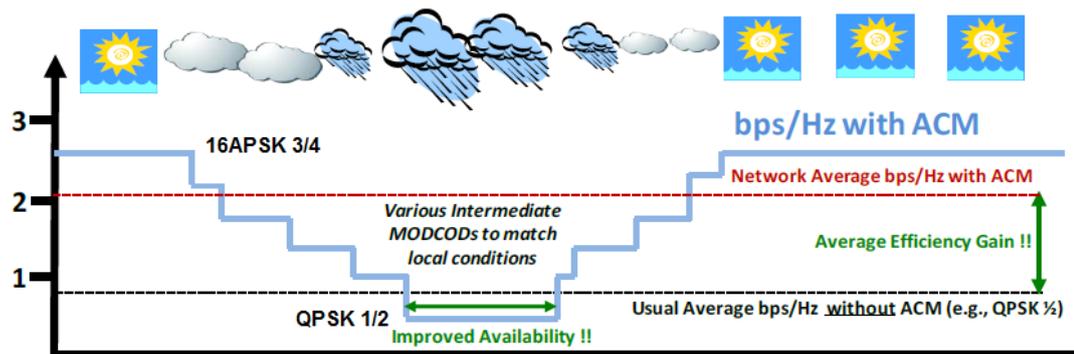


Figura 08: Técnica de modulación y codificación adaptativa en DVB [STM13]

En la Figura 08, se aprecia el comportamiento de la técnica de Modulación y Codificación Adaptativa, o ACM por sus siglas en inglés, disponible en los estándares DVB-S2 y DVB-RCS2. El sistema mantiene el esquema más eficiente en condiciones de clima favorables, logrando así la mayor eficiencia bit/Hz posible en el enlace.

Adicionalmente, mediante un testeo que se realiza de forma automática y constante, el sistema va modificando su configuración en cuando se perciban

degradaciones del enlace, logrando operar con los esquemas de modulación y codificación más robustos en condiciones de clima desfavorables como lluvias. Ésta técnica permite la operación continua del servicio, logrando una eficiencia en el espectro de forma transparente al usuario final, sin afectar la calidad del servicio.

1.11.2.3 Reducción en la velocidad de transferencia

Se basa en la selección de portadoras de anchos de banda diferentes que se seleccionan acorde a las condiciones del clima. Los planes nominales son seleccionados para una condición de cielo despejado en portadoras más grandes, mientras que las portadoras de menor tamaño son seleccionados para condiciones adversas, puesto que se requiere menor energía para operar.

1.11.3 Diversidad

El objetivo fundamental de la Diversidad es la de retransmitir la información por una nueva ruta para brindar un mismo servicio. Ésta puede darse mediante la duplicidad de terminal en el sitio remoto o estación terrena, mediante la utilización de dos satélites, y mediante la operación en dos frecuencias diferentes al mismo tiempo. Para fines de este trabajo, no consideraremos ninguna técnica de Diversidad puesto que adicionan un costo excesivo para la prestación de servicios de banda ancha de forma masiva, que en nuestro caso será a través de la Banda Ka.

1.12 Estándares utilizados en el mercado satelital.

1.12.1 Digital Video Broadcasting – Second Generation (DVB-S2)

En la actualidad la mayoría de sistemas destinados a brindar servicios de internet, utilizan el estándar DVB (Digital Video Broadcasting) de segunda generación, o también conocido como DVB-S2, un estándar abierto que permite ser utilizado en una gran variedad de aplicaciones por satélite y el cuál se caracteriza por lo siguiente [ETS13, DVB13]:

- Sistema de codificación FEC basada en LDPC (Low density parity Check) de forma concatenada con codificación BCH, la cual permite una operación casi libre de errores que van desde los 0.7 dB hasta 1 dB cerca al límite de Shannon, dependiendo del modo de transmisión.
- Rango amplio de tasas de código que van desde 1/4 hasta 9/10 (1/4, 1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9, 9/10). Además, dispone de 4 constelaciones de modulación disponibles: QPSK, 8 PSK, 16 APSK y 32 APSK que permiten una eficiencia espectral que puede llegar hasta 5 bit/Hz.

- Tres formas de espectro con factores de Roll-Off de 0.35, 0.25 y 0.20.
- Funcionalidad de Modulación y Codificación Adaptativa (o ACM, por sus siglas en inglés), para mejorar le eficiencia de cada enlace de forma individual frente a condiciones climáticas adversas como la lluvia.

En la Figura 09 se aprecian los niveles de eficiencia espectral que se pueden obtener por cada tipo de modulación disponible en el estándar DVB-S2.

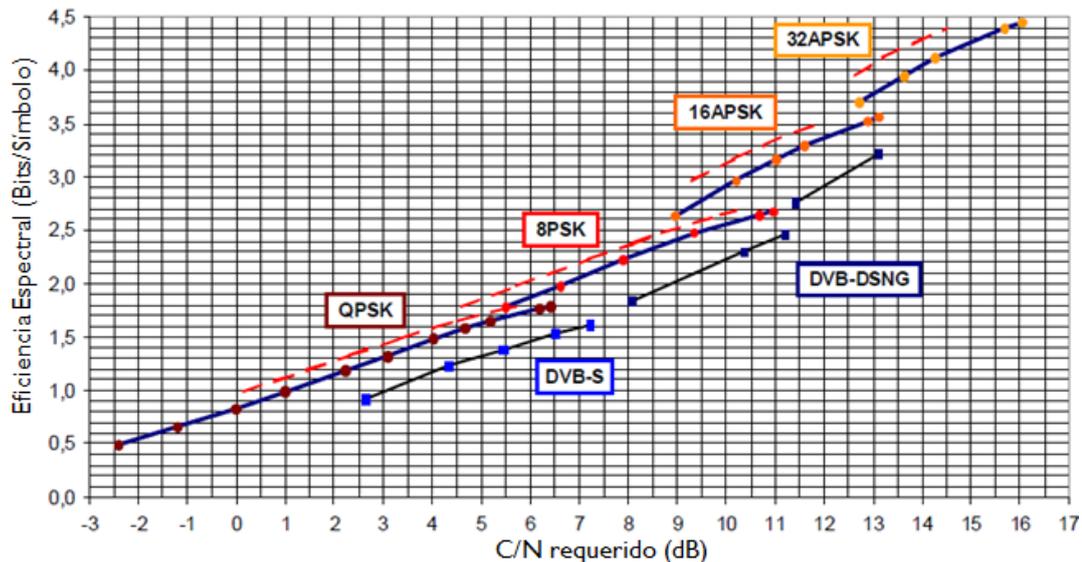


Figura 09: C/N requerido Vs Eficiencia espectral [ETS13]

1.12.2 Digital Video Broadcasting – Return Channel Satellite (DVB- RCS2)

Es un estándar abierto propuesto por la ETSI [ETS12, DVB12] que permite la comunicación satelital de dos vías, comúnmente utilizado en los fabricantes de tecnología satelital. Las características más relevantes son las siguientes:

- Opera con modulación y codificación adaptativa mediante MF-TDMA (Multi-Frequency Time Division Multiple Access) como tecnología de acceso al medio, para los enlaces de retorno.
- Soporta esquemas de modulación BPSK, QPSK, 8PSK, 16 QAM
- Soporta técnicas de codificación Convolutacional y Turbo-código de 8 estados.
- Los datos pueden ser encapsulados en paquetes fijos ATM o MPEG.

1.13 Cálculos de enlace

El cálculo de enlace satelital es un procedimiento matemático que tienen como finalidad la identificación de calidad de un canal de comunicación entre una estación remota y la estación terrena que lo abastece a través de un satélite.

Además suministra datos importantes para el dimensionamiento de los equipos de tierra necesarios para el despliegue de servicios finales. Intervienen varios factores importantes como las pérdidas de propagación y atenuación frente a los efectos del clima, como es el caso de la lluvia. A continuación describiremos cada los parámetros que se requieren para el desarrollo de los cálculos de enlace.

1.13.1 Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (PIRE)

La PIRE, Potencia Isotrópica Radiada Efectiva, es una medida que indica la fuerza con la que una señal es transmitida hacia un satélite o hacia una estación en tierra [PER04]. En [HER10] lo definen como una potencia de transmisión equivalente expresada mediante la siguiente ecuación:

$$PIRE_{TR} = G_{TX} + 10 \log P_{HPA} - L_{HPA} \quad dB \quad (1.1)$$

Dónde:

G_{TX} : Ganancia de antena del terminal remoto, en dBi

P_{HPA} : Potencia del HPA o BUC del terminal remoto.

L_{HPA} : Pérdidas en el tramo Antena – HPA, en dB.

En el caso de la PIRE de los satélites, se muestran en forma de huellas con diversas intensidades de potencia expresados en dBW, para la elaboración de cálculos de enlace.

1.13.2 Figura de Mérito (G/T)

Es un parámetro que indica la sensibilidad de recepción del sistema. Se define como la relación de la ganancia de la antena de recepción con respecto a la temperatura de ruido del sistema en recepción. Los fabricantes de satélites muestran los valores de G/T mediante gráficas de cobertura al igual que lo realizan con el PIRE, sus unidades se expresan en dB/K. La Figura 10 muestra un ejemplo de PIRE y G/T del satélite AMC-15:

En [RAM07] se muestra el cálculo de este valor para la estación terrena y el terminal remoto mediante la fórmula:

$$\frac{G}{T} = G_{RX} - 10 \log_{10}(T_s + \Delta T) \quad \frac{dB}{K} \quad (1.2)$$

Dónde:

$$\Delta T = 275 \left(1 - \text{antilog} \left(\frac{-A_{desc}}{10} \right) \right) \text{ } ^\circ K$$

A_{desc} : Es el margen de atenuación por lluvia del tramo Satélite – Vsat.

T_s : Es la temperatura en °K del sistema ($T_s = T_{LNA} + T_{ANTENA}$), la cual además se ve afectada por la frecuencia y el ángulo de elevación.

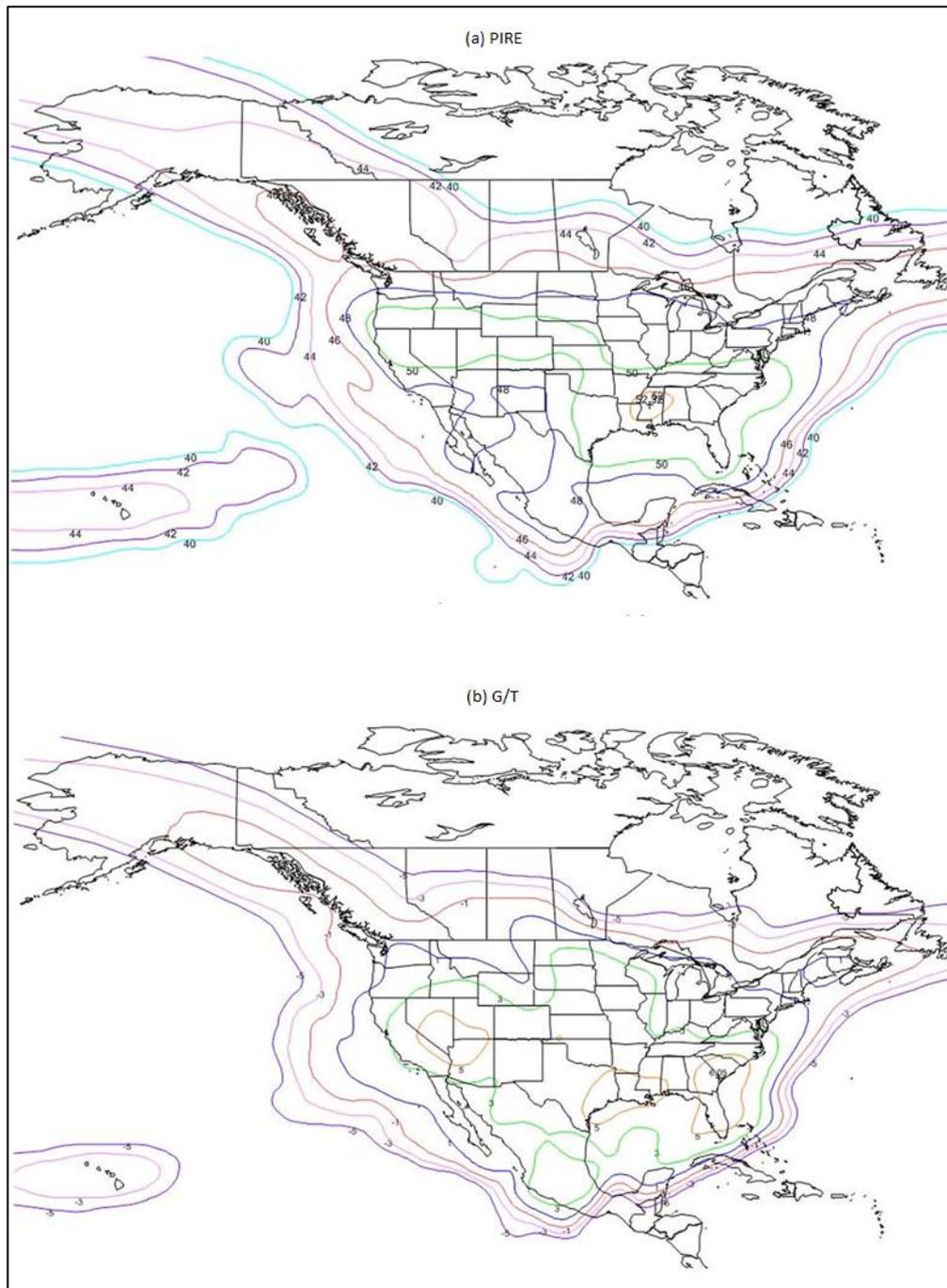


Figura 10: Footprint del Satélite AMC-15 en Banda Ku
(a) PIRE (b) Figura de mérito G/T

Fuente: www.futaris.com

1.13.3 Ancho de banda de una señal digital

Es el ancho de banda en Hertz que ocupa determinada portadora considerando una modulación y codificación específica, se calcula mediante la siguiente ecuación [RAM07]:

$$BW_{KHz} = \frac{\text{Bitrate} (1 + \text{Rolloff})}{(\text{FEC})(I_m)} \times K_{Ext} \text{ KHz} \quad (1.3)$$

Dónde:

Bitrate : Es la velocidad de información en Kbps.

I_m : Índice de modulación.

Rolloff : Es el factor de expansión del espectro debido a la respuesta de los filtros del módem. Para nuestro cálculo utilizaremos el valor de 0.2 para todos los casos.

FEC : Es la relación entre la cantidad de Bits de información respecto a la cantidad total de Bits transmitidos, incluyendo los de corrección de errores.

K_{Ext} : Es el valor de otras codificaciones adicionales (como BCH) y cuyos valores difieren entre diversos fabricantes de tecnología terrestre. Para nuestro análisis, consideraremos $K_{Ext} = 1$.

1.13.4 Distancia entre la estación terrena y el satélite

Es la separación que existe entre la estación terrena o terminal remoto y el satélite, se calcula como sigue [RAM07]:

$$D = \left(R_t^2 + D_{t-s}^2 - 2R_t D_{t-s} \sin \left[\theta + \sin^{-1} \frac{D_{t-s}}{R_t} \cos \theta \right] \right)^{1/2} \text{ Km} \quad (1.4)$$

Dónde:

D_{t-s} : Distancia entre el centro de la tierra y el satélite, 42164 Km según [TOM3].

R_t : Radio promedio de la tierra, 6278 Km según [TOM03].

θ : Ángulo de elevación

1.13.5 Pérdidas de espacio Libre

El espacio libre es un medio homogéneo libre de corrientes y cargas eléctricas, por lo tanto, libre de pérdidas por efecto Joule, en el cual las ondas de radio viajan en línea recta y sin atenuación [HER10], por lo que su cálculo dependerá de la distancia entre los cuerpos y la frecuencia de operación [ROS08].

La ecuación convencional de la pérdida de espacio libre está dada por la expresión

$$L_{EL} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$$

Si despejamos el valor de la longitud de onda, λ , en función de la frecuencia, y convertimos la expresión en decibels tenemos:

$$L_{EL} (dB) = 20 \log_{10} F + 20 \log_{10} D + 92.45 \quad (1.5)$$

Dónde:

F: Frecuencia de operación en GHz

D: Distancia de la estación terrena hasta el satélite en Km.

1.13.6 Pérdidas por dispersión

Es la degradación de potencia por unidad de área de la señal. Su cálculo se da mediante la siguiente fórmula [RAM07]:

$$L_{disp} = 10 \log(4 \pi D^2) \quad (1.6)$$

Dónde:

D: Distancia de la estación terrena hasta el satélite en Km.

1.13.7 Cálculo de PIRE de la estación terrena

La densidad de flujo de saturación (SFD), es el valor de la densidad de flujo de potencia de una sola portadora, recibida en la antena de un satélite [ROS08], que produce la saturación a la salida de un transpondedor. La intensidad de flujo de potencia, ϕ , está determinada por:

$$\phi = \frac{PIRE_{ET}}{4\pi d^2} = \frac{PIRE_{ET}}{L_{EL\ ASC}} \frac{4\pi}{\lambda^2}$$

Expresando en decibels queda como sigue,

$$\phi = PIRE_{ET} - L_{EL\ ASC} + 20 \log f + 21.46$$

Donde $4\pi/\lambda^2 = 20 \log f + 21.46$ en dB, estando λ en metros y f en GHz. Si consideramos que $\phi = SFD$ tenemos que la PIRE máxima que puede emitir la estación terrena estará determinada mediante la siguiente ecuación:

$$PIRE_{ET} (dB) = SFD + L_{EL\ ASC} - 20 \log F - 21.46 \quad (1.7)$$

Dónde:

SFD : Densidad de flujo de saturación del satélite

$L_{EL\ ASC}$: Es el valor de la pérdida de espacio libre en el tramo ascendente.

F : Frecuencia de operación en GHz.

1.13.8 Relación de portadora a densidad de potencia de ruido (C/No)

Es la relación de la potencia promedio de portadora de banda ancha a densidad de ruido. La potencia de portadora de banda ancha es la potencia combinada de la portadora y sus bandas laterales asociadas. La densidad de ruido es el ruido térmico presente en un ancho de banda normalizado de 1 Hz [TOM03], se expresa en dB/Hz mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{C}{N_o} = PIRE + G/T - K - L_{EL} - A - L\Delta \quad (dB - Hz) \quad (1.8)$$

Dónde:

$PIRE$: PIRE de la estación terrena, terminal remoto o satélite dependerá el tramo a calcular.

G/T : Figura de mérito de la estación terrena, terminal remoto o satélite dependerá el tramo a calcular.

K : Constante de Boltzman (-228.6 dBJ/K).

L_{EL} : Pérdidas de espacio libre del enlace a calcular.

A : Margen de atenuación por lluvia.

$L\Delta$: Sumatoria de pérdidas adicionales en el sistema. Perdidas por absorción atmosférica, pérdidas por apuntamiento, pérdidas por el polarizador y feeder.

1.13.9 Relación de portadora a ruido (C/N)

Relación de la potencia de una portadora digital con respecto a la potencia de ruido en el ancho de banda ocupado por la portadora, se expresa en dB. Considerando el tramo ascendente o descendente podemos calcularlo mediante la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{Asc/Desc} = \left(\frac{C}{N_o}\right)_{Asc/Desc} - 10 \log BW_{hz} \quad dB \quad (1.9)$$

La relación C/N total del enlace depende de las correspondientes al enlace ascendente o descendente, a la introducida por la intermodulación, polarización cruzada y a la interferencia de otros sistemas en tierra y espacio. Salvo la interferencia que puedan ocasionar las redes terrenales, en los sistemas geoestacionarios generalmente la mayor interferencia proviene de los satélites adyacentes, si emplean las mismas bandas de frecuencias, lo cual incide en mayor medida mientras menor sea la separación orbital [ROS08]. El valor se obtiene de la ecuación:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{Total\ Asc/Desc}^{-1} = \left(\frac{C}{N}\right)_{Asc/desc}^{-1} + \left(\frac{C}{I}\right)_{Sat\ Ady}^{-1} + \left(\frac{C}{I}\right)_{Im}^{-1} + \left(\frac{C}{I}\right)_{Xpol}^{-1} + \left(\frac{C}{I}\right)_{Ant\ Ady}^{-1} \quad (1.10)$$

Dónde:

$\left(\frac{C}{I}\right)_{Sat\ Ady}$: Relación de señal interferencia por satélite adyacente.

$\left(\frac{C}{I}\right)_{Im}$: Relación de señal interferencia por intermodulación.

$\left(\frac{C}{I}\right)_{Xpol}$: Relación de señal interferencia por polarización cruzada.

$\left(\frac{C}{I}\right)_{Ant\ ady}$: Relación de señal interferencia por antena adyacente en tierra

No consideraremos la relación de señal interferencia por antena adyacente en tierra $(C/I)_{Ant\ ady}$, puesto que asumimos que la estación terrena no tendrá cerca una antena que transmita en la misma frecuencia. La ecuación anterior debe calcularse empleando los valores de las relaciones directas individuales (no en dB), en [ROS08] se otorga mayor detalle de su cálculo.

1.13.10 Relación de portadora a densidad de ruido total del sistema

Es el valor de la potencia de la portadora en relación al ruido total del sistema tanto saliente (outbound) como entrante (Inbound), se calcula de la siguiente manera:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{Total\ Sistema} = 10 \log \left[\frac{1}{\frac{1}{\text{antiLog}\left(\frac{C/N_{ASC}}{10}\right)} + \frac{1}{\text{antiLog}\left(\frac{C/N_{DESC}}{10}\right)}} \right] \text{ dB} \quad (1.11)$$

1.13.11 Relación de energía de bit a densidad de ruido E_b/N_o

Es un parámetro muy importante para evaluar un sistema digital. La relación E_b/N_o ayuda a comparar sistemas digitales que usan diversas frecuencias de transmisión, esquemas de modulación o codificación, su definición matemática es como sigue [TOM03].

$$\frac{E_b}{N_o} = \left(\frac{C}{N}\right)_{Req} \frac{BW_{KHz}}{Bitrate} \quad (1.12)$$

En dB,

$$\frac{E_b}{N_o} (dB) = \left(\frac{C}{N}\right)_{Req} + 10 \log(BW_{KHz}) - 10 \log(Bitrate) \quad (1.13)$$

Dónde:

C/N_{Req} : Relación de portadora a ruido requerido

Bitrate : Es la velocidad de información en Kbps

BW_{KHz} : Ancho de banda de la portadora en KHz

1.13.12 Relación de energía de símbolo a densidad de ruido E_s/N_o

Se usa frecuentemente en comunicaciones digitales, tiene relación directa con el valor de E_b/N_o puesto que este valor es la medida normalizada del E_s/N_o a una modulación específica. Se mide a la entrada del demodulador y se expresa como sigue:

$$\frac{E_s}{N_o} = \frac{E_b}{N_o} \log_2 m \quad (1.14)$$

Dónde:

m : es el número de símbolos en una determinada modulación digital. Es decir, $\log_2 m$ es el número de bits por símbolo.

Reemplazando en (1.12) tenemos,

$$\frac{E_s}{N_o} = \left(\frac{C}{N}\right)_{Req} \frac{BW_{KHz}}{Symbolrate}$$

En dB,

$$\frac{E_s}{N_o} (dB) = \left(\frac{C}{N}\right)_{Req} + 10 \log(BW_{KHz}) - 10 \log(Symbolrate) \quad (1.15)$$

Dónde:

Symbol rate : Es la tasa de símbolos o símbolos por segundo.

En el Capítulo IV se desarrollarán los cálculos de enlace para cada una de las capitales de departamento del Perú.

CAPITULO II: ANALISIS COMPARATIVO DE LOS HTS DE BANDA KA CON LOS SATELITES CONVENCIONALES

El presente capítulo muestra una visión general de los satélites geoestacionarios de alto rendimiento en Banda Ka para servicios fijos por satélite (SFS), también conocidos como High Throughput Satellites (HTS), en comparación con los satélites convencionales actuales. Se muestra la situación actual del mercado, así como la creciente demanda de los servicios fijos de banda ancha satelital. En otras secciones se detallarán los rangos de frecuencia de Banda Ka disponibles, así como las características técnicas más relevantes en estos sistemas, frente a los satélites convencionales, tales como: eficiencia, cobertura, atenuación, ganancia de antena, pérdidas de espacio libre, y la técnica de reuso de frecuencias de la cual se brindará mayor detalle.

2.1 Situación actual del mercado satelital

El creciente interés por los servicios de Banda ancha satelital a nivel mundial ha incrementado la necesidad de encontrar soluciones que permitan cubrir dicha

demanda. En el 2012 la cantidad de subscriptores de servicios satelitales superaron los 1.5 millones, en su mayoría demandados desde Norteamérica. Al 2016 se espera que la demanda total se duplique mientras que para el 2020 se estima llegar a 5.8 millones de subscriptores, ver Figura 11. Este incremento está ligado principalmente al crecimiento conjunto de demanda en Europa, Norteamérica y Latinoamérica [NSR12], por servicios de banda ancha en zonas donde aún no se logra cubrir con tecnologías terrestres.

Por otro lado, es cada vez es más difícil encontrar posiciones orbitales para Satélites Geoestacionarios. Hoy en día las posiciones que están sobre las poblaciones más densas se encuentran agotadas, y los nuevos lanzamientos de satélites en Bandas C, Ku y que incluyen Ka, corresponden al reemplazo de los que se encuentran actualmente en órbita debido al término de su vida útil, que en la mayoría de casos es de 15 años.

La orientación actual en la fabricación de los nuevos satélites se basa en el uso de la Banda Ka, ya que al operar con un rango de frecuencia más amplia y mayor a la de las Bandas C y Ku, permite diseñar satélites con capacidades muy superiores a los convencionales. El concepto de los satélites de alto rendimiento aún no está definido, sin embargo desde nuestro punto de vista lo definiremos como satélites que cuentan con una capacidad de por lo menos 20 veces más que la de un satélite convencional, es decir mayor a 40 Gbps en promedio.

De forma curiosa, la primera generación de HTS de órbita geoestacionaria se inició en Banda Ku en el año 2005 para cubrir Asia-Pacífico, con el lanzamiento del Thaicom-4 (operado por IPSTAR), el cual es el único satélite en Banda Ku que cuenta con 84 spots beams y una capacidad total de 45 Gbps. Más adelante utilizando espectro de Banda Ka, Europa hizo lo suyo con el satélite Kasat, lanzado por Eutelsat en el año 2010 con una capacidad de 70 Gbps. En Estados Unidos, la compañía Wildblue, adquirida por Viasat INC, se puso en carrera con el satélite ViaSat-1, lanzado en el 2011 con una capacidad de más de 140 Gbps, mediante 72 spots beams suministrados por 20 Gateways y cuya localización se encuentra fuera de la cobertura de los beams. Hughes Communications por su lado lanzó en el 2012 el segundo HTS en USA llamado Jupiter-1, cuya capacidad supera los 100 Gbps, mediante 60 Spots beams de 750 MHz abastecidos desde 15 Gateways. Otros satélites con capacidades menores a 10 Gbps fueron precedentes en varios

países como USA, Nigeria, Japón entre otros y cuya base sirvió para el diseño de los actuales HTS.

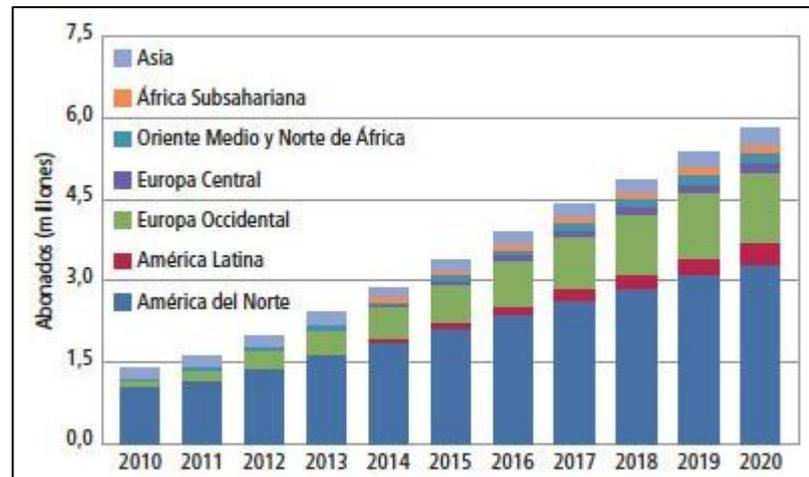


Figura 11: Demanda de accesos de banda ancha satelital [NSR12]

Cabe resaltar que los operadores satelitales están incluyendo cobertura de Banda Ka en los nuevos lanzamientos que sirven de reemplazo a los actualmente en órbita. Tal es el caso del satélite Amazonas-3 operado por Hispasat, el cual se puso en órbita en Mayo del 2013 en reemplazo del Amazonas-1 y cuya nueva capacidad adiciona nueve spots beams de Banda Ka en varios países de Sudamérica, de 900 Mhz y 500Km de diámetro cada uno.

Existen otras iniciativas importantes para el despliegue de servicios de banda ancha satelital en órbita geostacionaria para los próximos años, entre ellos se encuentran los proyectos de NBN Co del Gobierno Australiano con dos satélites para el 2014, Global Xpress cuya flota de tres satélites serán operados por Inmarsat a partir del 2014, Hylas-3 de la compañía Avanti cuyo lanzamiento se estima hacia el año 2015, EPIC-NG de Intelsat y el satélite D1 de Embratel, operado por StarOne, estos últimos con lanzamiento previsto en el año 2016.

Por otro lado, en [STN12] se comenta que la empresa O3B se encuentra en pleno despliegue de una constelación de 8 satélites de órbita media con cobertura en diversas ciudades del mundo. Los satélites cuentan con 12 beams, dos se utilizarán para comunicación con el Gateway y los restantes diez serán para fines comerciales. Cada beam tiene una capacidad 216 MHz de subida y 216 MHz de bajada lo que permite una capacidad por beam hasta 1.2 Gbps en lugares secos, y 84 Gbps en toda la constelación. En Junio del 2013 se realizó el lanzamiento de los

4 primeros satélites, y se espera que el primer trimestre del 2014 se realice el lanzamiento de los restantes. El objetivo fundamental de este proyecto es el de brindar servicios de Backhaul celular para 3G, 4G/LTE y de enlaces dedicados de capacidades de hasta 1 Gbps. A diferencia de los satélites geoestacionarios, las terminales de seguimiento doble que se requiere, limitará su aplicabilidad a servicios para usuarios finales debido al incremento de costos en la terminal.

2.2 Disponibilidad espectral de la Banda Ka

El rango de frecuencias disponible para Servicios Fijos por Satélite (SFS) de Banda Ka, se encuentra entre 17.3 y 31 GHz, ver Tabla 2. Si bien la Banda Ka tiene un rango espectral bastante amplio comparado con las Bandas C y Ku, es sumamente importante hacer una buena distribución y buen uso del espectro radioeléctrico, a fin de hacer eficiente la prestación de servicios satelitales en esta nueva generación, en la que se requiere grandes capacidades de Gbps. En [CHR12], se realiza una división del rango total y se hace una clasificación en cinco subdivisiones, las cuales se aprecian con detalles en la Figura 12.

2.2.1 Bandas identificadas para servicios fijos

Basado en la recomendación ITU 5.516B mostrada en [ITU03], se tiene que el rango de 29.5 – 30 GHz (500 MHz) es utilizable en las tres regiones de la ITU para el enlace ascendente (Uplink) y 19.7 – 20.2 GHz (500 MHz) para el enlace descendente (Downlink), ambos rangos son ideales para los enlaces hacia los terminales. Por otro lado el rango de 17.3 – 17.7 GHz (400 MHz) es utilizable únicamente en la Región 1 para enlaces de conexión descendentes de SFS y el rango 18.3 – 19.3 GHz (1 GHz) es utilizable sólo para la Región 2 de la ITU.

2.2.2 Bandas utilizadas por varias administraciones

Se tiene disponible el rango de 27.5 – 28.6 GHz para el enlace ascendente y el rango 17.7 – 18.8 GHz para el enlace descendente en las tres regiones de la ITU. La utilización de estos rangos está supeditada a la administración de cada país, donde se puede conseguir autorización para brindar Servicios de Distribución Local Multipunto (SDLM), la cual no es posible compartir con SFS de alta capacidad. Por ejemplo, en Estados Unidos sólo está disponible el rango de 28.1 - 28.6 GHz y 18.3 – 18.8 GHz (500 MHz en ambos sentidos), ya que los primeros 600 MHz están destinados a SDLM. Son los casos que tuvieron que afrontar los satélites ViaSat-1 y Jupiter-1.

2.2.3 Bandas con los mismos derechos para satélites GEO y NO-GEO

En éstas Bandas pueden darse servicios de orbita GEO y NO-GEO de forma coordinada sin causar interferencias perjudiciales el uno al otro. El rango disponible de 900 MHz entre 18.8 – 19.7 GHz y 28.6 – 29.5 GHz pueden ser utilizados por SFS GEO en las 3 regiones ITU, previas coordinaciones con redes NO-GEO que están en proceso de lanzamiento o que se encuentren en órbita. Las redes Iridium y O3B hacen uso de este espectro en órbita NO-GEO.

2.2.4 Bandas donde se aplica Densidad de Flujo de Potencia Equivalente

Los límites de Densidad de Flujo de Potencia Equivalente (DFPE) definen la interferencia máxima admisible que los sistemas NO-GEO pueden causar a las redes GEO, permitiendo el reúso de frecuencias en constelaciones NO-GEO. Estos rangos se aprecian en la Figura 12.

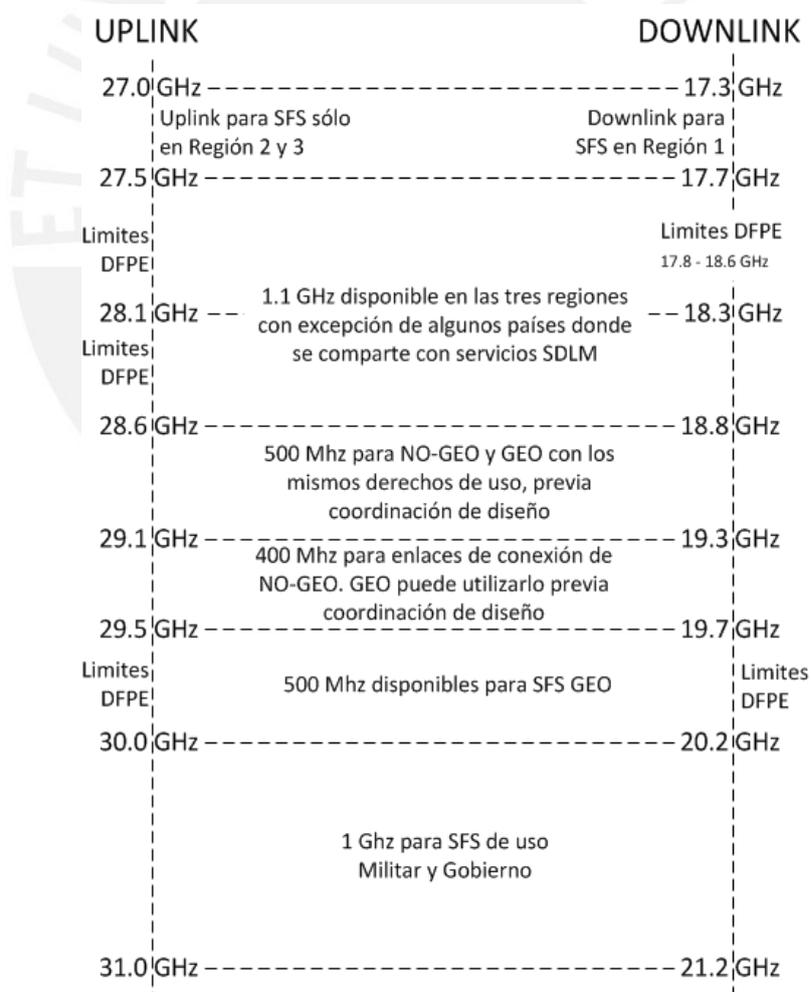


Figura 12: Asignación de frecuencias de Banda Ka para redes de comunicaciones por satélite (Elaboración Propia en base a [CHR12])

2.2.5 Bandas de uso militar

Son los rangos destinados a servicios militares y de gobierno además de servicios comerciales con destino militar, hay excepción en algunos países donde no se permite el uso comercial. Este rango se encuentra en los 30 – 31 GHz para los enlaces ascendentes y 20.2 – 21.2 GHz para los enlaces descendentes. La red Global Express de Inmarsat está diseñada para operar en este rango de forma comercial.

Este amplio rango de frecuencias hace posible la fabricación HTS mediante el reuso de frecuencias sin perjudicar cobertura. Pero ¿Cómo se realiza el reuso de frecuencias?, el proceso es muy similar al diseño de celdas celulares, mediante una arquitectura basada en múltiples Spots Beams.

2.3 Técnica de reuso de frecuencias

La técnica de Reuso de Frecuencias hace posible la utilización de uno o más rangos de frecuencias por una cantidad ilimitada de veces, las limitaciones se encuentran en las características físicas del satélite como el peso, tamaño, precisión del haz y aislamiento entre beams [VID12], puesto que éstas variables intervienen directamente en la complejidad de fabricación.

Existen diversos patrones que pueden ser utilizados para efectuar el reuso de frecuencias, de los cuáles los patrones de 3 o 4 colores son los más comunes. El patrón de 3 colores tiene algunos problemas de interferencia cuando los haces o beams son muy pequeños, además de la complejidad de diseño de la carga útil del satélite puesto que la distancia entre beams del mismo tipo es asimétrica. En [VID12], [PIT12] y [FEN12] se muestra el patrón de 4 colores que también tiene cierta interferencia entre beams sin embargo este patrón mantiene una distancia simétrica entre beams del mismo patrón, lo cual hace menos complejo el diseño del satélite, ver Figura 13.

Existen otros patrones de 6,7 ó 12 colores que existen en redes móviles terrestres y que podrían ser utilizados para reducir la interferencia entre haces, sin embargo esto reduciría la capacidad puesto que se debe asignar un menor espectro por patrón y no haría eficiente el espectro satelital, que de por sí es escaso. En cualquiera de los casos, los fabricantes de satélites deben tener mucho cuidado con el diseño de los reflectores cuando involucren características como la forma de haz, los lóbulos laterales y sobre todo la precisión en el apuntamiento del beam, sin

duda la adición de otras técnicas de mitigación de interferencias contribuyen a la mejora del sistema.

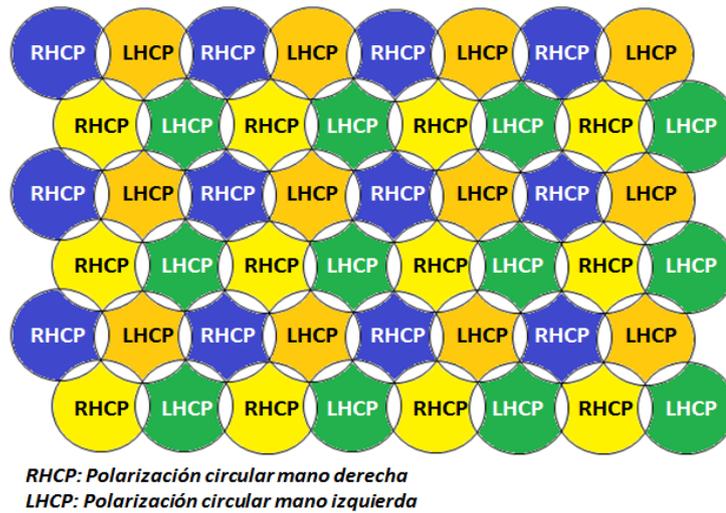


Figura 13: Plan de frecuencias con un patrón de 4 colores y un reuso de frecuencia/polaridad por 12 veces (Elaboración propia)

Realizar una correcta planificación de reuso del espectro contribuye al dimensionamiento de un número eficiente de estaciones terrenas o gateways (GW), de manera que menos GW den servicio a la mayor cantidad de beams. Claro está que se debe considerar en esta planificación todas las restricciones regulatorias internacionales y por país para la definición de la ubicación de los GW. Como ejemplo, en la Figura 14 se muestra el caso del satélite Kasat de Eutelsat, cuyo lanzamiento se realizó en diciembre del 2010, con una capacidad de 70Gbps mediante 82 spot beams de aproximadamente 250Km de radio, abastecidos desde 10 Gateways ubicados en distintos países del continente Europeo.

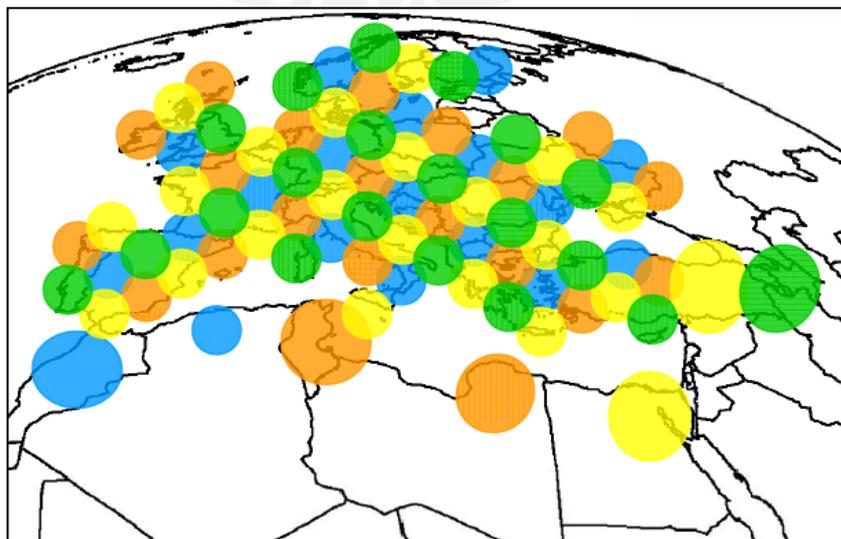


Figura 14: Cobertura del Satélite Kasat de Eutelsat, con patrón de cuatro colores [BAU11].

Los diseñadores de este satélite utilizaron un patrón de cuatro colores para las frecuencias destinadas en los beams de usuarios. Para el Uplink se utilizó el rango entre 29.5 – 30 GHz, mientras que para el Downlink se utilizó el rango entre 19.7 - 20.2 GHz, en ambos casos se utilizan polarización circular izquierda y derecha, dando como resultado cuatro patrones con una capacidad de 237.5 MHz por beam en ambos sentidos (subida y bajada), distanciados en 25 MHz entre beams para evitar interferencias.

En el caso del satélite Kasat, se hace un reuso o repetición de cada patrón por al menos 20 veces. Las frecuencias utilizadas para la conexión con los Gateways se encuentran en el rango de 28 – 29.5 GHz para el Uplink y 18.4 – 19.7 GHz para el Downlink, los enlaces también tienen una capacidad de 237.5 MHz distantes en 25 MHz y en algunos casos en 12.5 MHz haciendo un total de 10 enlaces considerando ambas polaridades, ver Figura 17.

2.4 Arquitectura del sistema satelital de Banda Ka

La arquitectura de los servicios basados en la técnica de reuso de frecuencias está compuesta por el satélite, estación remota y los Gateways o estaciones terrenas.

2.4.1 Satélite

Su composición es similar a la de los satélites convencionales, con la diferencia que está compuesta por una cantidad de reflectores igual al número de patrones que se utilizan para el reuso de frecuencias. En la mayoría de casos son 04 reflectores como se aprecia en la Figura 15, de los cuáles se diseñan un aproximado de 20 haces puntuales (o beams) por cada reflector.

2.4.2 Gateway

Quizá sea la característica más importante de la arquitectura de tierra, puesto que se requiere más de un Gateway para abastecer de servicio a toda la cobertura del satélite. A diferencia del arreglo convencional de Banda C y Ku, es común que el Gateway se encuentre ubicado fuera de la cobertura de servicios, es decir el satélite tiene un haz exclusivo para los enlaces de conexión y otros para uso comercial.

La cantidad de Gateways necesarios para abastecer a toda la cobertura del satélite dependerá del arreglo que beams que se haga sobre el espectro disponible para los

enlaces de conexión, por ejemplo si se dispone de un espectro de 1.5 GHz (18.2 – 19.7 GHz para en enlace descendente; 28 – 29.5 GHz para el enlace ascendente) y se realiza un arreglo de 5 Beams de 300 MHz, entonces podemos tener un máximo de 10 Beams por Gateway, 5 por cada polaridad, como referencia podemos apreciar la Figura 17 correspondiente al arreglo de del satélite Kasat. Los Gateways no necesariamente deben abastecer a beams de un mismo patrón.

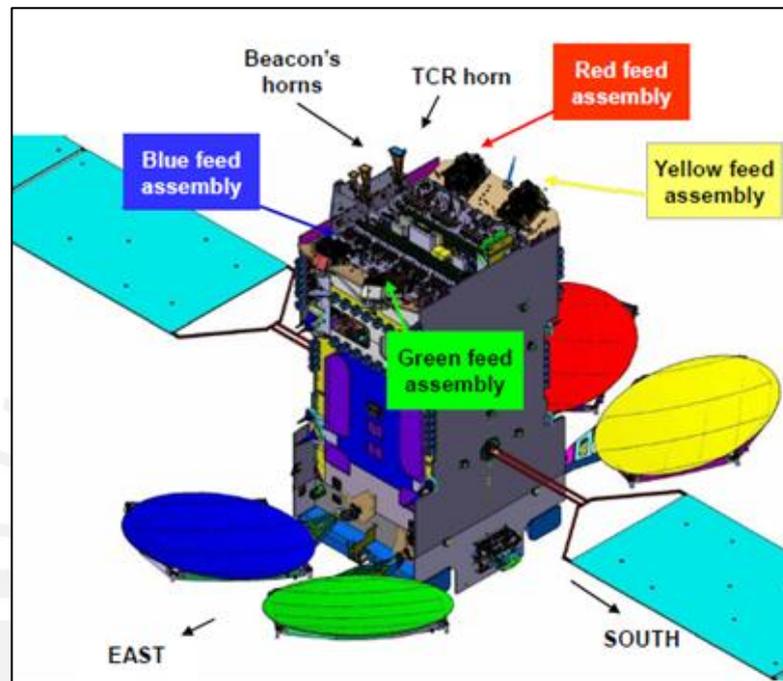


Figura 15: Satélite con un arreglo de reflectores de 4 colores [GUE12]

2.4.3 Estación remota

Está compuesta por una parte interior (Indoor), compuesto por el módem, y una parte exterior (Outdoor), compuesta por la antena y los equipos de transmisión/recepción. A diferencia de otras bandas, la antena es de menor tamaño debido al margen de ganancia que se logra, y que se describirá en los próximos apartados.

En la Figura 16, apreciamos con mayor detalle la topología de los subsistemas descritos en los párrafos precedentes.

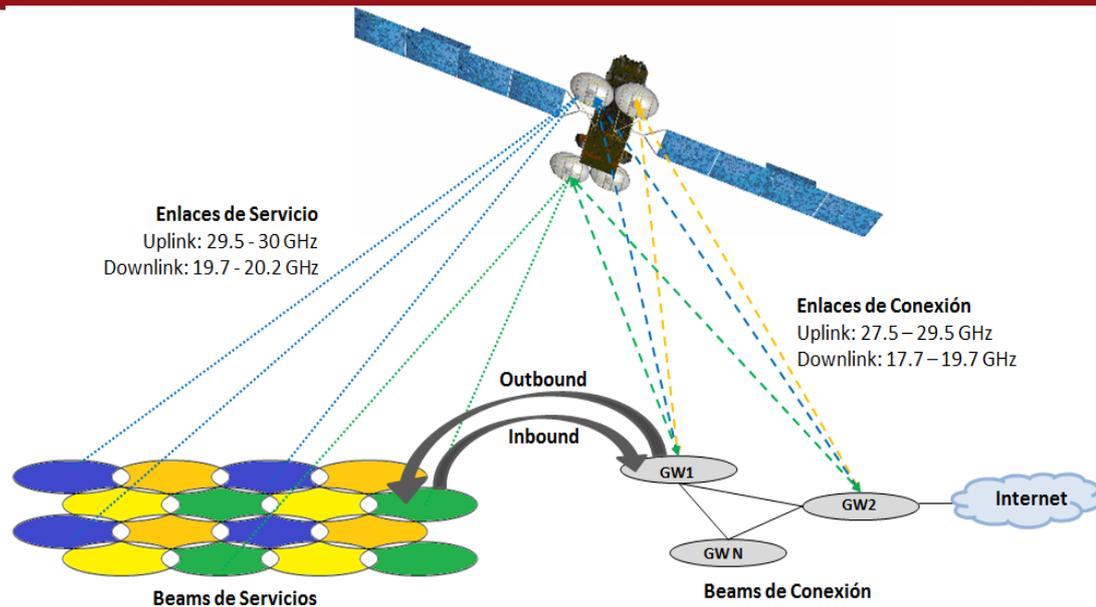


Figura 16: Topología de una red de Banda Ka con reuso de frecuencias (Elaboración propia)

2.5 Análisis comparativo frente a los satélites convencionales

Es cada vez más común que los satélites geoestacionarios utilicen la Banda Ka para fabricar HTS, esto trae una serie de características diferenciadas frente a los satélites convencionales, los cuáles describiremos a continuación.

2.5.1 Disponibilidad de frecuencia

La principal ventaja de la Banda Ka viene dada por la naturaleza del espectro que está disponible, la Banda Ku apenas tiene un rango de frecuencias de 6 GHz (12 - 18 GHz) a diferencia de la Banda Ka que dispone de 18 GHz (22 - 40 GHz), el triple de capacidad.

Si bien no toda la capacidad está disponible para ser utilizados por satélites geoestacionarios y servicios fijos por satélite, el rango disponible en Banda Ka para brindar servicios comerciales de uso doméstico y empresarial es de 2.5 GHz (27.5 - 30.0 GHz es el rango comúnmente utilizado) en dos polaridades, más de tres veces frente a los 750 MHz (13.75 - 14.5 GHz) disponibles en la Banda Ku y Ku extendido [HET13]. Esta diferencia hace posible que se pueda realizar un reuso de frecuencias sin sacrificar capacidad.

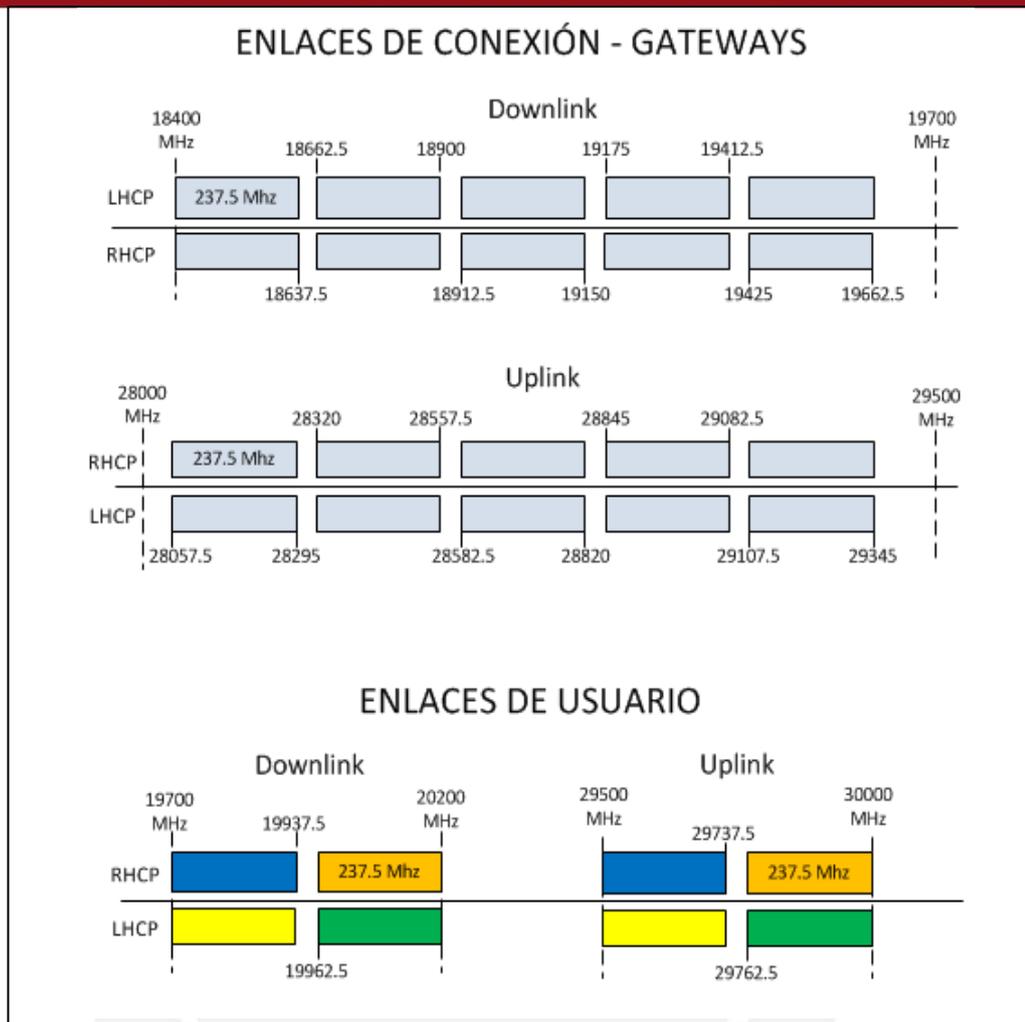


Figura 17: Plan de frecuencias de conexión y usuario del satélite Kasat [ALT13]

2.5.2 Cobertura

El reúso de frecuencias permite diseñar beams de menores áreas, alrededor de 500Km de diámetro, sin perjudicar la cobertura y capacidad total del satélite. Es posible reutilizar la frecuencia por una cantidad de veces que te permitan cubrir un continente por completo o inclusive mucho más, la limitante se encuentra en la fabricación del satélite, puesto que se tendrá un mayor costo en la carga útil y en el lanzamiento. Si bien este método también es aplicable a los satélites de otras bandas, la limitante del espectro satelital reduce la capacidad en MHz que se puede lograr por cada beam.

2.5.3 Ganancia de antena y PIRE

Respecto a los reflectores del satélite podemos precisar que para lograr spot beams focalizados se debe tener un reflector muy directivo y con gran ganancia, la cual se logra con un ancho de haz por beam de 0.5° o menos [SCH11], y sobre todo con

reflectores de mayor tamaño, puesto que la ganancia (G) se define en función del diámetro de la antena (d) y de la longitud de onda (λ) de la banda de operación, ver la siguiente fórmula donde η es la eficiencia de antena.

$$G(\text{dBi}) = 10 \text{ Log} \left[\eta \left(\frac{\pi d}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (2.1)$$

A consecuencia de esta mayor ganancia, los satélites de Banda Ka disponen de una PIRE en el orden de los 62 dBW, muy superior a los satélites convencionales en Banda Ku que pueden llegar hasta 52 dBW aproximadamente.

Por otro lado, los costos en la fabricación del satélite se ven incrementados puesto que tienen mayor carga útil y por ende un mayor costo de lanzamiento, sin embargo el retorno de inversión se plasma en la capacidad en MHz y la eficiencia bit/Hz que se puede lograr.

En cuanto a las antenas de usuario, por el contrario, para obtener la misma ganancia de transmisión que en antenas de Banda Ku (alrededor de 43 dBi) se requiere un diámetro de antena más pequeño debido a la reducción natural de la longitud de onda y del mayor PIRE que se recibe del satélite, ver Figura 18. Esto se traduce en una reducción de costos significativa para el usuario final [NEW12].

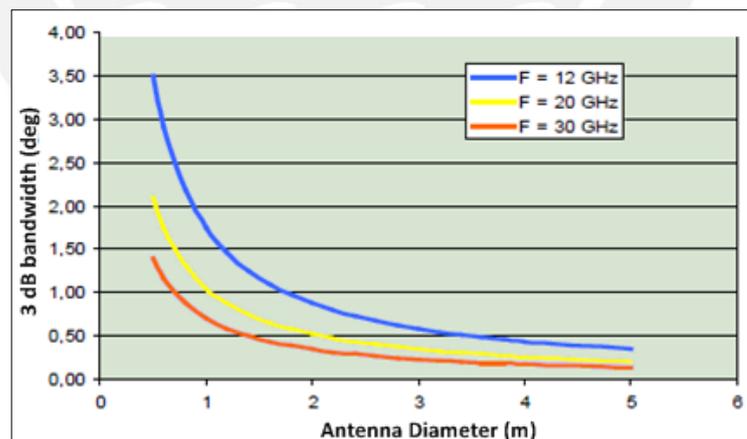


Figura 18: Ganancia de antena de usuario Vs tamaño de antena [WIN12]

2.5.4 Eficiencia

Un mejor PIRE del satélite hace posible la utilización de modulaciones más eficientes que permiten llegar hasta 32 APSK en el enlace saliente de la estación terrena, a diferencia de los satélites convencionales de Banda Ku con cobertura regional en la que se logra alcanzar hasta una modulación de 16 APSK en un

reducido porcentaje de terminales. De esta manera los HTS pueden lograr eficiencias mayores a 2Bit/Hz en el enlace de bajada. Esta reducción de espectro satelital también se traslada al usuario final en menores costos por servicio.

2.5.5 Posición orbital geoestacionaria

Como ya sabemos las posiciones de orbita geoestacionarias están siendo cada vez más escasos, los pocos satélites que se están lanzando en su mayoría tienen como objetivo reemplazar a otros sobre la misma posición orbital.

La fabricación de HTS con arreglos de spots beams focalizados permiten tener mayor ganancia y un patrón de radiación más directivo sobre la tierra, lo cual hace más eficiente la utilización del espacio orbital logrando menores interferencias que permiten colocar satélites con una separación radial de hasta un grado.

2.5.6 Pérdidas de espacio libre

La pérdida de espacio libre se determina a partir de la frecuencia y la distancia de los cuerpos hacia la tierra, ver ecuación (1.5). La Banda Ka, en comparación de las otras bandas, tiene una mayor pérdida al operar en un rango de frecuencia más alta. Considerando un análisis sobre satélites GEO, donde la distancia Satélite – Tierra es de alrededor de 36,000 Km, obtenemos una pérdida de 207 dB para la transmisión en Banda Ku (14 GHz) y de 213 dB sobre Banda Ka (30 GHz). Es una diferencia considerable, sin embargo ésta es compensada con la ganancia de los reflectores de Banda Ka [HET13].

2.5.7 Atenuación frente a efectos del clima

Otra consecuencia también asociada a la frecuencia de operación, es la alta vulnerabilidad frente a efectos climatológicos, específicamente por las lluvias. La atenuación por lluvia aumenta de forma drástica a medida que aumentamos la frecuencia. La Figura 19 muestra una comparación con varios tipos de intensidad de lluvia a diferentes frecuencias [MIL07], en ella apreciamos que la atenuación en el rango de los 30 GHz (Transmisión en Banda Ka) es más del doble frente a la atenuación del rango de 14 GHz (transmisión en Banda Ku) cuando la intensidad de lluvia llega a 25mm/h, y se acentúa aún más cuando la intensidad de precipitación es más alta, es el caso de algunas países amazónicos como Brasil.

Existen técnicas de mitigación ante efectos climatológicos tales como la modulación y codificación adaptativa, ajustes de potencia automático, entre otros, que si bien

ayudan a reducir el impacto en el enlace, no es suficiente cuando se trata de transmitir información con alto grado de prioridad.

En principio el enfoque de aplicación de estos HTS se está dando para la prestación de servicios de internet de banda ancha, ya que la pérdida de algunos paquetes en una transferencia de datos no es tan crítica como en la transmisión de video digital o voz. A pesar de ello, diversos operadores ya se encuentran realizando pruebas sobre redes empresariales y backhaul celular en Europa y Norteamérica.

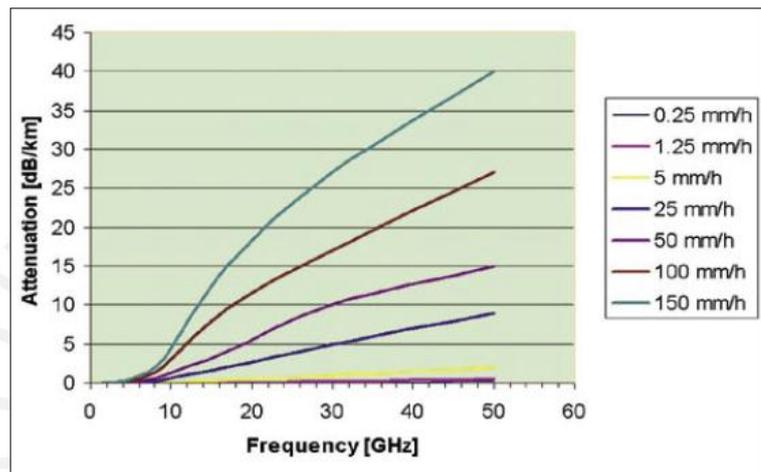


Figura 19: Atenuación por lluvia en función de la frecuencia y la intensidad de lluvias [MIL07]

2.5.8 Costos de terminales y del servicio

Los servicios finales prestados con la Banda Ka tienen gran ventaja en costo tanto para el servicio final como para los terminales. Respecto al servicio, la eficiencia espectral que se logra gracias a la técnica de reuso de frecuencia permite diseñar haces puntuales con capacidades que superan en más de cien veces la de un satélite convencional, de este modo se pueden tener servicios con mayores anchos de banda y un costo comparable a la de las tecnologías terrestres, es así que actualmente en USA y Europa se ofrecen servicios de 10Mbps y 20 Mbps respectivamente, con mensualidades que no superan los USD 60.00.

Por otro lado, el costo de los terminales se ve reducido principalmente por la mayor potencia que se recibe por el haz puntual, que al ser más focalizado obtiene ganancias netas mayores a 10 dBW, lo cual permite utilizar antenas de menor diámetro, en el orden de los 70 cm, y transmisores de menor potencia, de hasta 2W, para la prestación de servicios de gran ancho de banda. Esto se traduce en una reducción en más del 50% en comparación con los costos de los terminales de

Banda C y Ku, que actualmente se encuentran en el orden de los USD 1200.00, mientras que los nuevos terminales de Banda Ka pueden llegar a USD 400.00.

En la Tabla 04 se muestra un resumen de las diferencias entre los HTS de Banda Ka y los satélites convencionales.

Tabla 04: Diferencias entre HTS de Banda Ka y los satélites convencionales
(Elaboración propia)

Característica	HTS	Otros Satélites
Disponibilidad de Frecuencias	Alta	Baja
Cobertura	Alta	Alta
Ganancia de antena del satélite	Alta	Media
PIRE y G/T	Alta	Media
Eficiencia Bit/Hz	Alta	Media
Disponibilidad de posiciones orbitales GEO	Media	Baja
Perdidas de Espacio Libre	Alta	Media
Atenuación por Lluvia	Alta	Media
Costo terminales usuario	Baja	Alta
Costo fabricación de satélite	Alta	Media
Costo servicio final	Baja	Alta
Capacidad en MHz	Alta	Baja
Complejidad en instalación de terminales	Baja	Media
Técnicas contra el desvanecimiento por lluvias	Alta	Alta

CAPITULO III: CALCULO DE PREDICCIÓN DE ATENUACIÓN POR LLUVIA EN EL TERRITORIO PERUANO

En el presente capítulo se desarrollarán los cálculos predictivos de la atenuación ocasionada por las lluvias en cada una de las capitales del Perú, en base a las recomendaciones P.618-9, P.838-3 y P.837-6 de la ITU, del cual se rigen los fabricantes del sector satelital para realizar sus estimaciones. Además, se mostrará una comparación del comportamiento de la atenuación en las Bandas C, Ku y Ka con diferentes tasas de probabilidad de lluvia.

3.1 Cálculo de predicción de intensidad de lluvia

La lluvia es un fenómeno con gran variación en cada lugar, tiempo, y con diferentes ocurrencias, se da con mayor intensidad en las zonas con climas ecuatoriales o tropicales. Pueden clasificarse como convectivas o estratiformes.

Las lluvias estratiformes, se extienden en una región amplia, tienen una larga duración y su intensidad es media o baja, se forman por la unión de partículas de

hielo que caen desde las capas superiores de la tropósfera, extendiéndose por alrededor de 1Km por debajo de la Isoterma 0°C, y cuyo cambio de temperatura los convierte en gotas. Por otro lado, las lluvias convectivas se forman por nubes que se encuentran debajo de la isoterma 0°C, y se caracterizan por tener altas tasas de precipitación que ocurren generalmente en áreas poco extensas y tienen corta duración, es el caso de las lluvias tropicales [EDU04, SAB11].

Sin duda, la lluvia ocasiona el mayor efecto de atenuación que existe en la propagación de los sistemas satelitales, aunque este fenómeno de atenuación se presente escaso en frecuencias bajas, el impacto crece de forma drástica a partir de las 10 GHz que afectan a las Bandas Ku y Ka.

Tabla 05: Ángulos de elevación y altura para las capitales del Perú

n°	Capital	Latitud	Longitud	m.s.n.m h_s	Elevación (°)
1	Moquegua	-17.193951	-70.931183	1410	66.8
2	Tacna	-18.017159	-70.251167	560	66.3
3	Arequipa	-16.400582	-71.528005	2350	67.2
4	Ica	-14.063940	-75.743988	400	66.2
5	Lima	-12.047816	-77.062203	40	66.6
6	Piura	-5.197550	-80.632501	30	66.2
7	Chiclayo	-6.776410	-79.846865	30	66.6
8	Trujillo	-8.112006	-79.028795	40	66.9
9	Puno	-15.843333	-70.023611	3850	68.7
10	Tumbes	-3.566971	-80.449788	20	66.8
11	Abancay	-13.632987	-72.883460	2420	68.9
12	Huancavelica	-12.786198	-74.976402	3680	67.9
13	Cerro De Pasco	-10.687100	-76.261317	4330	68.2
14	Huaraz	-9.530949	-77.527334	3100	67.7
15	Cusco	-13.523954	-71.963110	3400	69.6
16	Ayacucho	-13.164062	-74.222162	2740	68.2
17	Huancayo	-12.066994	-75.216753	3240	68.2
18	Cajamarca	-7.161588	-78.511041	2720	67.9
19	Huánuco	-9.930623	-76.240039	1900	68.7
20	Puerto Maldonado	-12.591239	-69.191518	210	72.4
21	Moyobamba	-6.033345	-76.966658	880	70.0
22	Chachapoyas	-6.229720	-77.869691	2350	68.9
23	Pucallpa	-8.382926	-74.550502	150	71.3
24	Iquitos	-3.750001	-73.250003	100	74.9

La intensidad de lluvia (R) es medida en mm/h, la lectura de este valor se expresa como la cantidad de lluvia que cae sobre un área de un metro cuadrado durante una hora, esta medida se realiza en milímetros de altura acumulados con lluvia sobre dicha área. A esta medida se la añade la tasa de probabilidad de lluvia (p),

que representa el lapso de tiempo de la que se requiere sacar la muestra, dentro de un periodo de un año.

Para entenderlo mejor, imaginemos que dejamos bajo la lluvia una cubeta de un metro cuadrado de base, después de una hora medimos la altura en milímetros a la que ha llegado la lluvia en dicha cubeta, ahí obtenemos la medición de intensidad de lluvia por hora. Ahora si dejamos la cubeta durante un año completo, tendremos la intensidad de lluvia con una tasa de probabilidad de 100%. Por lo tanto, si por ejemplo requerimos medir la intensidad de lluvia con una tasa de 0,1% de probabilidad, $R_{0,1}$, significa que debemos medir la lluvia en periodos de 8.76 horas (0,1% de 365 días) durante un año, y sacar el mayor valor obtenido de todas las muestras.

En la Tabla 05, se encuentran las localidades de las que vamos a extraer la información de intensidad de lluvia Rp. El ángulo de elevación se ha calculado mediante el software Dishpointer, considerando la utilización del satélite Amazonas 3 de Hispasat, ubicado en la posición orbital 61°O. Éste satélite es el primer satélite con Banda Ka en Latinoamérica, y cuya cobertura en Perú abarca los departamentos de Chiclayo, Trujillo, parte de Cajamarca y Amazonas.

Para nuestro análisis, hemos extraído la información de intensidad de lluvia en mm/h en base a la recomendación ITU P.837-6. Esta recomendación provee estadísticas de lluvia, dividiendo la tierra en regiones y asignando una tasa de lluvia a cada una en intervalos de 1.125° para la latitud y longitud [PER09, ITU12]. Además, contiene una base de datos recolectados durante 40 años por el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Plazo Medio (CEPMPM), los cuales pueden extraerse mediante un programa de Matlab publicado en la misma web de la ITU.

Cabe mencionar que esta información contiene un margen de error indefinido, a pesar que trabajos como [MAN07], [GAR09] y [ABA12] muestran que los resultados medidos son comparables con la recomendación ITU en países como España, Nigeria, Malasia y el Sudeste asiático, existen otros trabajos como [DON12] y [SAB11] donde se muestra que los resultados medibles difieren para la República de Korea y Colombia. En ese sentido, se recomienda utilizar esta recomendación, sólo si no se cuenta con estadísticas locales que contengan el índice de pluviosidad en un tiempo de integración de 1 mm para el 0.01% del año medio, como es el caso peruano.

Se realizó la extracción ciudad por ciudad utilizando el programa de Matlab antes mencionado, considerando tasas de 0.001, 0.01, 0.1, 1 y 5% de probabilidad de lluvia. En la Figura 20, podemos apreciar que las localidades con mayor intensidad de lluvia se encuentra en las ciudades de la selva peruana, tales como Puerto Maldonado, Moyobamba, Chachapoyas, Pucallpa e Iquitos, este último con una intensidad de lluvia que supera los 100 mm/h para una tasa de probabilidad de 0,01%. Por otro lado las ciudades costeras presentan las menores tasas de intensidad de lluvia, las cuáles se encuentran por debajo de los 30 mm/h para una misma tasa de probabilidad. Para mayor detalle, pueden revisar la Tabla 06.

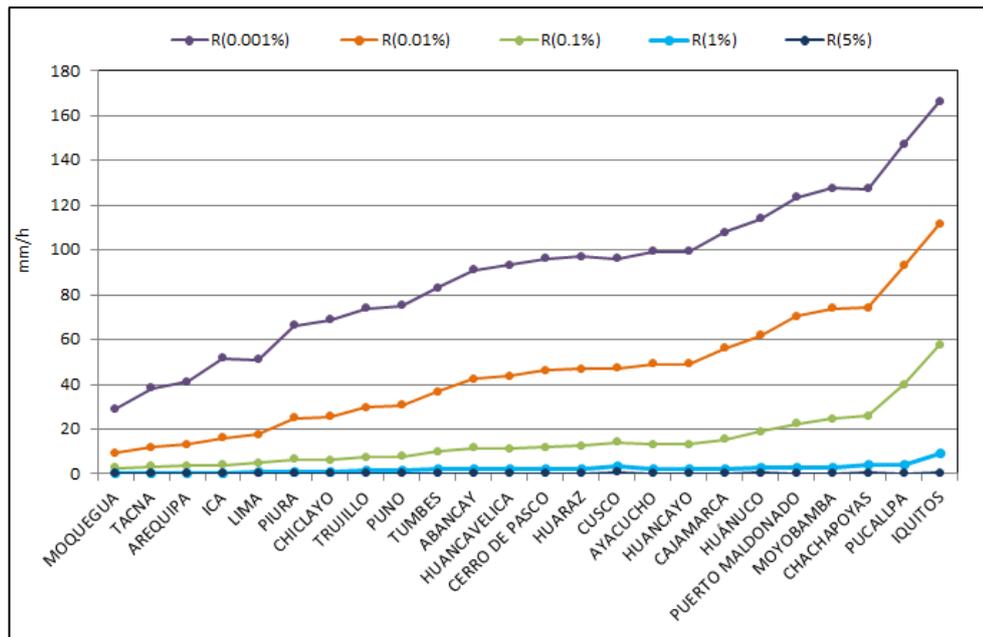


Figura 20: Intensidad de lluvia vs tasa de probabilidad (Elaboración propia)

3.2 Cálculo de atenuación específica (dB/Km)

El tamaño de las gotas de lluvia, en muchas ocasiones es comparable con la longitud de onda, la cual se contrasta en la pérdida de energía y por ende atenuación en el enlace. La atenuación específica determina la atenuación en decibeles que se tiene por cada kilómetro en el trayecto del enlace. Por tal motivo, es necesario realizar un análisis a fin de predecir, de forma cuantitativa, los efectos que se pueden ocasionar sobre el territorio peruano, sobretodo porque tenemos una geografía muy variada con alturas que van desde 30 hasta los 4330 msnm. Se calcula a partir de valores conocidos de intensidad de lluvia, R_p , mediante la siguiente ecuación:

$$\gamma_r = kR^\alpha \tag{3.1}$$

Tabla 06: Datos de intensidad de lluvia por localidad en mm/h (Elaboración propia)

n°	Capital	Intensidad de Lluvia (mm/h)				
		R(0.001%)	R(0.01%)	R(0.1%)	R(1%)	R(5%)
1	Moquegua	28.904	9.221	2.515	0.000	0.000
2	Tacna	38.347	11.985	3.234	0.014	0.000
3	Arequipa	41.069	13.006	3.539	0.142	0.000
4	Ica	51.521	16.071	3.812	0.143	0.000
5	Lima	51.114	17.458	4.892	0.696	0.000
6	Piura	66.086	24.943	6.616	1.214	0.000
7	Chiclayo	68.806	25.642	6.132	0.893	0.000
8	Trujillo	73.937	29.538	7.493	1.376	0.000
9	Puno	75.196	30.531	7.863	1.507	0.000
10	Tumbes	83.189	36.569	9.838	2.092	0.033
11	Abancay	90.932	42.520	11.656	2.476	0.216
12	Huancavelica	93.139	43.737	11.273	2.100	0.000
13	Cerro De Pasco	96.153	46.054	11.765	2.075	0.000
14	Huaraz	97.076	47.000	12.373	2.283	0.071
15	Cusco	96.000	47.156	14.052	3.275	0.643
16	Ayacucho	99.286	48.923	13.163	2.448	0.146
17	Huancayo	99.403	49.020	13.195	2.451	0.147
18	Cajamarca	107.861	56.033	15.319	2.417	0.071
19	Huánuco	114.073	61.868	18.732	3.116	0.368
20	Puerto Maldonado	123.599	70.271	22.500	2.807	0.111
21	Moyobamba	127.583	73.924	24.617	2.723	0.029
22	Chachapoyas	127.387	74.112	25.930	3.788	0.501
23	Pucallpa	147.366	92.940	39.844	3.943	0.107
24	Iquitos	166.528	111.808	57.535	9.035	0.429

Los valores de los coeficientes k y α están relacionados con la geometría de la gota y el ángulo de inclinación [FER10], y se determinan en función de la frecuencia, f (GHz), en la gama de 1 a 1 000 GHz, según las recomendaciones de la ITU 838-3 [ITU05]. Para el caso de la Banda Ka, en la que se utiliza polarización circular, utilizaremos las siguientes ecuaciones para la obtención de los coeficientes K_c y α_v .

$$k_c = \frac{[k_H + k_V + (k_H - k_V)\cos^2\theta \cos 2\tau]}{2} \quad (3.2)$$

$$\alpha_c = [k_H\alpha_H + k_V\alpha_V + (k_H\alpha_H - k_V\alpha_V)\cos^2\theta \cos 2\tau]/2k \quad (3.3)$$

Donde K_h y α_h son los coeficientes de polarización horizontal, y, K_v y α_v son los coeficientes de polarización vertical, calculados en [ITU05].

En la Tabla 07 se indican los valores numéricos de los coeficientes calculados para las bandas de frecuencias C, Ku y Ka, tanto en transmisión como en recepción. Mayor detalle de los coeficientes los podrá validar en el Anexo 1. Posteriormente, con los coeficientes calculados en la Tabla 07 y la Ecuación 1, calculamos la

atenuación específica en cada una de las ciudades. Los cálculos han considerado las frecuencias para los enlaces ascendentes y descendentes de las bandas C, Ku y Ka. Además se ha tenido en cuenta la polarización circular para las bandas C y Ka, puesto que son las más utilizadas, y polarización lineal para la banda Ku. Los resultados los podemos apreciar en la Tabla 08.

Tabla 07: Coeficientes de polarización para las Bandas C, Ku y Ka (Elaboración propia)

Frecuencia	Polarización Horizontal		Polarización Vertical		Polarización Circular	
	K_h	α_h	K_v	α_v	K_c	α_c
4.0	0.0001070	1.6009	0.0002461	1.2475	0.0001766	1.3547
6.0	0.0007024	1.5900	0.0004878	1.5728	0.0005951	1.5830
12.0	0.0238549	1.1825	0.0245483	1.1216	0.0242016	1.1516
14.0	0.0373744	1.1396	0.0412583	1.0646	0.0393163	1.1002
20.0	0.0916427	1.0568	0.0961112	0.9847	0.0938769	1.0199
30.0	0.2403082	0.9485	0.2290903	0.9129	0.2346993	0.9311

En el caso de la Banda Ku se decidió utilizar polarización vertical para el enlace de ascendente (Uplink) y polarización horizontal para el enlace descendente (Downlink), esta selección se debe a que la polarización vertical es menos vulnerable a la lluvia, comparado con la polarización horizontal.

Tabla 08: Atenuación específica en dB/Km en las ciudades del Perú (Elaboración propia)

n°	Ciudad	Polarización Circular		Pol. Vertical	Pol. Horizontal	Polarización Circular	
		30 Ghz	20 GHz	14 Ghz	12 Ghz	6 GHz	4 GHz
1	Moquegua	1.8571	0.9047	0.4392	0.3299	0.0200	0.0036
2	Tacna	2.3705	1.1821	0.5806	0.4498	0.0303	0.0051
3	Arequipa	2.5580	1.2848	0.6334	0.4955	0.0345	0.0057
4	Ica	3.1151	1.5943	0.7934	0.6363	0.0483	0.0076
5	Lima	3.3647	1.7348	0.8665	0.7018	0.0550	0.0085
6	Piura	4.6906	2.4962	1.2669	1.0701	0.0968	0.0138
7	Chiclayo	4.8129	2.5675	1.3047	1.1057	0.1011	0.0143
8	Trujillo	5.4904	2.9660	1.5168	1.3070	0.1265	0.0173
9	Puno	5.6621	3.0677	1.5711	1.3591	0.1333	0.0181
10	Tumbes	6.6981	3.6876	1.9039	1.6824	0.1774	0.0231
11	Abancay	7.7076	4.3006	2.2354	2.0107	0.2252	0.0284
12	Huancavelica	7.9128	4.4261	2.3036	2.0789	0.2355	0.0295
13	Cerro De Pasco	8.3024	4.6654	2.4337	2.2098	0.2556	0.0316
14	Huaraz	8.4611	4.7631	2.4870	2.2635	0.2639	0.0325
15	Cusco	8.4872	4.7793	2.4958	2.2724	0.2653	0.0327
16	Ayacucho	8.7830	4.9620	2.5954	2.3735	0.2812	0.0343
17	Huancayo	8.7992	4.9720	2.6009	2.3790	0.2821	0.0344
18	Cajamarca	9.9658	5.6985	2.9988	2.7865	0.3486	0.0413
19	Huánuco	10.9288	6.3043	3.3324	3.1328	0.4078	0.0472
20	Puerto Maldonado	12.3047	7.1787	3.8163	3.6420	0.4988	0.0561
21	Moyobamba	12.8993	7.5595	4.0278	3.8669	0.5405	0.0600
22	Chachapoyas	12.9298	7.5791	4.0387	3.8786	0.5427	0.0602
23	Pucallpa	15.9637	9.5474	5.1394	5.0690	0.7766	0.0819
24	Iquitos	18.9616	11.5279	6.2571	6.3073	1.0405	0.1052

Los datos obtenidos muestran que la atenuación específica (en dB/km) sigue el mismo patrón de comportamiento de la intensidad de lluvia. Las ciudades con menor atenuación corresponden a localidades costeras como Moquegua, Tacna, Arequipa, Ica, Lima, Chiclayo y Piura, con una atenuación menor a 6 dB/Km para la frecuencia de 30 GHz de Banda Ka, mientras que las localidades con mayor atenuación siguen siendo las zonas de la selva como Puerto Maldonado, Moyobamba, Chachapoyas, Pucallpa e Iquitos, este último con la mayor atenuación, que alcanza casi 19 dB/Km, en la misma frecuencia.

Las zonas costeras sufren una incremento considerable de atenuación específica a medida que utiliza frecuencias más altas, y va en aumento a medida que se tenga una mayor intensidad de lluvia. Moquegua, por ejemplo, tiene la tasa más baja con un máximo de 1.85 dB/Km y la más alta en esta zona es Trujillo con una tasa de 5.5 dB/Km para una frecuencia de 30 GHz de Banda Ka.

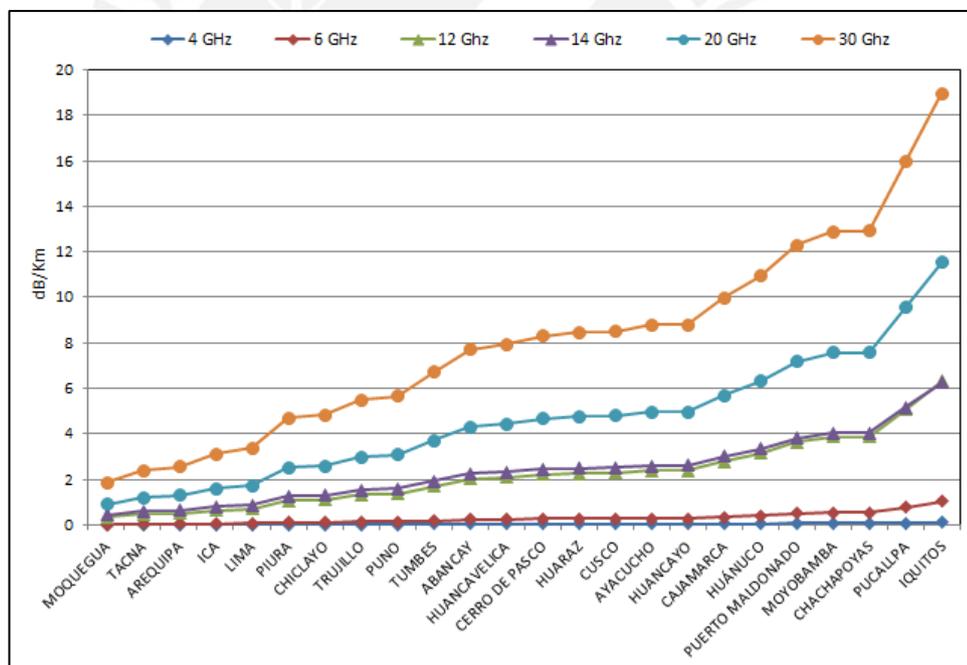


Figura 21: Atenuación específica para las Banda C, Ku y Ka (Elaboración propia)

En la Figura 21, se observa una comparación de la atenuación específica entre las bandas de frecuencia C, Ku y Ka. Se puede apreciar que la atenuación específica es casi despreciable a frecuencias bajas como las que se utilizan en la Banda C, 4 GHz y 6 GHz para los enlaces descendente y ascendente respectivamente, aun considerando localidades en las que se tiene un alto índice de intensidad de lluvia como el caso de Iquitos. Esto, en cambio, no sucede con la Banda Ka, de 20GHz y

30GHz, puesto que la atenuación específica crece drásticamente a medida que la intensidad de lluvia se ve afectada. El rango de variación en el territorio peruano es muy amplio, varía desde los 1.85 dB/Km en Moquegua hasta los 19 dB/Km en la ciudad de Iquitos, debido a la diversidad de climas que tenemos. En el Anexo 2, podemos ver mayor detalle de la atenuación específica para todas frecuencias en el rango de 4 - 30 GHz, en polarización circular.

3.3 Cálculo de atenuación por lluvia (dB)

En un enlace satelital, las señales son atenuadas a medida que se propagan a través del aire, en especial en el trayecto donde esté lloviendo, esto depende claramente de la distancia proyectada a partir de la altura de la lluvia en relación con el piso y del ángulo de inclinación de la antena.

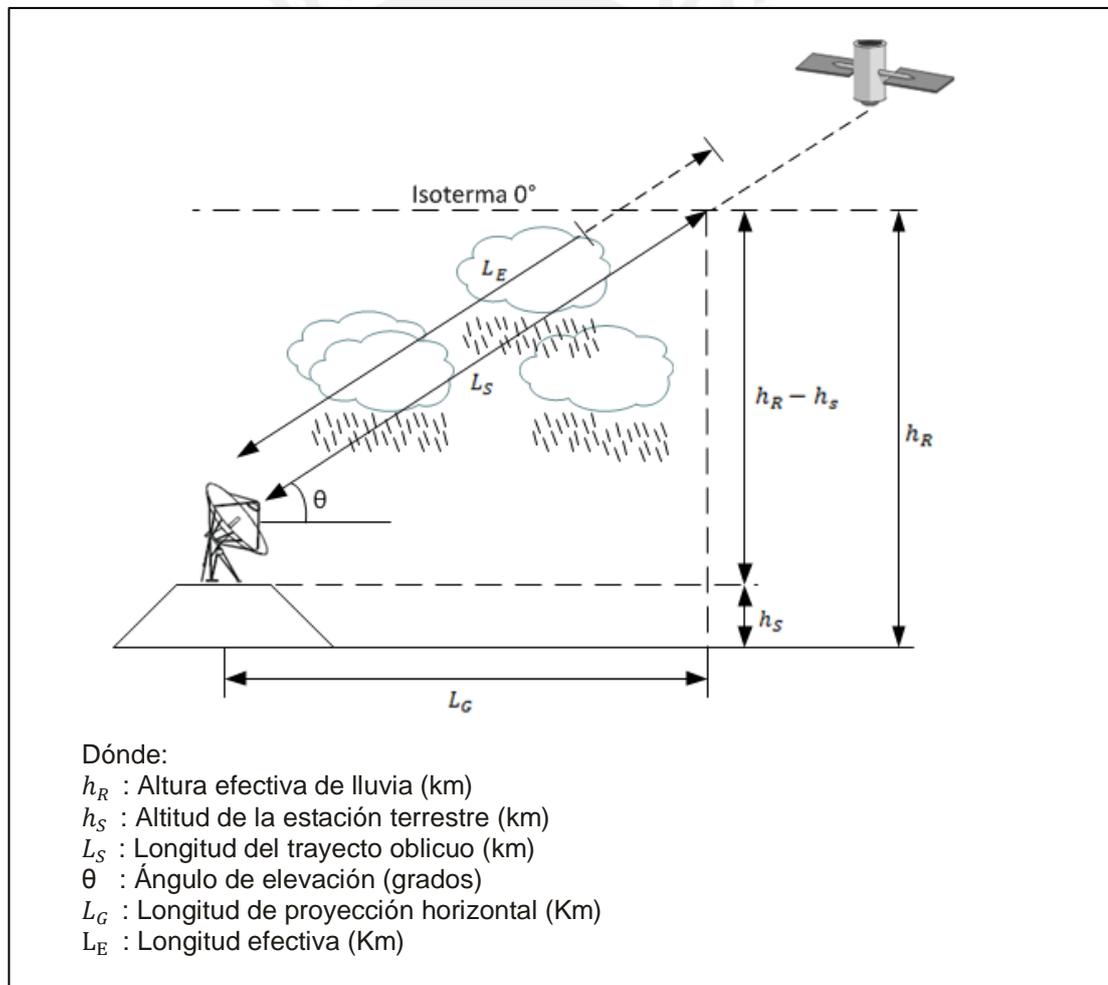


Figura 22: Enlace satelital Tierra-Espacio (Elaboración propia en base a [ITU07])

Nuestro cálculo de atenuación por lluvia se basó en la recomendación ITU 618-9 [ITU07]. Este modelo de predicción utiliza la tasa de lluvia a 0.01% de probabilidad

para la estimación de atenuación y luego se aplica un factor de ajuste para predecir otras probabilidades. Los rangos utilizables en este modelo van desde 4 GHz hasta 55 GHz y de 0.001 - 5% de probabilidad de lluvia. Para ello fue necesario tener los siguientes datos [SRI12, ITU01], las cuáles extraeremos de las Tablas 5, 6 y 8:

- Tasa de lluvia R_p
- Intensidad de lluvia
- Altura de cada localidad, en metros sobre el nivel del mar
- Altura de lluvia h_R
- Latitud de la localidad, φ , en grados.
- Frecuencia en GHz.
- Angulo de elevación y polarización

En los próximos párrafos calcularemos la atenuación por lluvia sobre las capitales de departamento del territorio peruano, tomaremos como base la Figura 22, que muestra un enlace satelital típico.

El primer cálculo a realizar corresponde a la altura de la lluvia, h_R , en cada una de las ciudades, este valor indica la altura desde donde cae lluvia. El valor de la altura de la isoterma a 0°C , h_0 , la extraemos de la recomendación ITU R 839-3 [ITU01].

$$h_R = h_0 + 0,36 \text{ km} \quad (3.4)$$

Para el caso peruano, y considerando el satélite Amazonas 3, resultan todos los ángulos de elevación (θ) mayores a 5° , ver Tabla 05, con lo cual debemos utilizar la siguiente fórmula para el cálculo de la longitud del trayecto oblicuo, L_S [ITU07].

$$L_S = \frac{h_R - h_S}{\sin \theta} \text{ km} \quad (3.5)$$

La longitud de proyección horizontal, L_G , la determinamos como sigue:

$$L_G = L_S \cos \theta \quad (3.6)$$

En la Tabla 09 se muestran los resultados de los cálculos realizados para los valores de L_G , L_S y h_R , en cada una de las ciudades.

Tabla 09: Resultados de los valores de L_G , L_S y h_R para cada ciudad (Elaboración propia)

N°	Capital	Altura de Lluvia h_R (Km)	Trayecto Oblicuo L_S (Km)	Proyección Horizontal L_G (Km)
1	Moquegua	5.4483	4.39	1.73
2	Tacna	5.5444	5.44	2.19
3	Arequipa	5.4411	3.35	1.30
4	Ica	5.1894	5.23	2.11
5	Lima	5.3141	5.75	2.28
6	Piura	5.0058	5.44	2.19
7	Chiclayo	5.1954	5.63	2.24
8	Trujillo	5.2632	5.68	2.23
9	Puno	5.4910	1.76	0.64
10	Tumbes	5.0633	5.49	2.16
11	Abancay	5.2234	3.00	1.08
12	Huancavelica	5.1124	1.55	0.58
13	Cerro De Pasco	5.3289	1.08	0.40
14	Huaraz	4.9343	1.98	0.75
15	Cusco	5.1214	1.84	0.64
16	Ayacucho	5.1772	2.62	0.97
17	Huancayo	5.0519	1.95	0.72
18	Cajamarca	5.0487	2.51	0.95
19	Huánuco	5.1183	3.45	1.25
20	Puerto Maldonado	4.9615	4.98	1.51
21	Moyobamba	4.8052	4.18	1.43
22	Chachapoyas	4.8809	2.71	0.98
23	Pucallpa	4.8989	5.01	1.61
24	Iquitos	4.8010	4.87	1.27

Seguidamente debemos determinar la longitud efectiva del trayecto, L_E , para lo cual necesitamos calcular los factores de ajuste horizontal, $r_{0,01}$, y vertical, $v_{0,01}$, para el 0,01% del tiempo. El primero podemos calcularlo mediante de la siguiente ecuación [ITU07]:

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 + 0,78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0,38(1 - e^{-2L_G})} \quad (3.7)$$

Para calcular el factor de ajuste vertical, $v_{0,01}$, para 0,01% del tiempo, primero debemos calcular las variables ζ , L_R y X [ITU07].

$$\zeta = \tan^{-1} \left(\frac{h_R - h_S}{L_G r_{0,01}} \right) \text{ grados} \quad (3.8)$$

Para $\zeta > \theta$

$$L_R = \frac{L_G r_{0,01}}{\cos \theta} \text{ km} \quad (3.9)$$

De otro modo,

$$L_R = \frac{(h_R - h_S)}{\sin \theta} \text{ km} \quad (3.10)$$

Para localidades con latitud $|\varphi| < 36^\circ$,

$$X = 36 - |\varphi| \text{ grados} \quad (3.11)$$

Con estos valores calculamos $v_{0,01}$ con la siguiente operación matemática:

$$v_{0,01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \left(31[1 - e^{-(\theta/(1+X))}] \frac{\sqrt{L_R \gamma_R}}{f^2} - 0,45 \right)} \quad (3.12)$$

Finalmente, procedemos a realizar el cálculo de la longitud efectiva del trayecto mediante la siguiente ecuación:

$$L_E = L_R v_{0,01} \text{ km} \quad (3.13)$$

En la Tabla 10, se muestran los resultados obtenidos para los valores de $r_{0,01}$, $v_{0,01}$ y L_E para las frecuencias de 30GHz y 20 GHz, utilizados para la transmisión y recepción respectivamente.

Por último, calculamos la atenuación, en dB, prevista para el 0,01% de un año medio, $A_{0,01}$.

$$A_{0,01} = \gamma_R L_E \text{ dB} \quad (3.14)$$

Con la atenuación $A_{0,01}$ podemos determinar la atenuación estimada para otros porcentajes de año medio en el rango de 0,001% hasta el 5%, a partir de la los siguientes pasos.

Calculamos el valor de β :

$$\text{Si } p \geq 1\% \text{ o } |\varphi| \geq 36^\circ: \quad \beta = 0$$

$$\text{Si } p < 1\% \text{ o } |\varphi| < 36^\circ \text{ y } \theta \geq 25^\circ: \quad \beta = -0,005(|\varphi| - 36)$$

$$\text{De otro modo:} \quad \beta = -0,005(|\varphi| - 36) + 1,8 - 4,25 \sin \theta$$

Luego calculamos la atenuación para cualquier porcentaje, A_p .

$$A_p = A_{0,01} \left(\frac{p}{0,01} \right)^{-(0,655+0,033 \ln(p)-0,045 \ln(A_{0,01})-\beta(1-p) \sin \theta)} \text{ dB} \quad (3.15)$$

Tabla 10: Valores de la longitud efectiva por ciudad para frecuencias de 20 y 30 GHz
(Elaboración Propia)

n°	Capital	f = 20 GHz			f = 30 GHz		
		$r_{0,01}$	$v_{0,01}$	L_E	$r_{0,01}$	$v_{0,01}$	L_E
1	Moquegua	1.1762	1.4052	6.1740	1.1271	1.5159	6.6603
2	Tacna	1.1046	1.3302	7.2407	1.0536	1.4616	7.9561
3	Arequipa	1.1447	1.3957	4.6800	1.1015	1.5127	5.0721
4	Ica	1.0575	1.2957	6.7825	1.0092	1.4385	7.5297
5	Lima	1.0299	1.2705	7.3014	0.9817	1.4231	8.0287
6	Piura	0.9681	1.2426	6.5420	0.9245	1.4092	7.0855
7	Chiclayo	0.9595	1.2272	6.6277	0.9162	1.3983	7.2108
8	Trujillo	0.9322	1.1992	6.3480	0.8909	1.3787	6.9746
9	Puno	1.0309	1.3647	2.4037	1.0033	1.5003	2.6424
10	Tumbes	0.8949	1.1878	5.8326	0.8570	1.3722	6.4522
11	Abancay	0.9617	1.2264	3.5439	0.9303	1.4051	3.9281
12	Huancavelica	0.9818	1.3360	2.0278	0.9576	1.4849	2.1983
13	Cerro De Pasco	0.9718	1.3909	1.4542	0.9521	1.5245	1.5617
14	Huaraz	0.9666	1.2933	2.4784	0.9401	1.4545	2.7109
15	Cusco	0.9702	1.2953	2.3081	0.9456	1.4582	2.5324
16	Ayacucho	0.9455	1.2293	3.0509	0.9168	1.4080	3.3882
17	Huancayo	0.9613	1.2826	2.4061	0.9356	1.4476	2.6431
18	Cajamarca	0.9240	1.2340	2.8660	0.8973	1.4127	3.1858
19	Huánuco	0.8761	1.1540	3.4922	0.8487	1.3533	3.9673
20	Puerto Maldonado	0.8248	1.0520	4.3255	0.7988	1.2756	5.0792
21	Moyobamba	0.8230	1.1027	3.7912	0.7980	1.3160	4.3865
22	Chachapoyas	0.8708	1.1788	2.7845	0.8475	1.3747	3.1606
23	Pucallpa	0.7584	1.0216	3.8845	0.7371	1.2528	4.6298
24	Iquitos	0.7593	0.9973	3.6871	0.7416	1.2369	4.4664

En la Tabla 11 podemos apreciar los resultados del cálculo de atenuación estimada para los porcentajes de año medio de 0.001%, 0.01%, 0.1%, 0.05%, 0.5%, 1% y 5%, para todas las ciudades del territorio Peruano, considerando la frecuencia del enlace ascendente de Banda Ka de 30Ghz. La Tabla 12 muestra el mismo cálculo, pero para la frecuencia del enlace descendente de Banda Ka de 20 GHz. Las Figuras 23 y 24, muestran los mismos resultados en forma de gráficas comparativas por tipo de porcentaje.

Tabla 11: Valores de atenuación para la frecuencia de 30 GHz, enlace ascendente de Banda Ka (Elaboración propia)

n°	Capital	A(0.001)	A(0.01)	A(0.05)	A(0.1)	A(0.5)	A(1)	A(5)
1	Moquegua	20.8855	12.3687	6.9199	5.0615	1.9234	1.0202	0.3066
2	Tacna	30.7734	18.8602	10.8112	7.9946	3.1338	1.6978	0.5261
3	Arequipa	21.6051	12.9747	7.3278	5.3793	2.0503	1.0809	0.3260
4	Ica	35.8977	23.4561	14.0413	10.5570	4.1953	2.2091	0.6955
5	Lima	39.8569	27.0146	16.5782	12.5846	5.0469	2.6198	0.8333
6	Piura	44.6897	33.2354	21.7093	16.8683	6.8424	3.3645	1.0863
7	Chiclayo	47.1912	34.7051	22.5048	17.4453	7.1042	3.5450	1.1482
8	Trujillo	52.2393	38.2932	24.7868	19.2123	7.8851	3.9921	1.3022
9	Puno	24.3484	14.9616	8.5842	6.3419	2.4413	1.2837	0.3912
10	Tumbes	55.5032	43.2173	29.1318	22.9229	9.4679	4.6198	1.5202
11	Abancay	44.7140	30.2760	18.5747	14.1076	5.7082	3.0063	0.9641
12	Huancavelica	27.0090	17.3951	10.3026	7.7042	2.9935	1.5399	0.4744
13	Cerro De Pasco	20.2832	12.9656	7.6329	5.6865	2.1605	1.0799	0.3257
14	Huaraz	33.4419	22.9375	14.1797	10.7822	4.2669	2.1503	0.6759
15	Cusco	32.8147	21.4931	12.8827	9.6857	3.8226	1.9879	0.6219
16	Ayacucho	43.8589	29.7586	18.2813	13.8899	5.6121	2.9444	0.9431
17	Huancayo	34.7542	23.2572	14.1443	10.6939	4.2418	2.1865	0.6879
18	Cajamarca	43.6221	31.7490	20.4399	15.7964	6.3918	3.1837	1.0245
19	Huánuco	59.3150	43.3580	28.0252	21.7260	9.0045	4.6379	1.5266
20	Puerto Maldonado	84.2129	62.4984	40.8592	31.8672	13.5777	7.2116	2.4374
21	Moyobamba	72.0224	56.5831	38.4053	30.3387	12.7901	6.3959	2.1462
22	Chachapoyas	54.0400	40.8665	27.0121	21.1009	8.6904	4.3181	1.4152
23	Pucallpa	93.6378	73.9094	50.3692	39.9052	17.1717	8.8299	3.0208
24	Iquitos	99.9074	84.6907	60.5493	48.8304	21.1592	10.4075	3.5958

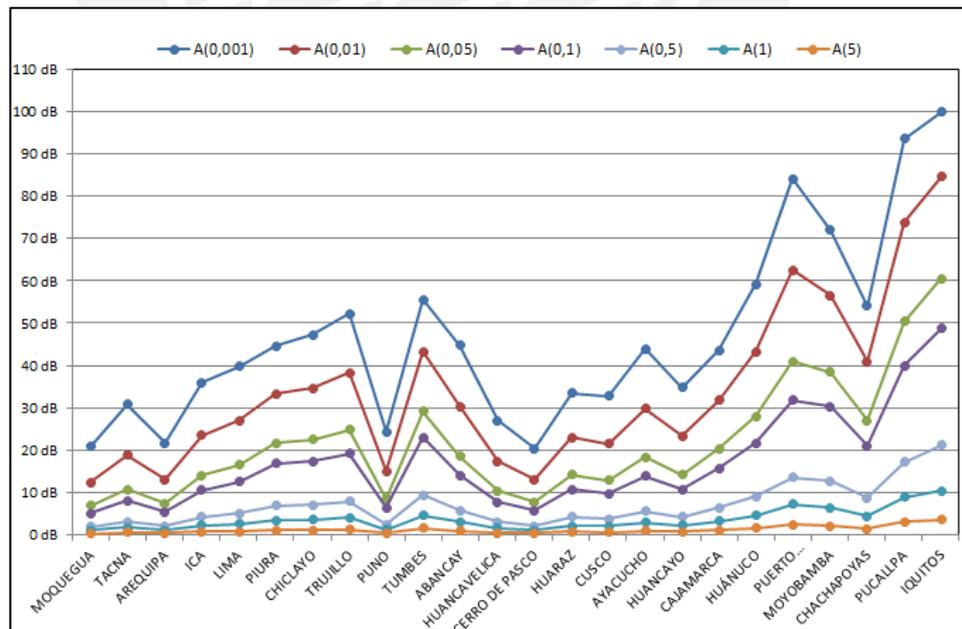


Figura 23: Comparación de atenuación vs probabilidad de lluvia sobre un enlace de 30 GHz (Elaboración propia)

De los resultados podemos apreciar que los valores de la atenuación por lluvia no siguen el mismo patrón que la intensidad de lluvia, esto se debe básicamente porque la atenuación depende, entre otros factores, de la distancia de la lluvia, h_R , y del ángulo de elevación, que varían entre cada ciudad. Esta variación de h_R se da principalmente en las localidades de la sierra peruana, ya que tienen altitudes mayores a los 2400 msnm.

En la Figura 23, podemos apreciar de forma gráfica los resultados del cálculo de atenuación para 30 GHz, en ella se aprecia que para los tipos de porcentajes de 0.5, 1 y 5%, la atenuación por lluvia es menor a 10 dB, con excepción de las localidades de la selva en la que se llega hasta los 21 dB para el caso de Iquitos a 0.5%. Para los demás porcentajes menores a 0.5%, la atenuación se vuelve muy grande, especialmente para las ciudades de la Selva y algunas localidades costeras como Tumbes.

Tabla 12: Valores de Atenuación para la frecuencia de 20 GHz, enlace descendente de Banda Ka (Elaboración propia)

n°	Capital	A(0,001)	A(0,01)	A(0,05)	A(0,1)	A(0,5)	A(1)	A(5)
1	Moquegua	10.2417	5.5857	2.9502	2.1050	0.7552	0.3907	0.1109
2	Tacna	15.1566	8.5589	4.6333	3.3429	1.2375	0.6541	0.1914
3	Arequipa	10.8434	6.0131	3.2121	2.3021	0.8299	0.4271	0.1218
4	Ica	17.9317	10.8135	6.1202	4.4917	1.6876	0.8674	0.2582
5	Lima	20.2133	12.6662	7.3581	5.4551	2.0709	1.0499	0.3161
6	Piura	23.6358	16.3300	10.1317	7.6998	2.9666	1.4268	0.4376
7	Chiclayo	24.9124	17.0168	10.4796	7.9450	3.0727	1.4995	0.4612
8	Trujillo	27.6456	18.8280	11.5764	8.7763	3.4215	1.6943	0.5250
9	Puno	12.9127	7.3737	4.0193	2.9046	1.0623	0.5464	0.1582
10	Tumbes	29.6937	21.5081	13.7836	10.6124	4.1672	1.9896	0.6224
11	Abancay	24.1677	15.2406	8.8969	6.6141	2.5464	1.3127	0.4006
12	Huancavelica	14.9248	8.9753	5.0671	3.7117	1.3747	0.6927	0.2034
13	Cerro De Pasco	11.3499	6.7842	3.8109	2.7823	1.0086	0.4941	0.1422
14	Huaraz	18.4375	11.8050	6.9549	5.1801	1.9536	0.9643	0.2889
15	Cusco	18.0471	11.0312	6.3002	4.6392	1.7445	0.8886	0.2649
16	Ayacucho	23.9301	15.1385	8.8557	6.5881	2.5347	1.3021	0.3971
17	Huancayo	19.1517	11.9631	6.9336	5.1346	1.9409	0.9800	0.2938
18	Cajamarca	24.0393	16.3317	10.0201	7.5848	2.9248	1.4270	0.4376
19	Huánuco	32.3095	22.0159	13.5488	10.2837	4.0580	2.0464	0.6413
20	Puerto Maldonado	44.9851	31.0514	19.2975	14.7258	5.9643	3.0995	0.9958
21	Moyobamba	39.1434	28.6594	18.5172	14.3208	5.7471	2.8136	0.8987
22	Chachapoyas	29.8851	21.1042	13.2976	10.1757	3.9950	1.9446	0.6075
23	Pucallpa	50.4659	37.0865	24.0431	18.6429	7.6315	3.8407	1.2499
24	Iquitos	53.8543	42.5046	28.9085	22.8175	9.4058	4.5279	1.4882

Para el caso de 20 GHz, si bien la atenuación por lluvia disminuye, ésta sigue siendo muy alta para las localidades de la Selva en porcentajes de 0.1% a menos, llegando a un nivel máximo de 54 dB en la ciudad de Iquitos a 0.001%. Estos resultados implican una reducción en la disponibilidad del enlace satelital, la cual no puede ser controlable frente a atenuaciones tan altas.

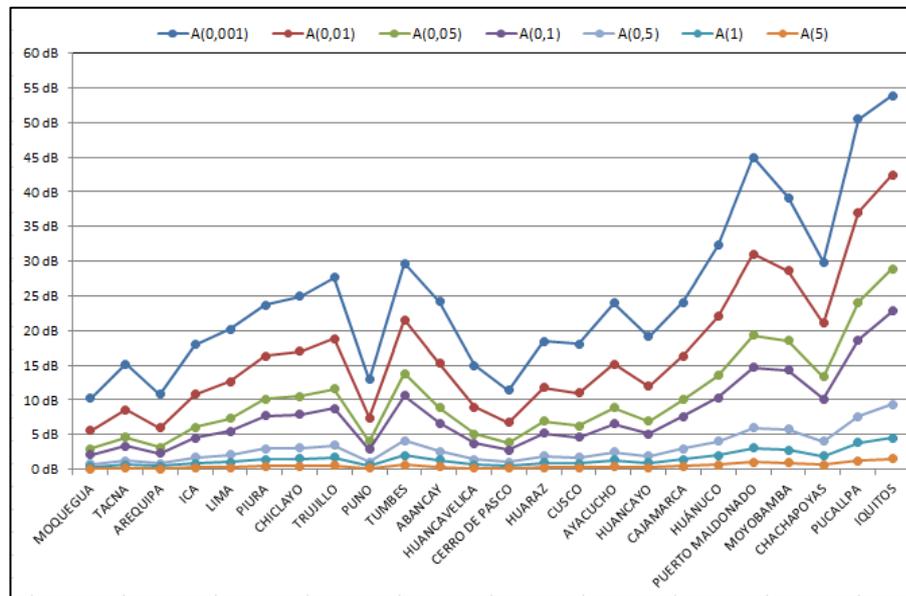


Figura 24: Comparación de atenuación vs probabilidad de lluvia sobre un enlace de 20 GHz (Elaboración propia)

Consideraremos, tanto para 20GHz como para 30 GHz, el límite máximo de atenuación referencial en 10 dB, a fin de desarrollar los cálculos de enlace y poder analizar los métodos de mitigación que podemos aplicar para salvaguardar la disponibilidad del enlace satelital. En caso obtengamos un margen de operación positivo, utilizaremos un nivel de atenuación mayor a 10 dB para analizar los resultados.

3.4 Comparación de atenuación por lluvia en Bandas C, Ku y Ka

En las Figuras 25, 26 y 27 vemos los resultados, de forma comparativa, de la atenuación en dB que existe en las frecuencias de enlace ascendente y descendente para las bandas C, Ku y Ka, con tasas de probabilidad de 0.1%, 0.5% y 1%. No se consideran tasas de probabilidades más bajas como 0,01% debido a que la atenuación por lluvia para la Banda Ka se vuelve muy alta, mayor a 70 dB en la banda de 30 GHz, lo cual complica su utilización. Por otro lado, no se consideran probabilidades más altas debido a que se ve reducida la disponibilidad del servicio de forma drástica.

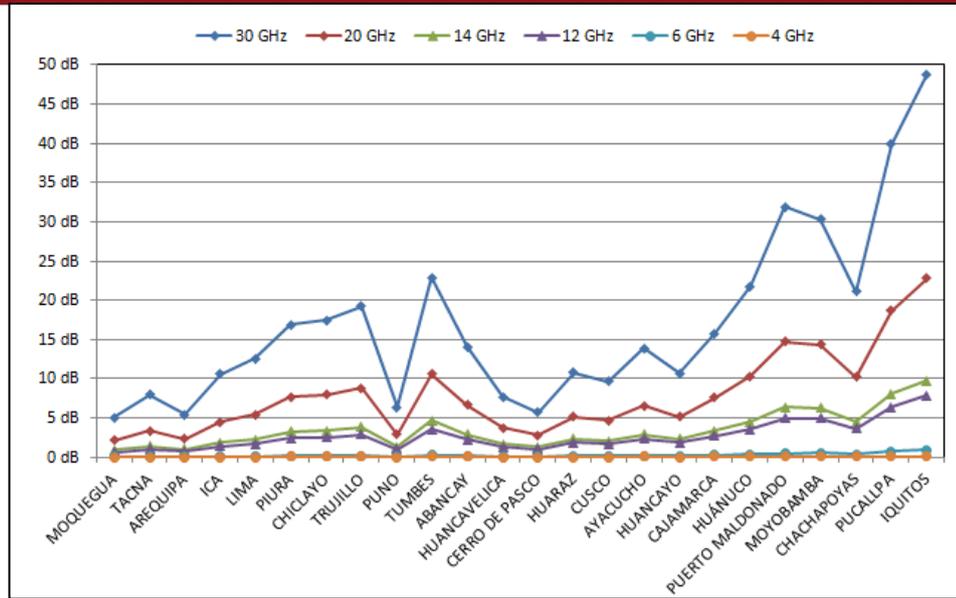


Figura 25: Comparación de atenuación por lluvia (dB) con 0.1% de probabilidad entre las Bandas C, Ku y Ka (Elaboración propia)

La Figura 25 corresponde al comportamiento de la atenuación por lluvia en las diversas ciudades del país, con una probabilidad de 0.1%. La atenuación para las frecuencias de Bandas C y Ku se encuentra por debajo de los 10 dB incluso en ciudades con altas tasas de lluvia, en cambio la atenuación para las frecuencias de 20 y 30 GHz llega a sobrepasar los 10 dB en la mayoría de las ciudades, y sobrepasa los 20 dB en las localidades de la selva, con un tope máximo de casi 50 dB en Iquitos.

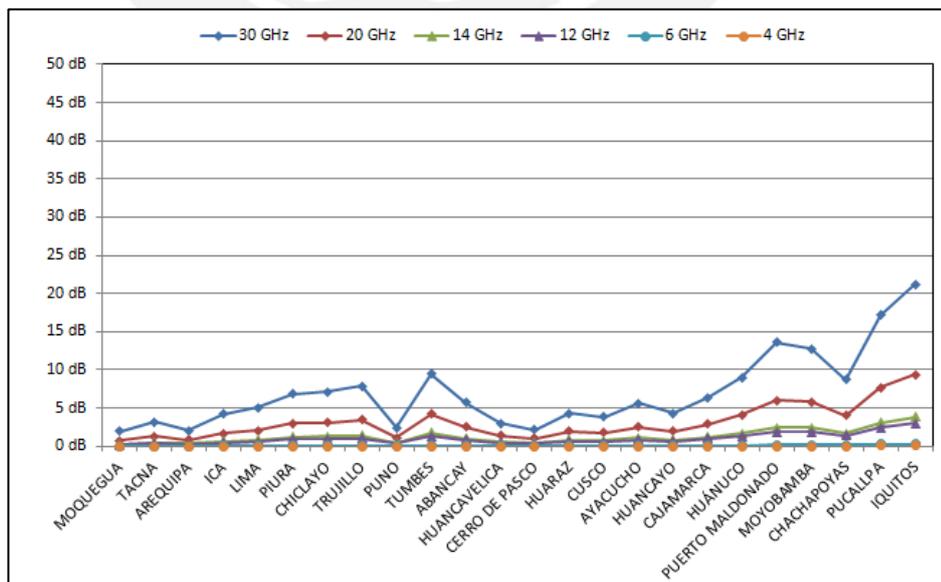


Figura 26: Comparación de atenuación por lluvia (dB) con 0.5% de probabilidad entre las Bandas C, Ku y Ka (Elaboración propia)

Si consideramos una probabilidad de 0.5%, ver Figura 26, la atenuación para las Bandas C y Ku se encuentran por debajo de 5dB. Se aprecia una reducción considerable de la atenuación, sin embargo aún existen ciudades, sobretodo de la Selva, cuya atenuación por lluvia llega a pasar los 10 dB para una frecuencia de 30 GHz. A pesar de ello, se puede considerar la implementación de algún método de mitigación para reducir el impacto en las demás localidades de costa y sierra.

Por último, la Figura 27 muestra la atenuación por lluvia con una probabilidad de 1%. La atenuación se ve reducida drásticamente, se vuelve casi despreciable para las bandas C y Ku, y en alguna de ciudades de la sierra y costa para las frecuencias de 20 y 30 GHz. Si bien la disponibilidad del enlace se ve reducida, 99% o menos, es posible que podamos manejar algún método de mitigación para las localidades de la selva, en las que la atenuación se encuentra entre los 5 y 10 dB.

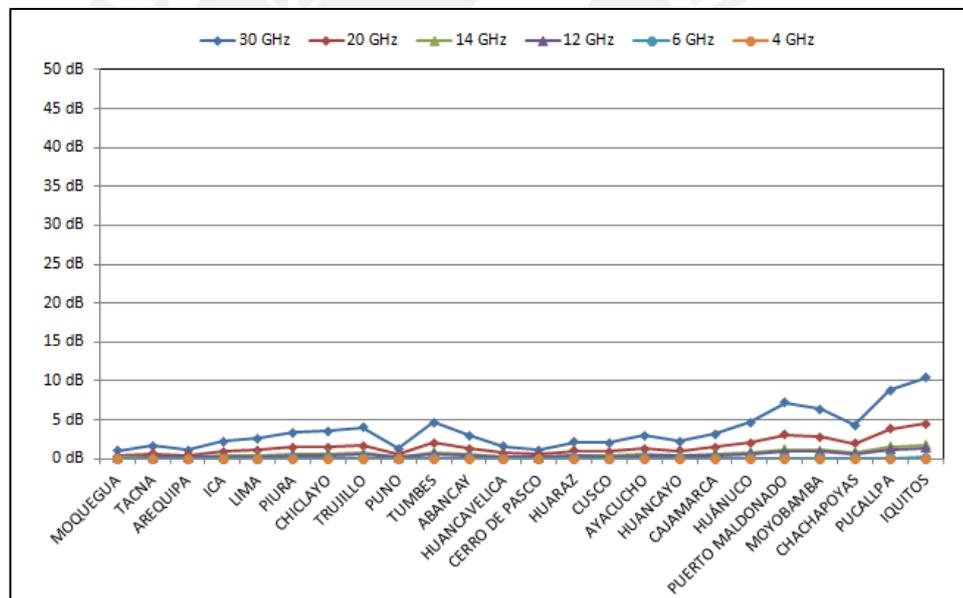


Figura 27: Comparación de atenuación por lluvia (dB) con 1% de probabilidad entre las Bandas C, Ku y Ka (Elaboración propia)

CAPITULO IV: DESARROLLO DE LOS CÁLCULOS DE ENLACE EN BANDA KA SOBRE EL TERRITORIO PERUANO

En el presente capítulo muestra la metodología desarrollada para la elaboración de los cálculos de enlace en cada una de las capitales de departamento del Perú, considerando los esquemas de modulación y codificación adaptativa que ofrecen los actuales fabricantes de tecnología satelital mediante los estándares DVB-S2 y DVB-RCS2, estos cálculos se realizan mediante las ecuaciones descritas en el primer capítulo y tomando como fuente de información los resultados de atenuación del tercer capítulo, además del diseño conceptual de un HTS con cobertura sobre el territorio nacional.

Se consideran cuatro escenarios: clima despejado, lluvia en el tramo satélite – estación terrena, lluvia en el tramo satélite – terminal remoto y lluvia en ambos lados, de los cuáles obtendremos los esquemas de modulación y codificación con los que pueden operar los servicios de Banda Ka y la disponibilidad alcanzable en cada ciudad.

4.1 Técnicas de mitigación por desvanecimiento utilizadas

Para el presente análisis se considerarán las siguientes técnicas mitigación por desvanecimiento:

- Control de potencia ascendente: Tiene como objetivo incrementar la potencia de subida en la estación terrena o remota en variación de las condiciones de clima despejado o ante los cambios imprevistos de la PIRE del satélite. Se considerará un incremento de 5 dB en la potencia de transmisión en presencia de lluvias en la estación terrena.
- Adaptación de la señal: Se da mediante esquemas de compensación del desvanecimiento con la adaptación de modulaciones más eficientes y múltiples esquemas de codificación, por otras más robustas cuando ocurre algún efecto climático adverso como es el caso de lluvias. Para fines del análisis se considerarán los esquemas de modulación y codificación de los estándares DVB-S2, y DVB-RCS2, descritos en el Capítulo I.

4.2 Estándares de comunicación utilizados

4.2.1 Digital Video Broadcasting – Second Generation (DVB-S2)

Para el enlace saliente (outbound) se consideró utilizar el estándar DVB (Digital Video Broadcasting) de segunda generación, o también conocido como DVB-S2, puesto que es el más utilizado por los fabricantes actuales de tecnología satelital y cuyos equipos son los que están disponibles en el mercado mundial.

En la Tabla 13 se muestran los requerimientos de E_b/N_0 para el canal Outbound DVB-S2 que utilizaremos para nuestro análisis. Para la elaboración de los cálculos de enlace se tomarán en cuenta las cuatro constelaciones de modulación disponibles. Por el contrario no se tomará en cuenta la codificación 1/4, 1/3 y 2/5 puesto que son poco eficientes (eficiencia menor a 0.9, en un canal casi libre de errores [ETS13]). Además se aprecia que el enlace puede operar inclusive con rango de E_s/N_0 de -2.35 dB, inferiores al piso de ruido, con una modulación de QPSK y una codificación de 1/4, 1/3 y 2/5, sin embargo no las consideraremos en el análisis puesto que no son eficientes.

4.2.2 Digital Video Broadcasting – Return Channel Satellite (DVB- RCS)

Al ser un estándar abierto que permite la comunicación satelital de dos vías, también es utilizado por la mayoría de los fabricantes de tecnología satelital para los canales de retorno (Inbound).

Tabla 13: Requerimientos de Eb/No para una canal DVD-S2 casi libre de errores [ETS13]

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

En la Tabla 14 se muestran los requerimientos de Eb/No para el canal de retorno DVB-RCS2 que utilizaremos para nuestro análisis. En este caso no consideraremos la codificación 1/3 por ser poco eficiente (menor a 0.9).

Tabla 14: Requerimientos de Eb/No para una canal DVB-RCS2 casi libre de errores [DVB13B]

Modulación	Codificación (FEC)	Eficiencia Espectral	Es/No requerido	Eb/No requerido
QPSK	1/3	0.61	0.00	2.15
QPSK	1/2	0.93	2.30	2.62
QPSK	2/3	1.3	3.90	2.76
QPSK	3/4	1.47	5.00	3.33
QPSK	5/6	1.64	6.10	3.95
8PSK	2/3	1.75	8.20	5.77
8PSK	3/4	1.98	9.30	6.33
8PSK	5/6	2.19	11.00	7.60

4.3 Consideraciones técnicas para los cálculos de enlace

4.3.1 Especificaciones técnicas del satélite

Puesto que aún no se dispone de un satélite de alto rendimiento (HTS) con cobertura en Sudamérica, se utilizó la órbita del satélite Amazonas 3 y el plan de frecuencia del satélite Kasat [ALT3] para efectos del análisis, para los demás datos se consideraron valores típicos de HTS disponibles en el mercado, los cuáles se muestran en la Tabla 15. Los valores de PIRE y G/T por ciudad se detallan más adelante, en la Tabla 16.

Tabla 15: Especificaciones técnicas del satélite (Elaboración propia)

Parámetro	Valor
Longitud	-61° Este
Banda de Operación:	KA
Frecuencia ascendente Gateway	29.23 GHz
Frecuencia descendente de Gateway	19.54 GHz
Frecuencia ascendente de terminal remoto	29.88 GHz
Frecuencia descendente de terminal remoto	20.08 GHz
Polarización	Circular
Ancho de banda del Beam	237.00 MHz
Atenuador de Posición (ATP)	9.0 dB
Input Back Off (IBO)	4.00 dB
Output Back Off (OBO)	3.00 dB
Densidad de Flujo de Potencia (SFD)	-92.00 dBW/m ²
Figura de Merito Satélite (G/T)*	19.00 dB/K
PIRE de saturación Beam*	62.00 dBW
Relación C/I Satélite Adyacente	24.00 dB
Relación C/I Intermodulación	22.50 dB
Relación C/I por Polarización Cruzada	22.50 dB

*Ver más detalles en el apartado PIRE y G/T, Tabla 16.

4.3.2 Especificaciones de PIRE y Figura de Mérito G/T del satélite

Se elaboró un arreglo de Beams con un patrón de cuatro colores, ver Figura 29, con las siguientes características:

- Radio de 250 Km desde el centro hasta la cobertura de -3dBW.
- A medida que el Beam se alejan de la línea ecuatorial, se hace más ovoide debido a la ubicación del satélite.
- Se consideraron 4 niveles de potencia de PIRE que van desde los 62 dBW hasta los 59 dBW en escalones de -1 dBW. Lo mismo para el parámetro G/T, que va desde los 19 dB/K hasta los 16 dB/K, ver Figura 28.

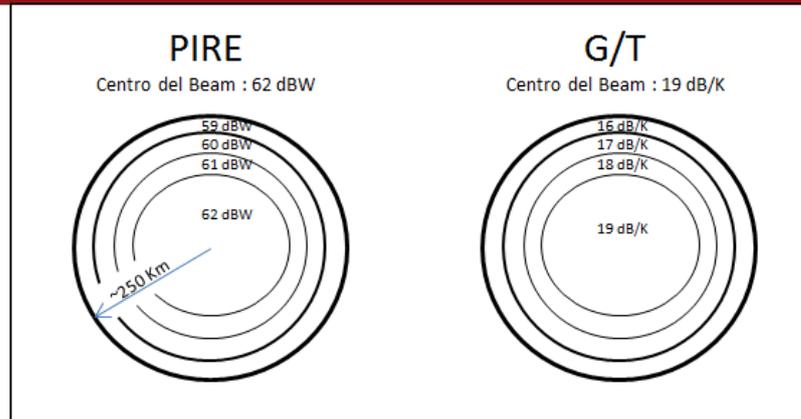


Figura 28: Características de PIRE y G/T por spot beam (Elaboración Propia)

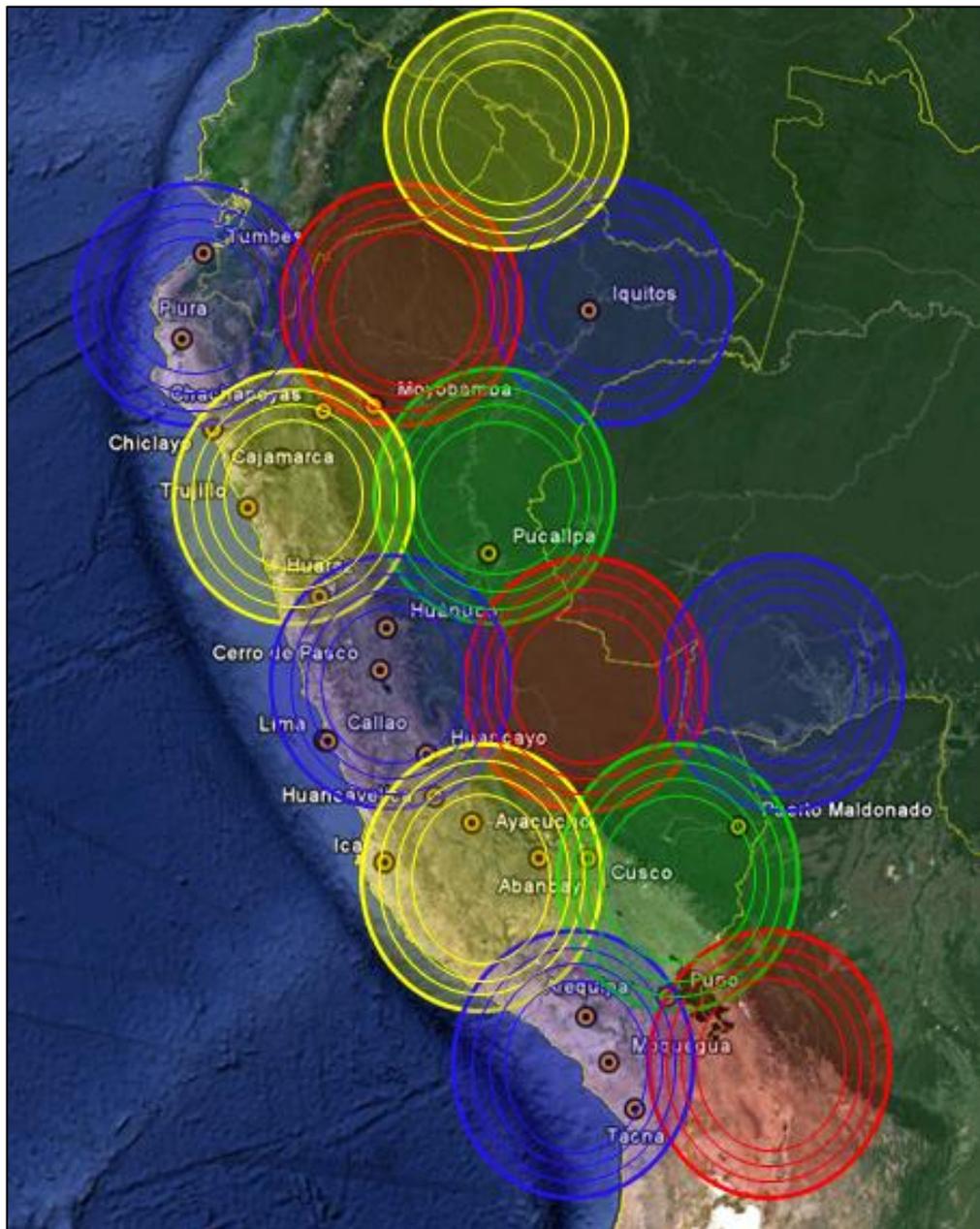


Figura 29: Arreglo de spot beams en el territorio peruano (Elaboración Propia)

En la Figura 29, apreciamos que el territorio peruano se cubre con alrededor de trece beams de 250 Km de radio. De la misma gráfica extraemos los valores de PIRE y G/T considerando los niveles de potencia que se ven reducidos frente a la potencia central (o también conocido como ventaja geográfica), los resultados se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16: Valores de PIRE y G/T por ciudad (Elaboración Propia)

N°	Ciudad	PIRE (dBW)	G/T (dB/K)
1	Moquegua	62.0	19.0
2	Tacna	62.0	19.0
3	Arequipa	62.0	19.0
4	Ica	60.0	17.0
5	Lima	61.0	18.0
6	Piura	62.0	19.0
7	Chiclayo	60.0	17.0
8	Trujillo	62.0	19.0
9	Puno	60.0	17.0
10	Tumbes	62.0	19.0
11	Abancay	62.0	19.0
12	Huancavelica	61.0	18.0
13	Cerro De Pasco	62.0	19.0
14	Huaraz	60.0	17.0
15	Cusco	61.0	18.0
16	Ayacucho	62.0	19.0
17	Huancayo	61.0	18.0
18	Cajamarca	62.0	19.0
19	Huánuco	62.0	19.0
20	Puerto Maldonado	61.0	18.0
21	Moyobamba	60.0	17.0
22	Chachapoyas	61.0	18.0
23	Pucallpa	62.0	19.0
24	Iquitos	62.0	19.0

4.3.3 Especificaciones técnicas de la portadora

Para el presente análisis se ha considerado una portadora de 120000 Kbps en el enlace Outbound (tamaño de portadora usualmente utilizado para la prestación servicios de Banda Ka) y para los enlaces Inbound se analizaron portadoras de 2048, 4096, 6144, 8192 y 10240 Kbps.

Mediante la ecuación (1.3) referente al ancho de banda de una señal digital, calculamos la cantidad de KHz que ocupa cada portadora por cada esquema de modulación y codificación (ModCod) operables en el estándar DVB, los resultados se muestran en la Tabla 17.

$$BW_{KHz} = \frac{\text{Bitrate} (1 + \text{Rolloff})}{(\text{FEC})(Im)} \times K_{Ext} \text{ KHz} \quad (1.3)$$

Dónde:

Bitrate : Es la velocidad de información en Kbps.

Im : Índice de modulación.

Rolloff : Es el factor de expansión del espectro debido a la respuesta de los filtros del módem. Para nuestro cálculo utilizaremos el valor de 0.2 para todos los casos.

FEC : tipo de codificación

K_{Ext} : Es el valor de otras codificaciones adicionales (como BCH) y cuyos valores difieren entre diversos fabricantes de tecnología terrestre. Para nuestro análisis, consideraremos $K_{Ext} = 1$.

Tabla 17: Ancho de banda en KHz ocupado por esquema de modulación y codificación
(Elaboración Propia)

Modulación	FEC	Im	BW KHz					
			Outbound 120000 Kbps	Inbound 2048 Kbps	Inbound 4096 Kbps	Inbound 6144 Kbps	Inbound 8192 Kbps	Inbound 10240 Kbps
QPSK	1/4	2	288000	4915	9830	14746	19661	24576
QPSK	1/3	2	216000	3686	7373	11059	14746	18432
QPSK	2/5	2	180000	3072	6144	9216	12288	15360
QPSK	1/2	2	144000	2458	4915	7373	9830	12288
QPSK	3/5	2	120000	2048	4096	6144	8192	10240
QPSK	2/3	2	108000	1843	3686	5530	7373	9216
QPSK	3/4	2	96000	1638	3277	4915	6554	8192
QPSK	4/5	2	90000	1536	3072	4608	6144	7680
QPSK	5/6	2	86400	1475	2949	4424	5898	7373
QPSK	8/9	2	81000	1382	2765	4147	5530	6912
QPSK	9/10	2	80000	1365	2731	4096	5461	6827
8PSK	3/5	3	80000	1365	2731	4096	5461	6827
8PSK	2/3	3	72000	1229	2458	3686	4915	6144
8PSK	3/4	3	64000	1092	2185	3277	4369	5461
8PSK	5/6	3	57600	983	1966	2949	3932	4915
8PSK	8/9	3	54000	922	1843	2765	3686	4608
8PSK	9/10	3	53333	910	1820	2731	3641	4551
16APSK	2/3	4	54000	922	1843	2765	3686	4608
16APSK	3/4	4	48000	819	1638	2458	3277	4096
16APSK	4/5	4	45000	768	1536	2304	3072	3840
16APSK	5/6	4	43200	737	1475	2212	2949	3686
16APSK	8/9	4	40500	691	1382	2074	2765	3456
16APSK	9/10	4	40000	683	1365	2048	2731	3413
32APSK	3/4	4	48000	819	1638	2458	3277	4096
32APSK	4/5	4	45000	768	1536	2304	3072	3840
32APSK	5/6	4	43200	737	1475	2212	2949	3686
32APSK	8/9	4	40500	691	1382	2074	2765	3456
32APSK	8/9	4	40000	683	1365	2048	2731	3413

4.3.4 Cálculos de la distancia entre la estación y el satélite

Es otro de los valores importantes a calcular, puesto que es un parámetro de entrada para el cálculo de las pérdidas por dispersión y de espacio libre. Utilizaremos la ecuación (1.4) para obtener las distancias entre cada ciudad y el satélite, los resultados se plasman en la Tabla 18.

$$D = \left(R_t^2 + D_{t-s}^2 - 2R_t D_{t-s} \sin \left[\theta + \sin^{-1} \frac{D_{t-s}}{R_t} \cos \theta \right] \right)^{1/2} \text{ Km}$$

Dónde:

D_{t-s} : Distancia entre el centro de la tierra y el satélite, 42164 Km según [TOM3].

R_t : Radio promedio de la tierra, 6278 Km según [TOM03].

θ : Ángulo de elevación

Tabla 18: Distancia entre las estaciones en tierra y el satélite

N°	Ubicación	Distancia al satélite (Km)
1	Moquegua	36226.6
2	Tacna	36245.6
3	Arequipa	36211.6
4	Ica	36249.5
5	Lima	36234.2
6	Piura	36249.5
7	Chiclayo	36234.2
8	Trujillo	36222.8
9	Puno	36157.8
10	Tumbes	36226.6
11	Abancay	36150.8
12	Huancavelica	36186.0
13	Cerro De Pasco	36175.3
14	Huaraz	36193.3
15	Cusco	36127.2
16	Ayacucho	36175.3
17	Huancayo	36175.3
18	Cajamarca	36186.0
19	Huánuco	36157.8
20	Puerto Maldonado	36040.3
21	Moyobamba	36114.0
22	Chachapoyas	36150.8
23	Pucallpa	36072.9
24	Iquitos	35973.3

4.3.5 Cálculo y estimación de pérdidas

4.3.5.1 Atenuación por lluvia

Extraemos los valores de atenuación por lluvia desarrollados en el Capítulo 3 para 0.1%, 0.5% y 1% de probabilidad de lluvia, y calculamos con el mismo procedimiento la atenuación para 1.5% y 2% para el enlace de transmisión (30

GHz) y recepción (20 GHz), los valores se aprecian en la Tabla 19. Estos datos nos servirán para el cálculo de disponibilidad en cada localidad, cuyos resultados revisaremos más adelante en este mismo capítulo.

Se ha considerado ese rango puesto que la atenuación en probabilidades de lluvia por debajo de 0.1% se vuelve muy elevada y la atenuación para probabilidades de lluvia por encima de 2%, si bien son bajas, afectan la disponibilidad de los servicios por debajo de 98%.

Tabla 19: Atenuación por lluvia por ciudad a 20 GHz y 30 GHz (Elaboración propia)

N°	Ubicación	A(2%) dB		A(1.5%) dB		A(1%) dB		A(0.5%) dB		A(0.1%) dB	
		30 GHz	20 GHz	30 GHz	20 GHz	30 GHz	20 GHz	30 GHz	20 GHz	30 GHz	20 GHz
1	Moquegua	0.62	0.23	0.77	0.29	1.02	0.39	1.92	0.76	5.06	2.11
2	Tacna	1.05	0.39	1.28	0.49	1.70	0.65	3.13	1.24	7.99	3.34
3	Arequipa	0.66	0.25	0.81	0.32	1.08	0.43	2.05	0.83	5.38	2.30
4	Ica	1.37	0.53	1.68	0.65	2.21	0.87	4.20	1.69	10.56	4.49
5	Lima	1.63	0.64	1.99	0.79	2.62	1.05	5.05	2.07	12.58	5.46
6	Piura	2.11	0.88	2.57	1.08	3.36	1.43	6.84	2.97	16.87	7.70
7	Chiclayo	2.23	0.92	2.71	1.13	3.54	1.50	7.10	3.07	17.45	7.94
8	Trujillo	2.52	1.04	3.06	1.28	3.99	1.69	7.89	3.42	19.21	8.78
9	Puno	0.79	0.33	0.97	0.41	1.28	0.55	2.44	1.06	6.34	2.90
10	Tumbes	2.92	1.23	3.55	1.51	4.62	1.99	9.47	4.17	22.92	10.61
11	Abancay	1.88	0.80	2.29	0.99	3.01	1.31	5.71	2.55	14.11	6.61
12	Huancavelica	0.95	0.42	1.16	0.52	1.54	0.69	2.99	1.37	7.70	3.71
13	Cerro De Pasco	0.66	0.30	0.81	0.37	1.08	0.49	2.16	1.01	5.69	2.78
14	Huaraz	1.33	0.59	1.63	0.72	2.15	0.96	4.27	1.95	10.78	5.18
15	Cusco	1.23	0.54	1.51	0.67	1.99	0.89	3.82	1.74	9.69	4.64
16	Ayacucho	1.84	0.80	2.25	0.98	2.94	1.30	5.61	2.53	13.89	6.59
17	Huancayo	1.36	0.60	1.66	0.74	2.19	0.98	4.24	1.94	10.69	5.13
18	Cajamarca	2.00	0.88	2.43	1.08	3.18	1.43	6.39	2.92	15.80	7.58
19	Huánuco	2.93	1.27	3.56	1.55	4.64	2.05	9.00	4.06	21.73	10.28
20	Puerto Maldonado	4.62	1.94	5.58	2.37	7.21	3.10	13.58	5.96	31.87	14.73
21	Moyobamba	4.08	1.76	4.94	2.14	6.40	2.81	12.79	5.75	30.34	14.32
22	Chachapoyas	2.73	1.20	3.31	1.47	4.32	1.94	8.69	4.00	21.10	10.18
23	Pucallpa	5.68	2.42	6.85	2.94	8.83	3.84	17.17	7.63	39.91	18.64
24	Iquitos	6.72	2.86	8.09	3.48	10.41	4.53	21.16	9.41	48.83	22.82

4.3.5.2 Pérdidas de espacio Libre

La pérdida de espacio libre se determina a partir de la frecuencia y la distancia de los cuerpos hacia la tierra, mediante la ecuación (1.5) del Capítulo I.

$$L_{EL} (dB) = 20 \log_{10} F + 20 \log_{10} D + 92.45$$

Dónde:

F: Frecuencia de operación del enlace en GHz, ver Tabla 15.

D: Distancia de la estación terrena hasta el satélite en Km, ver Tabla 18.

Tabla 20: Pérdidas de espacio libre por ciudad (Elaboración propia)

N°	Ubicación	Vsat – Satélite 29.88 GHz	Satélite – Vsat 20.08 GHz
1	Moquegua	213.14	209.69
2	Tacna	213.14	209.69
3	Arequipa	213.13	209.68
4	Ica	213.14	209.69
5	Lima	213.14	209.69
6	Piura	213.14	209.69
7	Chiclayo	213.14	209.69
8	Trujillo	213.14	209.68
9	Puno	213.12	209.67
10	Tumbes	213.14	209.69
11	Abancay	213.12	209.67
12	Huancavelica	213.13	209.68
13	Cerro De Pasco	213.13	209.67
14	Huaraz	213.13	209.68
15	Cusco	213.11	209.66
16	Ayacucho	213.13	209.67
17	Huancayo	213.13	209.67
18	Cajamarca	213.13	209.68
19	Huánuco	213.12	209.67
20	Puerto Maldonado	213.09	209.64
21	Moyobamba	213.11	209.66
22	Chachapoyas	213.12	209.67
23	Pucallpa	213.10	209.65
24	Iquitos	213.08	209.62

Para fines del análisis, se está considerando ubicar la Estación Terrena en una zona con las mejores condiciones de atenuación y cuya ubicación se encuentre cercana al backbone de fibra con salida internacional, por lo que tomaremos las coordenadas y atenuación por lluvia de la ciudad de Moquegua como referente.

N°	Ubicación	ET – Satélite 29.23 GHz	Satélite – ET 19.54 GHz
1	Estación Terrena	212.95	209.45

4.3.5.3 Pérdidas por dispersión

La calcularemos mediante la ecuación (1.6), los resultados los mostramos en la Tabla 18.

4.3.5.4 Pérdidas adicionales

En [RAM07] hacen referencia a tres tipos de pérdidas adicionales:

- Pérdidas por apuntamiento, L_{ap} , las cuales se deben a un posible error de apuntamiento en Tierra, se considera 0.3 dB como valor promedio.

- Pérdidas por absorción atmosférica, L_{abs} , es la degradación de la potencia debido a las partículas ionizadas de la atmósfera, se puede calcular pero se tomará como valor 0.5 dB.
- Pérdidas por el polarizador, L_{pol} , se considera que el polarizador instalado en la antena puede inducir a un margen de error, la cual se puede considerar de 0.2 dB.

La Tabla 21 muestra los valores de pérdidas por dispersión y pérdidas adicionales por ciudad.

Tabla 21: Pérdidas por dispersión y pérdidas adicionales por ciudad

Nº	Ubicación	L_{ap}	L_{pol}	L_{abs}	L_{disp}
1	Moquegua	0.3	0.2	0.5	162.17
2	Tacna	0.3	0.2	0.5	162.18
3	Arequipa	0.3	0.2	0.5	162.17
4	Ica	0.3	0.2	0.5	162.18
5	Lima	0.3	0.2	0.5	162.17
6	Piura	0.3	0.2	0.5	162.18
7	Chiclayo	0.3	0.2	0.5	162.17
8	Trujillo	0.3	0.2	0.5	162.17
9	Puno	0.3	0.2	0.5	162.16
10	Tumbes	0.3	0.2	0.5	162.17
11	Abancay	0.3	0.2	0.5	162.15
12	Huancavelica	0.3	0.2	0.5	162.16
13	Cerro De Pasco	0.3	0.2	0.5	162.16
14	Huaraz	0.3	0.2	0.5	162.16
15	Cusco	0.3	0.2	0.5	162.15
16	Ayacucho	0.3	0.2	0.5	162.16
17	Huancayo	0.3	0.2	0.5	162.16
18	Cajamarca	0.3	0.2	0.5	162.16
19	Huánuco	0.3	0.2	0.5	162.16
20	Puerto Maldonado	0.3	0.2	0.5	162.13
21	Moyobamba	0.3	0.2	0.5	162.15
22	Chachapoyas	0.3	0.2	0.5	162.15
23	Pucallpa	0.3	0.2	0.5	162.14
24	Iquitos	0.3	0.2	0.5	162.11

4.3.6 Especificaciones técnicas de la estación terrena y del terminal remoto

Para la cadena de RF se consideraron las especificaciones del fabricante SatCom Technologies, tanto para la estación terrena como para el terminal remoto, ver Tabla 22 y Anexos 4 y 5 para mayor detalle. Por otro lado se consideraron valores típicos para las pérdidas del HPA y del tramo Antena HPA.

No se consideró una marca particular para los equipos indoor como el Módem y de Banda Base puesto que el análisis se basa en la utilización de estándares abiertos DVB, utilizado por la mayoría de fabricantes.

Tabla 22: Especificaciones de RF de la estación terrena y terminal remoto

Parámetro	Estación Terrena	Terminal remoto
Tipo	Cassegrain	Offset
Diámetro	8.1 m	0.74 m
Polarización	Circular	Circular
Ganancia de antena en transmisión (Gtx)	64.7 dBi	45.3 dBi
Ganancia de antena en recepción (Grx)	62.1 dBi	42.1 dBi
Temperatura total del sistema en °K	111.0 °K	90.0 °K
Temperatura total del sistema en dBK	20.45 dBK	19.54 dBK
Potencia del HPA	200 W	2 W
Pérdidas tramo Antena - HPA	1.0 dB	0.5 dB

4.3.7 Cálculo de PIRE del terminal remoto

Utilizamos la ecuación (1.1) y los datos de la Tabla 22.

$$PIRE_{TR} = G_{TX} + 10 \log P_{HPA} - L_{HPA} \quad dB$$

Dónde:

G_{TX} : Ganancia de antena del terminal remoto, en dBi

P_{HPA} : Potencia del HPA o BUC del terminal remoto.

L_{HPA} : Pérdidas en el tramo Antena – HPA, en dB.

Reemplazando tenemos,

$$PIRE_{TR} = 47.81 \text{ dB}$$

4.3.8 Cálculo de PIRE de la estación terrena

Lo calculamos mediante la ecuación (1.7) y los datos de la Tabla 15.

$$PIRE_{ET} = SFD + L_{EL\ ASC} - 20 \log F - 21.46 \quad dB$$

Dónde:

SFD : Densidad de flujo de saturación del satélite

$L_{EL\ ASC}$: Es el valor de la pérdida de espacio libre en el tramo ascendente.

F : Frecuencia de operación en GHz.

Reemplazando tenemos,

$$PIRE_{ET} = 70.17 \text{ dB}$$

4.3.9 Cálculo de G/T de la estación terrena y terminal remoto

Utilizamos la ecuación (1.2) para determinar los valores de G/T a diversas tasas de probabilidad de lluvia de la Tabla 19 y durante el tiempo en el que el cielo está despejado, libre de atenuación por precipitaciones. Los resultados se muestran en la Tabla 23.

$$\frac{G}{T} = G_{RX} - 10 \log_{10}(T_s + \Delta T) \text{ dB/K}$$

Dónde:

T_s : Es la temperatura en °K del sistema ($T_s = T_{LNA} + T_{ANTENA}$).

$$\Delta T = 275 \left(1 - \text{antilog} \left(\frac{-A_{desc}}{10} \right) \right) \text{ °K}$$

A_{desc} : Es el margen de atenuación por lluvia del tramo Satélite – Vsat. Se utilizaron los valores de la Tabla 19 a 20 GHz.

Tabla 23: G/T de la ET y terminal remoto por ciudad durante cielo despejado y a diversas tasas de probabilidad de lluvia (Elaboración propia)

Nº	Ubicación	Cielo despejado	G/T con A(2%)	G/T con A(1.5%)	G/T con A(1%)	G/T con A(0.5%)	G/T con A(0.1%)
1	Moquegua	22.56	21.92	21.78	21.54	20.83	19.19
2	Tacna	22.56	21.54	21.34	21.01	20.11	18.34
3	Arequipa	22.56	21.86	21.71	21.46	20.71	19.02
4	Ica	22.56	21.26	21.02	20.65	19.58	17.83
5	Lima	22.56	21.04	20.78	20.37	19.22	17.53
6	Piura	22.56	20.63	20.33	19.87	18.56	17.07
7	Chiclayo	22.56	20.56	20.25	19.79	18.49	17.04
8	Trujillo	22.56	20.37	20.05	19.58	18.30	16.93
9	Puno	22.56	21.69	21.51	21.22	20.35	18.60
10	Tumbes	22.56	20.12	19.78	19.29	17.96	16.77
11	Abancay	22.56	20.75	20.46	20.01	18.84	17.26
12	Huancavelica	22.56	21.49	21.28	20.94	19.94	18.16
13	Cerro De Pasco	22.56	21.76	21.60	21.32	20.43	18.67
14	Huaraz	22.56	21.14	20.89	20.49	19.32	17.60
15	Cusco	22.56	21.23	20.99	20.61	19.52	17.78
16	Ayacucho	22.56	20.76	20.47	20.03	18.85	17.26
17	Huancayo	22.56	21.12	20.87	20.47	19.33	17.62
18	Cajamarca	22.56	20.63	20.33	19.87	18.58	17.09
19	Huánuco	22.56	20.07	19.73	19.24	18.00	16.79
20	Puerto Maldonado	22.56	19.33	18.97	18.48	17.40	16.59
21	Moyobamba	22.56	19.51	19.15	18.65	17.45	16.60
22	Chachapoyas	22.56	20.15	19.82	19.33	18.03	16.80
23	Pucallpa	22.56	18.93	18.57	18.10	17.08	16.52
24	Iquitos	22.56	18.62	18.27	17.82	16.87	16.49
25	Estación Terrena	41.65	41.12	41.00	40.81	40.20	38.74

4.4 Pasos considerados para los cálculos de enlace

Para el desarrollo de los cálculos de enlace se han considerado los siguientes pasos:

- Se desarrollaron cuatro escenarios de cálculo: Clima despejado, lluvia en el tramo satélite – estación terrena, lluvia en el tramo satélite – terminal remoto (vsat) y lluvia en ambos lados.
- Se consideró una portadora Outbound de 120000 Kbps y portadoras Inbound de 2048, 4096, 6144, 8192 y 10240 Kbps.
- Se consideró un ajuste de potencia automático en la estación terrena, frente a condiciones de clima desfavorables, se consideró un incremento de 5 dB.
- El cálculo inicial se realizó considerando un margen de enlace total mayor a 0.5 dB y una tasa de probabilidad de lluvia de 0.5% en cada tramo.
- En los casos donde el margen de enlace fue menor a 0 dB, se realizó un ajuste en la tasa de probabilidad de lluvia del tramo vsat – satélite al nivel inmediato superior (1% o más) hasta lograr un margen mayor 0 dB por cada tamaño de portadora, de este modo también se vio afectada la disponibilidad del servicio en esta ciudad. Algunas ciudades quedaron con márgenes entre 0 y 0.5 dB, operables pero con un margen mínimo.
- Por último, para aumentar la disponibilidad de algunos puntos, se realizó un ajuste en la tasa de probabilidad de lluvia del tramo satélite – estación terrena, utilizando los datos de atenuación por lluvia al 0.1%.

4.5 Desarrollo de los cálculos de enlace

4.5.1 Cálculo de relación de portadora a ruido del enlace ascendente

En primer lugar procedemos a calcular la Relación de portadora a densidad de potencia de ruido (C/No) ascendente, la cual deducimos de la ecuación (1.8).

$$\left(\frac{C}{N_o}\right)_{ASC} = PIRE_{ET/TR} + G/T_{SAT} - K - L_{ELASC} - A_{ASC} - L\Delta \text{ (dB - Hz)} \quad (4.1)$$

Dónde:

$PIRE_{ET/TR}$: PIRE de la estación terrena o terminal remoto, dependerá el tramo a calcular (ET – Satélite o Terminal - Satélite)

G/T_{SAT} : Figura de mérito del satélite según Tabla 16.

K : Constante de Boltzman (-228.6 dB/K).

- $L_{EL ASC}$: Pérdidas de espacio libre en el tramo ascendente, dependerá el tramo a calcular (ET – Satélite o Terminal - Satélite)
- A_{ASC} : Margen de atenuación por lluvia en el enlace ascendente.
- $L\Delta$: Sumatoria de pérdidas adicionales en el sistema. Perdidas por absorción atmosférica, pérdidas por apuntamiento, pérdidas por el polarizador y feeder (1 dB).

Luego calculamos la relación de portadora a ruido ascendente utilizando la ecuación (1.9)

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{Asc} = \left(\frac{C}{N_o}\right)_{Asc} - 10 \log BW_{hz} \quad dB$$

Y por último determinamos la relación de portadora a ruido del enlace ascendente mediante la ecuación (1.10).

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{Total Asc}^{-1} = \left(\frac{C}{N}\right)_{Asc}^{-1} + \left(\frac{C}{I}\right)_{Sat Ady}^{-1} + \left(\frac{C}{I}\right)_{Im}^{-1} + \left(\frac{C}{I}\right)_{Xpol}^{-1} + \left(\frac{C}{I}\right)_{Ant Ady}^{-1} \quad (1.10)$$

Dónde:

$\left(\frac{C}{I}\right)_{Sat Ady}$: Relación de señal interferencia por satélite adyacente, ver Tabla 15.

$\left(\frac{C}{I}\right)_{Im}$: Relación de señal interferencia por intermodulación, ver Tabla 15.

$\left(\frac{C}{I}\right)_{Xpol}$: Relación de señal interferencia por polarización cruzada, ver Tabla 15.

$\left(\frac{C}{I}\right)_{Ant ady}$: Relación de señal interferencia por antena adyacente en tierra

En la Tabla 24 se muestran los resultados de C/N ascendente del sistema para una portadora de retorno de 2048 Kbps. En el Anexo 6 se muestran los resultados para portadoras de retorno de 4096 Kbps, 6144 Kbps, 8192 Kbps y 10240 Kbps.

Tabla 24: Relación de C/N ascendente para una portadora de 2048 Kbps

		Outbound = 120000 Kbps; Inbound = 2048 Kbps							
		Cielo Despejado		Lluvia ET-Sat		Lluvia Sat - Vsat		Lluvia ambos lados	
N°	Ubicación	ET-Sat	Vsat-Sat	ET-Sat	Vsat-Sat	ET - Sat	Vsat-Sat	ET - Sat	Vsat-Sat
1	Moquegua	17.74	16.47	17.13	16.47	17.77	15.74	16.69	15.74
2	Tacna	17.74	16.47	17.13	16.47	17.67	15.18	16.11	15.18
3	Arequipa	17.74	16.47	17.13	16.47	17.69	15.69	16.54	15.69
4	Ica	17.69	15.71	17.47	15.71	17.48	13.39	16.93	13.39
5	Lima	17.74	16.11	17.93	16.11	17.48	13.49	17.70	13.49
6	Piura	17.74	16.46	17.93	16.46	17.48	12.95	17.68	12.95
7	Chiclayo	17.69	15.71	17.92	15.71	17.48	13.82	17.70	13.82
8	Trujillo	17.74	16.47	17.93	16.47	17.40	11.85	17.59	11.85
9	Puno	17.69	15.72	17.47	15.72	17.64	14.49	17.04	14.49
10	Tumbes	17.74	16.47	17.93	16.47	17.22	10.16	17.41	10.16
11	Abancay	17.74	16.47	17.93	16.47	17.48	13.73	17.70	13.73
12	Huancavelica	17.74	16.12	17.57	16.12	17.64	14.74	17.04	14.74
13	Cerro De Pasco	17.74	16.47	17.13	16.47	17.67	15.65	16.54	15.65
14	Huaraz	17.69	15.71	17.92	15.71	17.40	13.35	17.65	13.35
15	Cusco	17.74	16.12	17.57	16.12	17.58	14.28	16.72	14.28
16	Ayacucho	17.74	16.47	17.93	16.47	17.48	13.78	17.70	13.78
17	Huancayo	17.74	16.12	17.57	16.12	17.58	14.02	16.72	14.02
18	Cajamarca	17.74	16.47	17.93	16.47	17.48	13.27	17.68	13.27
19	Huánuco	17.74	16.47	17.93	16.47	17.22	10.98	17.41	10.56
20	Puerto Maldonado	17.74	16.13	17.92	16.13	17.26	11.63	17.59	11.63
21	Moyobamba	17.69	15.72	17.92	15.72	17.22	11.48	17.41	11.48
22	Chachapoyas	17.74	16.12	17.47	16.12	17.48	13.97	16.82	13.97
23	Pucallpa	17.74	16.48	17.93	16.48	17.26	11.14	17.59	11.14
24	Iquitos	17.74	16.49	17.93	16.49	17.17	8.72	17.41	8.72

4.5.2 Cálculo de relación de portadora a ruido del enlace descendente

Como primer paso calculamos la relación de portadora a densidad de ruido descendente, la cual deducimos de la ecuación (1.8).

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{Desc} = PIRE_{req SAT} + G/T_{ET/TR} - K - L_{EL DESC} - A_{DESC} - L\Delta (dB - Hz) \quad (4.2)$$

Dónde:

$G/T_{ET/TR}$: Figura de mérito de la estación terrena o terminal remoto, dependerá el tramo a calcular (Satélite – ET o Satélite – Terminal), ver Tabla 23.

K : Constante de Boltzman -228.6 dBJ/°K

$L_{EL DESC}$: Pérdidas de espacio libre en el tramo descendente, dependerá el tramo a calcular (ET – Satélite o Terminal - Satélite)

A_{DESC} : Margen de atenuación por lluvia en el enlace descendente.

$L\Delta$: Sumatoria de pérdidas adicionales en el sistema. Perdidas por absorción atmosférica, pérdidas por apuntamiento, pérdidas por el polarizador y feeder (1 dB).

$PIRE_{Req SAT}$: Es la potencia que se requiere del satélite para que la señal sea bien recibida en la estación terrena. En [RAM07] se calcula mediante la siguiente ecuación. Los resultados se muestran en la Tabla 25.

$$PIRE_{Req SAT} = -SFD - ATP + IBO - L_{disp} + PIRE_{ET} - OBO - PIRE_{SATU} - L_{abs} - A - A_{DESC} \quad (4.3)$$

Donde

SFD : Densidad de flujo de saturación del satélite, ver Tabla 15.

ATP : Es la cantidad de decibeles que el atenuador disminuye a la señal de entrada del transpondedor, ver Tabla 15.

L_{disp} : Pérdidas por dispersión, Ver Tabla 21.

$PIRE_{SATU}$: Es la potencia radiada del satélite en dirección de la estación receptora, Ver Tabla 15.

IBO : Es la cantidad de dB-W que se le restan a transpondedor de su punto de saturación cuando se opera en modo de múltiples portadoras

OBO : Es la cantidad de dB que pierde el amplificador de salida del transpondedor debido a la transmisión de múltiples portadoras para poder operarlo en óptimas condiciones, ver Tabla 15.

L_{abs} : Pérdidas por absorción atmosférica, lo sacamos de la Tabla 21.

Luego calculamos la relación de portadora a ruido descendente mediante la siguiente ecuación (1.9).

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{Desc} = \left(\frac{C}{N_0}\right)_{Desc} - 10 \log BW_{hz} \quad dB$$

Y por último determinamos la relación de portadora a ruido del enlace descendente mediante la ecuación (1.10), descrita en el Capítulo I.

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{Total Desc}^{-1} = \left(\frac{C}{N}\right)_{desc}^{-1} + \left(\frac{C}{I}\right)_{Sat Ady}^{-1} + \left(\frac{C}{I}\right)_{Im}^{-1} + \left(\frac{C}{I}\right)_{Xpol}^{-1} + \left(\frac{C}{I}\right)_{Ant Ady}^{-1} \quad (1.10)$$

Tabla 25: Potencia requerida del satélite por ciudad (Elaboración propia)

N°	Enlace	Cielo despejado		$PIRE_{req SAT}$ con A(2%)		$PIRE_{req SAT}$ A(1.5%)		$PIRE_{req SAT}$ A(1%)		$PIRE_{req SAT}$ A(0.5%)		$PIRE_{req SAT}$ A(0.1%)	
		Sat Vsat	Sat ET	Sat Vsat	Sat ET	Sat Vsat	Sat ET	Sat Vsat	Sat ET	Sat Vsat	Sat ET	Sat Vsat	Sat ET
1	Moquegua	53.50	31.14	52.88	29.21	52.73	30.37	52.48	30.12	51.57	29.21	48.44	26.08
2	Tacna	53.49	31.13	52.87	28.00	52.73	29.85	52.47	29.44	51.57	28.00	48.43	23.14
3	Arequipa	53.50	31.14	52.88	29.09	52.74	30.33	52.48	30.06	51.58	29.09	48.44	25.76
4	Ica	51.49	31.13	50.87	26.94	50.73	29.46	50.47	28.93	49.57	26.94	46.43	20.58
5	Lima	52.50	31.14	51.87	26.09	51.73	29.14	51.48	28.52	50.57	26.09	47.43	18.55
6	Piura	53.49	31.13	52.87	24.29	52.73	28.57	52.47	27.77	51.57	24.29	48.43	14.27
7	Chiclayo	51.50	31.14	50.87	24.03	50.73	28.43	50.48	27.59	49.57	24.03	46.43	13.69
8	Trujillo	53.50	31.14	52.88	23.25	52.73	28.08	52.48	27.15	51.57	23.25	48.44	11.93
9	Puno	51.51	31.15	50.89	28.70	50.75	30.17	50.49	29.85	49.59	28.70	46.45	24.80
10	Tumbes	53.50	31.14	52.88	21.67	52.73	27.59	52.48	26.52	51.57	21.67	48.44	8.21
11	Abancay	53.52	31.16	52.89	25.43	52.75	28.84	52.50	28.13	51.59	25.43	48.45	17.03
12	Huancavelica	52.51	31.15	51.89	28.14	51.74	29.97	51.49	29.60	50.58	28.14	47.45	23.43
13	Cerro De Pasco	53.51	31.15	52.89	28.98	52.74	30.33	52.49	30.06	51.59	28.98	48.45	25.45
14	Huaraz	51.51	31.15	50.88	26.87	50.74	29.50	50.49	28.99	49.58	26.87	46.44	20.36
15	Cusco	52.52	31.16	51.90	27.31	51.76	29.63	51.50	29.15	50.60	27.31	47.46	21.45
16	Ayacucho	53.51	31.15	52.89	25.53	52.74	28.89	52.49	28.19	51.59	25.53	48.45	17.25
17	Huancayo	52.51	31.15	51.89	26.90	51.74	29.48	51.49	28.95	50.59	26.90	47.45	20.44
18	Cajamarca	53.51	31.15	52.89	24.75	52.74	28.71	52.49	27.95	51.58	24.75	48.45	15.34
19	Huánuco	53.51	31.15	52.89	22.13	52.75	27.57	52.49	26.50	51.59	22.13	48.45	9.41
20	Puerto Maldonado	52.54	31.18	51.92	17.56	51.78	25.56	51.52	23.93	50.62	17.56	47.48	-
21	Moyobamba	51.52	31.16	50.90	18.35	50.76	26.20	50.50	24.74	49.60	18.35	46.46	0.80
22	Chachapoyas	52.52	31.16	51.89	22.45	51.75	27.82	51.50	26.82	50.59	22.45	47.45	10.04
23	Pucallpa	53.53	31.17	52.91	13.97	52.77	24.29	52.51	22.31	51.61	13.97	48.47	-
24	Iquitos	53.56	31.20	52.94	9.98	52.79	23.05	52.54	20.73	51.63	9.98	48.50	-

Dónde:

$\left(\frac{C}{I}\right)_{Sat\ Ady}$: Relación de señal interferencia por satélite adyacente, ver Tabla 15.

$\left(\frac{C}{I}\right)_{Im}$: Relación de señal interferencia por intermodulación, ver Tabla 15.

$\left(\frac{C}{I}\right)_{Xpol}$: Relación de señal interferencia por polarización cruzada, ver Tabla 15.

$\left(\frac{C}{I}\right)_{Ant\ ady}$: Relación de señal interferencia por antena adyacente en tierra.

En la Tabla 26 se muestran los resultados de C/N total descendente para una portadora de retorno de 2048 Kbps. En el Anexo 7 se muestran los resultados para portadoras de retorno de 4096 Kbps, 6144 Kbps, 8192 Kbps y 10240 Kbps.

Tabla 26: Relación de C/N descendente para una portadora de 2048 Kbps .

		Outbound = 120000 Kbps; Inbound = 2048 Kbps							
		Cielo Despejado		Lluvia ET-Sat		Lluvia Sat - Vsat		Lluvia ambos lados	
Nº	Ubicación	ET-Sat	Vsat-Sat	ET-Sat	Vsat-Sat	ET - Sat	Vsat-Sat	ET - Sat	Vsat-Sat
1	Moquegua	15.14	17.95	8.49	17.28	13.90	17.84	4.55	16.85
2	Tacna	15.14	17.95	8.49	17.28	12.41	17.73	1.68	16.50
3	Arequipa	15.14	17.95	8.50	17.28	13.25	17.83	3.87	16.82
4	Ica	13.70	17.95	8.36	17.51	8.72	17.62	1.36	16.61
5	Lima	14.61	17.95	13.08	17.81	8.94	17.51	6.00	17.11
6	Piura	15.14	17.95	13.74	17.81	8.45	17.20	5.30	16.66
7	Chiclayo	13.70	17.95	12.24	17.81	9.07	17.69	6.13	17.40
8	Trujillo	15.14	17.95	13.75	17.81	7.34	16.85	3.87	16.16
9	Puno	13.71	17.95	8.38	17.51	10.98	17.80	3.18	17.07
10	Tumbes	15.14	17.95	13.75	17.81	5.42	16.20	1.60	15.26
11	Abancay	15.15	17.95	13.76	17.82	9.09	17.41	6.15	16.97
12	Huancavelica	14.61	17.95	9.90	17.51	11.20	17.75	3.44	16.94
13	Cerro De Pasco	15.15	17.95	8.51	17.28	12.82	17.82	3.44	16.79
14	Huaraz	13.70	17.95	12.24	17.81	7.80	17.61	4.84	17.27
15	Cusco	14.62	17.95	9.91	17.51	10.15	17.66	1.48	16.73
16	Ayacucho	15.15	17.95	13.76	17.81	9.10	17.42	6.17	16.99
17	Huancayo	14.62	17.95	9.90	17.51	9.81	17.61	1.09	16.60
18	Cajamarca	15.15	17.95	13.75	17.81	8.52	17.29	5.38	16.79
19	Huánuco	15.15	17.95	13.76	17.82	5.58	16.54	1.77	15.49
20	Puerto Maldonado	14.63	17.96	12.99	17.82	6.19	17.03	3.43	16.41
21	Moyobamba	13.72	17.95	12.26	17.82	5.50	17.20	1.67	16.66
22	Chachapoyas	14.62	17.95	9.27	17.51	9.17	17.60	1.46	16.58
23	Pucallpa	15.16	17.96	13.77	17.82	6.06	16.60	3.30	15.80
24	Iquitos	15.17	17.96	13.79	17.82	4.74	15.51	1.17	14.36

4.5.3 Relación de C/N requerido en el sistema

De la ecuación (1.3) en (1.12), podemos predecir la ecuación correspondiente al C/N mínimo requerido por cada enlace para entrar en operación. En la Tabla 27 se muestran los valores de C/N requeridos por cada tipo de modulación y codificación disponibles para los enlaces Outbound e Inbound.

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{Req} = \frac{Eb}{No} \cdot \frac{Bitrate}{BW_{Khz}}$$

Reemplazando BW_{Khz} por la ecuación (1.12) en dB tenemos,

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{Req} (dB) = \frac{Eb}{No} + 10 \log\left(\frac{Im \times FEC}{1 + Rolloff}\right) \quad (4.4)$$

Dónde:

Eb/No : Relación de energía de bit a densidad de ruido, ver Tablas 13 y 14.

Bitrate : Es la velocidad de información en Kbps

Im : Índice de modulación

Rolloff : Para nuestro cálculo utilizaremos el valor de 0.2 en todos los casos.

FEC : es la codificación seleccionada para el esquema de modulación.

Tabla 27: C/N requerido por tipo de modulación y codificación disponibles para el enlace Outbound e Inbound.

Outbound			Inbound		
Modulación	FEC	C/N Req.	Modulación	FEC	C/N Req.
QPSK	1/2	0.26	QPSK	1/2	1.82
QPSK	3/5	1.48	QPSK	2/3	3.22
QPSK	2/3	2.34	QPSK	3/4	4.30
QPSK	3/4	3.27	QPSK	5/6	5.38
QPSK	4/5	3.92	8PSK	2/3	7.99
QPSK	5/6	4.42	8PSK	3/4	9.06
QPSK	8/9	5.44	8PSK	5/6	10.78
QPSK	9/10	5.66			
8PSK	3/5	4.76			
8PSK	2/3	5.87			
8PSK	3/4	7.16			
8PSK	5/6	8.60			
8PSK	8/9	9.93			
8PSK	9/10	10.22			
16APSK	2/3	8.23			
16APSK	3/4	9.47			
16APSK	4/5	10.29			
16APSK	5/6	10.86			
16APSK	8/9	12.14			
16APSK	9/10	12.38			
32APSK	3/4	11.99			
32APSK	4/5	12.90			
32APSK	5/6	13.54			
32APSK	8/9	14.94			
32APSK	9/10	15.30			

4.6 Resultados finales de los cálculos de enlace

4.6.1 Resultados de C/N total del sistema

El resultado total de C/N del sistema lo obtenemos de la ecuación (1.11), para lo cual utilizamos los datos de C/N ascendente y C/N descendente de las Tablas 24 y 26 respectivamente.

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{Total\ Sistema} = 10 \log \left[\frac{1}{\frac{1}{antiLog\left(\frac{C/N_{ASC}}{10}\right)} + \frac{1}{antiLog\left(\frac{C/N_{DESC}}{10}\right)}} \right] \text{ dB}$$

En la Tabla 28 se muestran los resultados de C/N total del sistema para una portadora de retorno de 2048 Kbps. En el Anexo 8 se muestran los resultados para portadoras de retorno de 4096 Kbps, 6144 Kbps, 8192 Kbps y 10240 Kbps.

Tabla 28: Relación de C/N total del sistema para una portadora de 2048 Kbps

		Outbound = 120000 Kbps; Inbound = 2048 Kbps							
		Cielo Despejado		Lluvia ET-Sat		Lluvia Sat - Vsat		Lluvia ambos lados	
Nº	Ubicación	ET-Sat	Vsat-Sat	ET-Sat	Vsat-Sat	ET - Sat	Vsat-Sat	ET - Sat	Vsat-Sat
1	Moquegua	13.24	14.14	7.94	13.84	12.40	13.65	4.30	13.25
2	Tacna	13.24	14.14	7.93	13.84	11.28	13.26	1.52	12.78
3	Arequipa	13.24	14.14	7.94	13.85	11.92	13.62	3.65	13.21
4	Ica	12.24	13.68	7.86	13.51	8.18	12.00	1.24	11.70
5	Lima	12.89	13.93	11.85	13.87	8.37	12.04	5.71	11.93
6	Piura	13.24	14.14	12.34	14.08	7.94	11.56	5.06	11.41
7	Chiclayo	12.24	13.68	11.20	13.63	8.48	12.33	5.84	12.24
8	Trujillo	13.24	14.14	12.34	14.08	6.94	10.66	3.69	10.48
9	Puno	12.25	13.68	7.88	13.51	10.13	12.83	3.01	12.58
10	Tumbes	13.24	14.14	12.34	14.08	5.14	9.20	1.49	8.99
11	Abancay	13.24	14.14	12.35	14.08	8.50	12.18	5.86	12.04
12	Huancavelica	12.89	13.93	9.21	13.75	10.31	12.98	3.25	12.69
13	Cerro De Pasco	13.24	14.14	7.95	13.85	11.59	13.59	3.23	13.17
14	Huaraz	12.24	13.68	11.20	13.63	7.35	11.97	4.61	11.87
15	Cusco	12.90	13.93	9.22	13.75	9.43	12.64	1.35	12.32
16	Ayacucho	13.24	14.14	12.35	14.08	8.51	12.22	5.87	12.09
17	Huancayo	12.89	13.93	9.21	13.75	9.14	12.44	0.97	12.11
18	Cajamarca	13.24	14.14	12.35	14.08	8.00	11.82	5.13	11.67
19	Huánuco	13.24	14.14	12.35	14.08	5.30	9.92	1.65	9.35
20	Puerto Maldonado	12.91	13.94	11.78	13.88	5.86	10.53	3.27	10.39
21	Moyobamba	12.25	13.69	11.21	13.63	5.21	10.45	1.56	10.33
22	Chachapoyas	12.90	13.93	8.66	13.75	8.57	12.41	1.33	12.07
23	Pucallpa	13.25	14.14	12.36	14.09	5.75	10.05	3.14	9.86
24	Iquitos	13.26	14.15	12.37	14.09	4.50	7.89	1.07	7.67

4.6.2 Margen de enlace alcanzado por ciudad

El margen de enlace viene a ser el excedente entre el C/N total del sistema y el C/N requerido según la siguiente ecuación. Para fines del análisis, se consideró una provisión por degradaciones adicionales de 0.5 dB.

$$\text{Margen de Enlace} = \left(\frac{C}{N}\right)_{\text{Total Sistema}} - \left(\frac{C}{N}\right)_{\text{Req}} - 0.5 \text{ dB} \quad (4.5)$$

En la Tabla 29 se muestran los resultados del margen de enlace y modcod (modulación y codificación) alcanzado para la portadora Outbound de 120000 Kbps en los cuatro escenarios analizados, y en la Tabla 30 se muestran los mismos resultados para una portadora de retorno de 2048 Kbps. En el Anexo 9 podemos apreciar mayor detalle con los resultados para portadoras de retorno de 4096 Kbps, 6144 Kbps, 8192 Kbps y 10240 Kbps.

Además, en el Anexo 10 se muestra, a modo de ejemplo, el cálculo de enlace de la localidad de Arequipa para una portadora de retorno de 2048 Kbps.

4.6.3 Resultados de Disponibilidad

La disponibilidad del enlace tiene relación directa con la tasa de probabilidad de lluvia con la que se pretende operar un servicio. Por ejemplo se tenemos un enlace con una Tasa de lluvia al 0.1% anual, significa que hemos dividido el año en intervalos de 8.76 horas y nos hemos quedado con el intervalo de mayor precipitación, ahora si tomamos este plazo como referencia de indisponibilidad, tenemos que durante el resto del año no habrá otro intervalo que supere esa atenuación, por lo tanto la disponibilidad de este tramo será de 99.9%. La disponibilidad del total del enlace se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$\text{Disponibilidad}_{\text{ENLACE OUT/IN}} = \text{Disp}_{\text{ASCENDENTE}} \times \text{Disp}_{\text{DESCENDENTE}} \quad (4.6)$$

4.6.3.1 Disponibilidad alcanzada en el enlace Outbound

La figura 30 muestra los resultados de disponibilidad máxima del enlace Outbound por ciudad, considerando las premisas de diseño. Se aprecia que las localidades con menores índices de disponibilidad se encuentran en la Selva Peruana, llegando a 98.5% de disponibilidad, esto sin duda se debe al nivel de atenuación que se tiene debido a las lluvias en esas zonas. El caso de Chiclayo se debe principalmente al diseño realizado en la pisada del satélite, puesto que se ubica en el borde del Beam a una cobertura de -3 dB.

Tabla 29: Margen de enlace y ModCod alcanzado en la portadora Outbound de 120000 Kbps (Elaboración propia)

		Outbound = 120000 Kbps							
		Cielo Despejado		Lluvia ET-Sat		Lluvia Sat - Vsat		Lluvia ambos lados	
N°	Ubicación	Margen	ModCod	Margen	ModCod	Margen	ModCod	Margen	ModCod
1	Moquegua	0.75	32APSK 3/4	0.28	8PSK 3/4	0.65	16APSK 4/5	0.52	QPSK 3/4
2	Tacna	0.75	32APSK 3/4	0.27	8PSK 3/4	0.49	16APSK 4/5	0.77	QPSK 1/2
3	Arequipa	0.75	32APSK 3/4	0.28	8PSK 3/4	0.56	16APSK 5/6	0.80	QPSK 2/3
4	Ica	0.88	16APSK 5/6	0.20	8PSK 3/4	0.52	8PSK 3/4	0.48	QPSK 1/2
5	Lima	0.40	32APSK 3/4	0.49	16APSK 5/6	0.71	8PSK 3/4	0.80	QPSK 5/6
6	Piura	0.75	32APSK 3/4	0.98	16APSK 5/6	0.28	8PSK 3/4	0.64	QPSK 4/5
7	Chiclayo	0.88	16APSK 5/6	0.41	16APSK 4/5	0.82	8PSK 3/4	0.92	QPSK 5/6
8	Trujillo	0.75	32APSK 3/4	0.99	16APSK 5/6	0.57	8PSK 2/3	0.84	QPSK 2/3
9	Puno	0.89	16APSK 5/6	0.22	8PSK 3/4	0.16	16APSK 3/4	0.16	QPSK 2/3
10	Tumbes	0.75	32APSK 3/4	0.99	16APSK 5/6	0.73	QPSK 4/5	0.73	QPSK 1/2
11	Abancay	0.76	32APSK 3/4	0.99	16APSK 5/6	0.84	8PSK 3/4	0.94	QPSK 5/6
12	Huancavelica	0.40	32APSK 3/4	0.48	16APSK 2/3	0.34	16APSK 3/4	0.41	QPSK 2/3
13	Cerro De Pasco	0.75	32APSK 3/4	0.29	8PSK 3/4	0.80	16APSK 4/5	0.39	QPSK 2/3
14	Huaraz	0.89	16APSK 5/6	0.41	16APSK 4/5	0.98	8PSK 2/3	0.84	QPSK 3/4
15	Cusco	0.41	32APSK 3/4	0.49	16APSK 2/3	0.70	16APSK 2/3	0.59	QPSK 1/2
16	Ayacucho	0.75	32APSK 3/4	0.99	16APSK 5/6	0.85	8PSK 3/4	0.95	QPSK 5/6
17	Huancayo	0.40	32APSK 3/4	0.49	16APSK 2/3	0.41	16APSK 2/3	0.21	QPSK 1/2
18	Cajamarca	0.75	32APSK 3/4	0.99	16APSK 5/6	0.34	8PSK 3/4	0.71	QPSK 4/5
19	Huánuco	0.76	32APSK 3/4	0.99	16APSK 5/6	0.88	QPSK 4/5	0.89	QPSK 1/2
20	Puerto Maldonado	0.42	32APSK 3/4	0.99	16APSK 4/5	0.94	QPSK 5/6	0.42	QPSK 2/3
21	Moyobamba	0.90	16APSK 5/6	0.42	16APSK 4/5	0.79	QPSK 4/5	0.80	QPSK 1/2
22	Chachapoyas	0.41	32APSK 3/4	1.00	8PSK 3/4	0.91	8PSK 3/4	0.57	QPSK 1/2
23	Pucallpa	0.76	32APSK 3/4	1.00	16APSK 5/6	0.83	QPSK 5/6	0.30	QPSK 2/3
24	Iquitos	0.77	32APSK 3/4	1.01	16APSK 5/6	0.72	QPSK 3/4	0.31	QPSK 1/2

Tabla 30: Margen de enlace y ModCod alcanzado en la portadora Inbound de 2048 Kbps (Elaboración propia)

		Inbound = 2048 Kbps							
N°	Ubicación	Cielo Despejado		Lluvia ET-Sat		Lluvia Sat - Vsat		Lluvia ambos lados	
		Margen	ModCod	Margen	ModCod	Margen	ModCod	Margen	ModCod
1	Moquegua	2.85	8PSK 5/6	2.56	8PSK 5/6	2.37	8PSK 5/6	1.97	8PSK 5/6
2	Tacna	2.85	8PSK 5/6	2.56	8PSK 5/6	1.97	8PSK 5/6	1.49	8PSK 5/6
3	Arequipa	2.85	8PSK 5/6	2.56	8PSK 5/6	2.33	8PSK 5/6	1.92	8PSK 5/6
4	Ica	2.39	8PSK 5/6	2.22	8PSK 5/6	0.71	8PSK 5/6	0.41	8PSK 5/6
5	Lima	2.64	8PSK 5/6	2.58	8PSK 5/6	0.75	8PSK 5/6	0.64	8PSK 5/6
6	Piura	2.85	8PSK 5/6	2.79	8PSK 5/6	0.28	8PSK 5/6	0.12	8PSK 5/6
7	Chiclayo	2.39	8PSK 5/6	2.34	8PSK 5/6	1.04	8PSK 5/6	0.95	8PSK 5/6
8	Trujillo	2.85	8PSK 5/6	2.79	8PSK 5/6	1.10	8PSK 3/4	0.92	8PSK 3/4
9	Puno	2.40	8PSK 5/6	2.23	8PSK 5/6	1.54	8PSK 5/6	1.30	8PSK 5/6
10	Tumbes	2.85	8PSK 5/6	2.79	8PSK 5/6	0.71	8PSK 2/3	0.50	8PSK 2/3
11	Abancay	2.85	8PSK 5/6	2.79	8PSK 5/6	0.89	8PSK 5/6	0.75	8PSK 5/6
12	Huancavelica	2.64	8PSK 5/6	2.46	8PSK 5/6	1.69	8PSK 5/6	1.40	8PSK 5/6
13	Cerro De Pasco	2.85	8PSK 5/6	2.56	8PSK 5/6	2.30	8PSK 5/6	1.88	8PSK 5/6
14	Huaraz	2.39	8PSK 5/6	2.34	8PSK 5/6	0.68	8PSK 5/6	0.59	8PSK 5/6
15	Cusco	2.65	8PSK 5/6	2.47	8PSK 5/6	1.35	8PSK 5/6	1.03	8PSK 5/6
16	Ayacucho	2.85	8PSK 5/6	2.79	8PSK 5/6	0.93	8PSK 5/6	0.80	8PSK 5/6
17	Huancayo	2.64	8PSK 5/6	2.46	8PSK 5/6	1.15	8PSK 5/6	0.82	8PSK 5/6
18	Cajamarca	2.85	8PSK 5/6	2.79	8PSK 5/6	0.53	8PSK 5/6	0.38	8PSK 5/6
19	Huánuco	2.85	8PSK 5/6	2.79	8PSK 5/6	0.36	8PSK 3/4	0.86	8PSK 2/3
20	Puerto Maldonado	2.65	8PSK 5/6	2.60	8PSK 5/6	0.97	8PSK 3/4	0.83	8PSK 3/4
21	Moyobamba	2.40	8PSK 5/6	2.35	8PSK 5/6	0.89	8PSK 3/4	0.77	8PSK 3/4
22	Chachapoyas	2.64	8PSK 5/6	2.46	8PSK 5/6	1.12	8PSK 5/6	0.78	8PSK 5/6
23	Pucallpa	2.86	8PSK 5/6	2.80	8PSK 5/6	0.49	8PSK 3/4	0.30	8PSK 3/4
24	Iquitos	2.86	8PSK 5/6	2.80	8PSK 5/6	2.02	QPSK 5/6	1.79	QPSK 5/6

Por otro lado los mejores índices de disponibilidad lo tienen las ciudades de la costa sur, como es el caso de Moquegua, Tacna y Arequipa, además de algunas de las localidades con mayor altitud como Cerro de Pasco, puesto que la atenuación por lluvia no les afecta por estar muy cerca a la Isoterma 0°, lugar donde nace la lluvia.

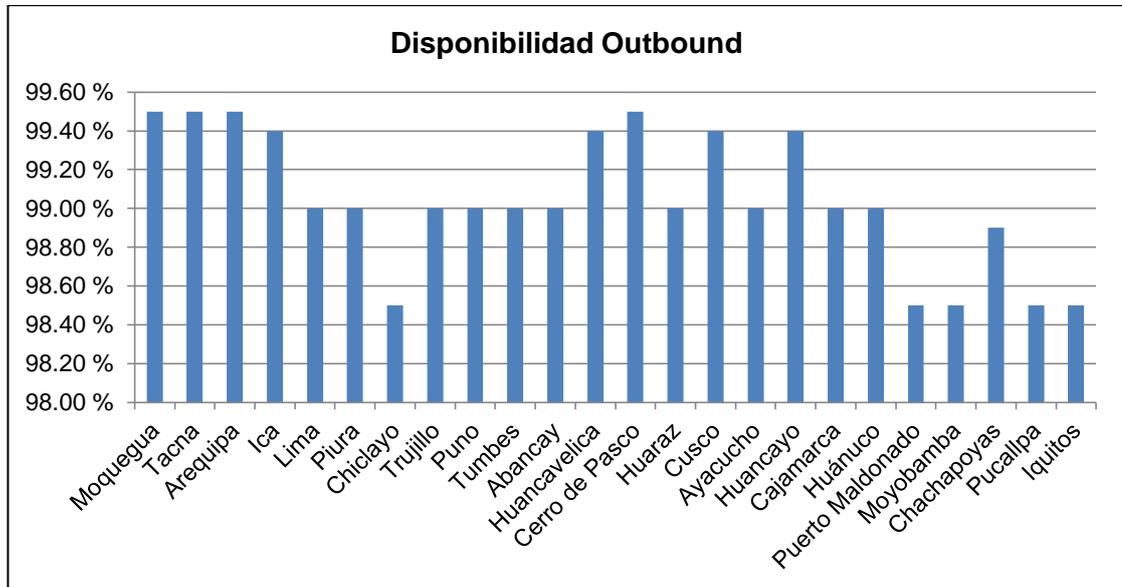


Figura 30: Disponibilidad del enlace Outbound por ciudad (Elaboración Propia)

En la Figura 31 se muestra de forma global la disponibilidad alcanzada en el país, se aprecia que solo el 34% de ciudades logran una disponibilidad entre 99.4 – 99.5%, y el 66% restante alcanza una disponibilidad entre 98.5 – 99%, en general la disponibilidad alcanzada en el territorio nacional es muy baja comparada con los servicios que se brindan en las bandas tradicionales como Banda C y Ku, sin embargo no estamos muy lejos de los índices de disponibilidad alcanzados en Estados Unidos y Europa, donde la disponibilidad promedio alcanzada llega a 99.5%, debido principalmente a los bajos índices de precipitación. Esto complica la prestación de servicios adicionales como es el caso de voz (Backhaul) y video en Banda Ka dentro del país bajo estas condiciones, además de servicios empresariales donde la alta disponibilidad es un factor importante para la selección de servicios a contratar. En estos casos será necesario compensar el enlace con un mejora en el sistema de RF en la estación terrena sobre todo en la vsat con antenas de mayor tamaño y un transmisor de mayor potencia.

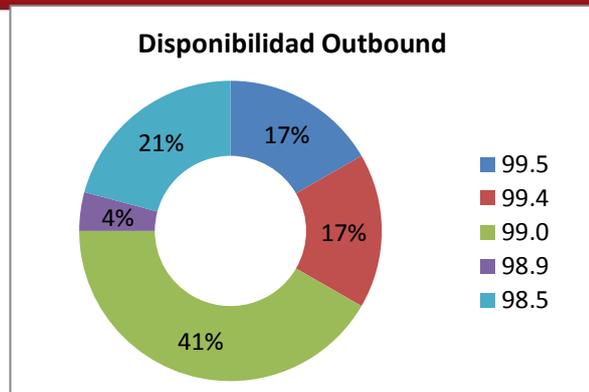


Figura 31: Disponibilidad global del enlace Outbound (Elaboración Propia)

4.6.3.2 Disponibilidad alcanzada en el enlace Inbound

Los resultados para el caso del enlace de retorno mostrados en la Figura 32 son muy similares al enlace Outbound, en especial para las portadoras con tamaño de 2048 Kbps y 4096 Kbps, el escenario cambia cuando se opera con portadoras de retorno de 6144, 8192 y 10240 Kbps, donde es necesario reducir la disponibilidad hasta 97.5% para lograr la operatividad de los servicios.

Se recomienda operar servicios de hasta 4 Mbps como máximo en el enlace de retorno para las zonas con altas tasas de precipitación como es el caso de la Selva Peruana. Caso contrario se puede operar bajo las mismas condiciones de diseño, pero con los esquemas de modulación menos eficientes y con una disponibilidad muy baja. En caso necesitemos una mayor disponibilidad global, se podrá dar con la reducción del tamaño de la portadora hasta 512 Kbps y con una mejor en el sistema de RF, sin embargo la mayor disponibilidad que podremos alcanzar será de 99.5 - 99.7% puesto que la atenuación se vuelve inoperable con márgenes de atenuación por lluvia más pequeños.

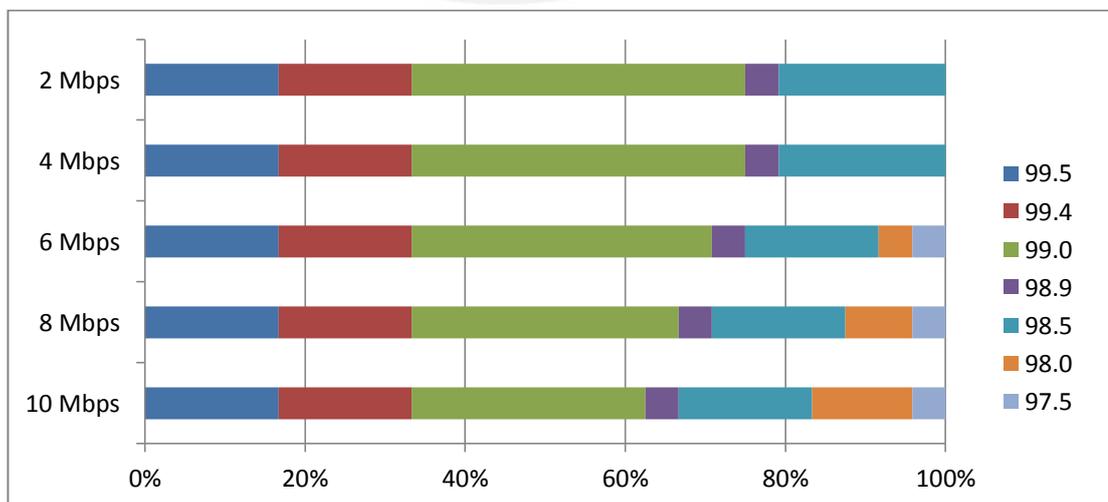


Figura 32: Disponibilidad del enlace Inbound por tamaño de portadora (Elaboración Propia)

4.6.4 Modulación y codificación global alcanzada

4.6.4.1 Modulación y codificación global del enlace Outbound

De los resultados plasmados en la Tabla 29 podemos apreciar en la Figura 33 que es posible operar servicios con una modulación de hasta 32 APSK 3/4 pero con un margen de enlace muy bajo, debido a la intensidad de lluvia que presentan las ciudades del territorio peruano, lo cual hace vulnerable la operatividad con este esquema de modulación, sin embargo con una mayor potencia en el tramo saliente, ya sea de la PIRE del satélite o de la estación terrena, podríamos mejorar estos resultados a fin de tener mayor estabilidad con este esquema.

La Figura 33 además muestra que durante el tiempo de cielo despejado, el 79% de servicios puede operar con una modulación de 32 APSK, la modulación más robusta del sistema DVB-S2. Cabe resaltar que actualmente los HTS no operan con modulaciones de 32 APSK, es así que en Europa [ALB07] y Estados Unidos [PET12] las operaciones se dan hasta con un esquema de modulación de 16 APSK 5/6, la cual podemos llegar en el 100% de localidades peruanas en clima despejado.

Por otro lado, en el peor escenario de lluvia en ambos extremos, se aprecia que la modulación y codificación se acerca a las menos eficientes, sin embargo las más robustas para poder mantener operativo el servicio. En este caso, sólo se llega a operar con una modulación QPSK con diversos modos de codificación dependiendo de la zona. Si contrastamos estos resultados con los servicios de Europa, vemos una diferencia notable puesto que se puede lograr una modulación 8PSK en el 60% de localidades Europeas [DEP05], esto se debe principalmente a los márgenes de atenuación por lluvia que tenemos, los cuales llegan a duplicarse en localidades de Sierra y Selva del país.

4.6.4.2 Modulación y codificación global del enlace Inbound

De la Tabla 30 y el Anexo 9, podemos extraer los esquemas de modulación y codificación con los que operan las portadoras de retorno a 2048, 4096, 6144, 8192 y 10240 Kbps para el peor escenario de lluvia en ambos extremos, los cuáles mostramos en la Figura 34. Se observa que a medida que a medida que aumentamos el tamaño de la portadora, se requiere una modulación y codificación más robusta, por ende menos eficiente.

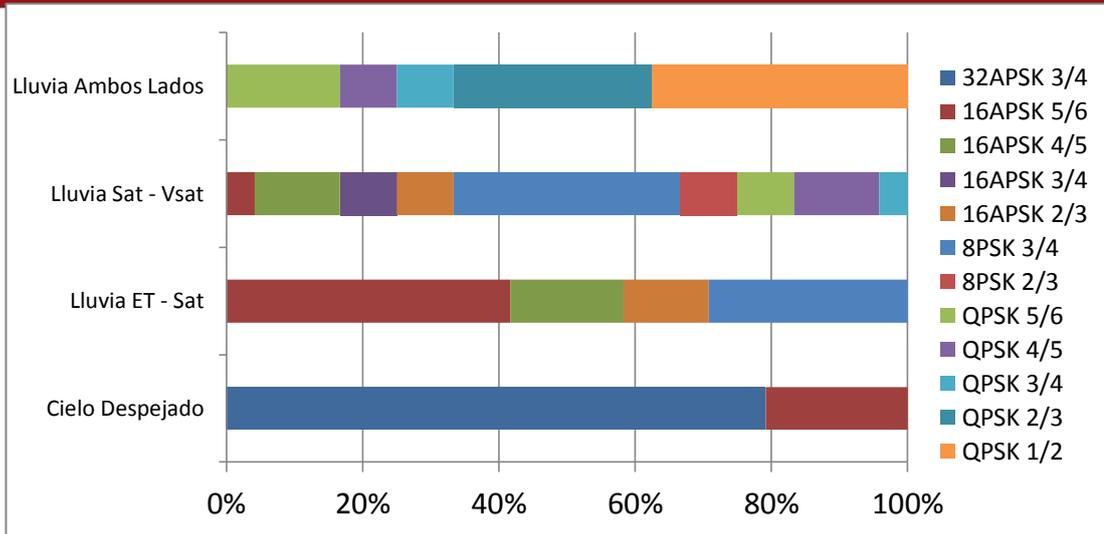


Figura 33: Esquemas de modulación y codificación operables para una portadora Outbound de 120000Kbps en el territorio Peruano (Elaboración Propia)

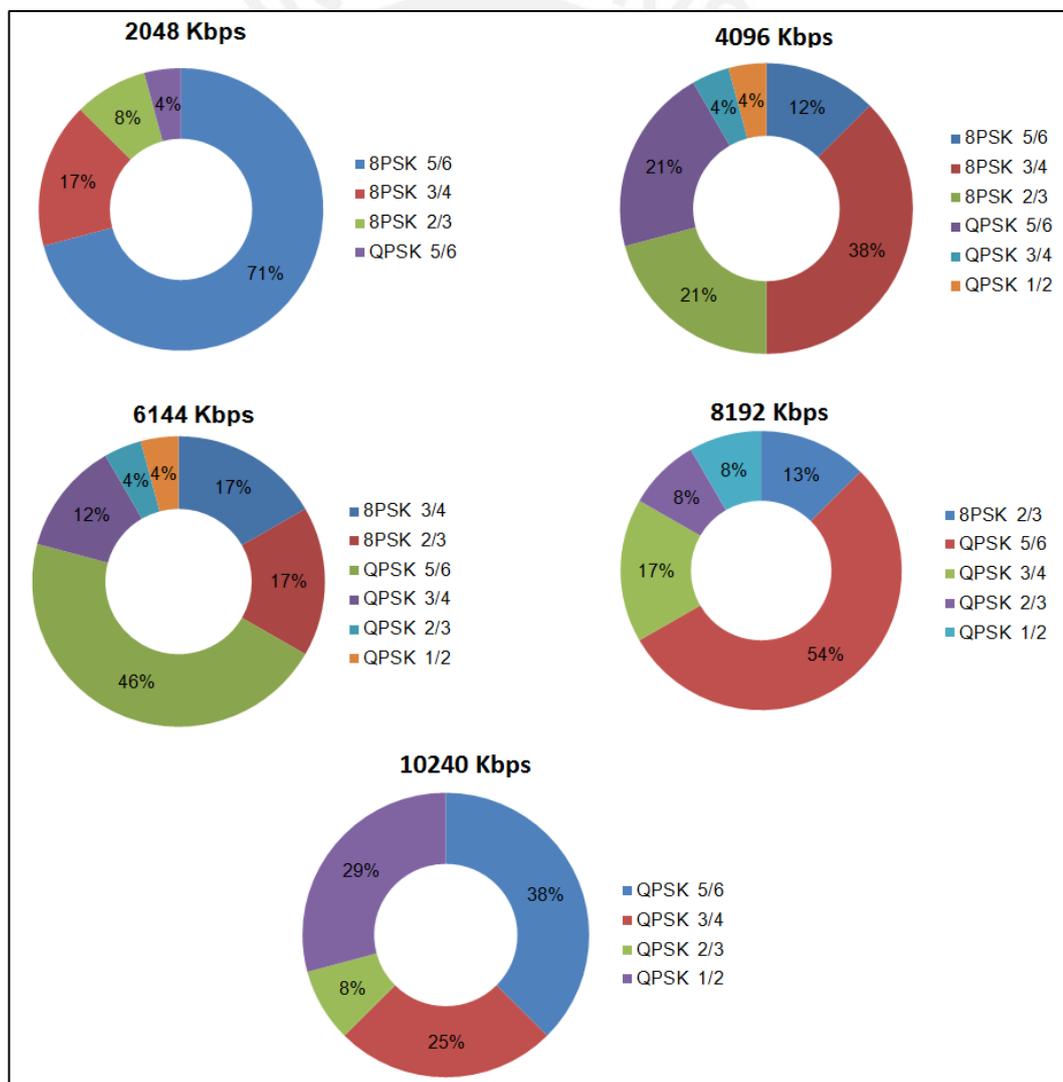


Figura 34: Esquemas de modulación y codificación operables para portadoras Inbound de 2048, 4096, 6144, 8192, 10240 Kbps en el territorio Peruano (Elaboración Propia)

En el caso de una portadora de 2048 Kbps observamos que en más del 95% de sitios podrán utilizar una modulación de 8PSK, para una portadora de 4096 Kbps la utilización de 8PSK se reduce a 71% de sitios, para una portadora de 6144 Kbps llega a 34% y para una portadora de 8192 Kbps llega a 13%. La operación de una portadora de 10240 Kbps es el peor caso del análisis realizado, puesto que la operación se da únicamente con modulación QPSK.

En la Figura 35 se muestran todos los esquemas de modulación y codificación disponibles para un canal de retorno DVB-RCS2 y su utilización por cada velocidad analizada entre 2 y 10 Mbps. Se aprecia de forma comparativa que se puede obtener mayor eficiencia de las velocidades de retorno más bajas (2 y 4 Mbps), y a medida que incrementamos la velocidad de retorno se ve necesaria la utilización de esquemas más robustos.

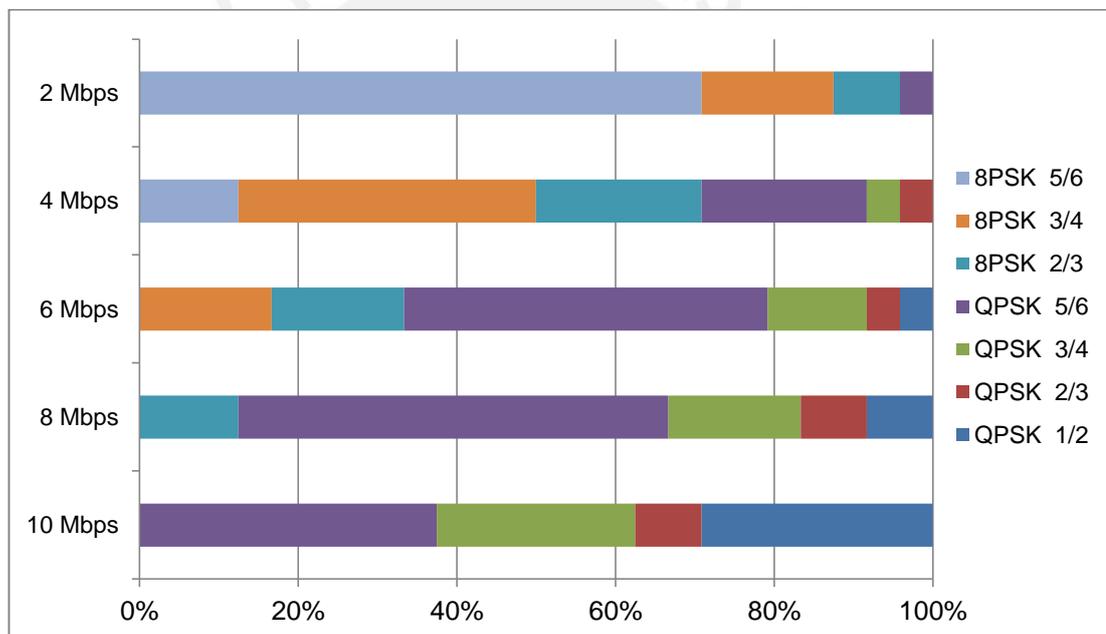


Figura 35: Esquemas de modulación y codificación para un canal DVB-RCS2 vs tamaño de portadora (Elaboración Propia)

4.6.5 Niveles de eficiencia espectral

La eficiencia espectral global la determinaremos de los resultados obtenidos en el enlace Outbound, debido a que es el enlace en el que se alcanzan los esquemas de modulación y codificación más altos, por ende los más eficientes.

De la ecuación (1.3) obtenemos los niveles de eficiencia de los esquemas de modulación y codificación alcanzados para una portadora Outbound de 120000 Kbps. Por otro lado, de la Figura 33 obtenemos los porcentajes de utilización por

cada esquema de modulación y codificación alcanzado en el total de las ciudades analizadas, para los escenarios de: cielo despejado, lluvia en el tramo estación terrena – satélite, lluvia en el tramo satélite – terminal remoto y lluvia en ambos lados, estos resultados se encuentran plasmados en la Tabla 31.

Tabla 31: Utilización de los esquemas de modulación y codificación en el enlace Outbound

	Eficiencia	Cielo Despejado	Lluvia ET - Sat	Lluvia Sat – Vsat	Lluvia Ambos Lados
32APSK 3/4	3.47	79.2%	0.0%	0.0%	0.0%
16APSK 5/6	2.78	20.8%	41.7%	4.2%	0.0%
16APSK 4/5	2.67	0.0%	16.7%	12.5%	0.0%
16APSK 3/4	2.50	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%
16APSK 2/3	2.22	0.0%	12.5%	8.3%	0.0%
8PSK 3/4	1.88	0.0%	29.2%	33.3%	0.0%
8PSK 2/3	1.67	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%
QPSK 5/6	1.39	0.0%	0.0%	8.3%	16.7%
QPSK 4/5	1.33	0.0%	0.0%	12.5%	8.3%
QPSK 3/4	1.25	0.0%	0.0%	4.2%	8.3%
QPSK 2/3	1.11	0.0%	0.0%	0.0%	29.2%
QPSK 1/2	0.83	0.0%	0.0%	0.0%	37.5%

Realizando un cálculo de peso porcentual en cada uno de los cuatro escenarios tenemos los siguientes resultados.

Tabla 32: Eficiencia global alcanzada en Bit/Hz

Escenario	Eficiencia Global (Bit/Hz)
Cielo despejado	3.33
Lluvia tramo ET – Satélite	2.43
Lluvia tramo satélite - Vsat	1.94
Lluvia ambos lados	1.08

Se aprecia que los servicios en clima despejado son altamente eficientes comparados con los servicios tradicionales de Banda C y Ku, llegando a una eficiencia de 3.33 Bit/Hz teóricos, considerando la utilización de 32 APSK. Incluso se obtiene eficiencia en presencia de lluvia en uno de los tramos. Sólo en el escenario de lluvia en ambos lados del enlace, el sistema no obtiene eficiencia, sin embargo esto sucede en un periodo de tiempo corto.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El amplio rango de espectro disponible de la Banda Ka hace posible que se puedan utilizar técnicas más eficientes como la reutilización de frecuencias, técnica que permite desplegar múltiples spots beams de gran capacidad en áreas focalizadas y que en conjunto pueden llegar a cubrir hasta un continente, como es el caso de los operadores ViaSat y Hughes que cubren todo Norteamérica, y Eutelsat que cubre el continente Europeo, mediante proyectos que pueden ser replicables en el Perú, considerando los bajos ratios de penetración de banda ancha, además de las dificultades geográficas que no permiten desplegar redes terrestres especialmente en las localidades rurales y crecientes zonas suburbanas.
2. Si bien existen varias ventajas favorables frente a los satélites convencionales de Banda C y Ku, tales como eficiencia Bit/Hertz, mayor potencia y reducción de tamaño de antenas de usuario que se plasman en la reducción de costos del servicio final, una de las principales complicaciones se debe a la naturaleza de la longitud de onda de la Banda Ka, que al ser muy pequeña es altamente vulnerable a los efectos climatológicos como la lluvia. A pesar de ello, el despliegue de servicios de banda ancha satelital a través de satélites de alto rendimiento (HTS) de Banda Ka es técnicamente viable en todo el territorio peruano.
3. Los resultados de atenuación por lluvia muestran una gran diferencia entre las regiones de costa y selva. La ciudad con menor índice de atenuación es la ciudad de Moquegua, mientras que la de mayor atenuación es la ciudad de Iquitos, que alcanzan los 1.92 dB y 21.16 dB respectivamente, para una disponibilidad de 99.5%.

La operación de servicios masivos de banda ancha es viable en todo el territorio peruano siempre que el nivel de atenuación esté por debajo de los 10 dB, lo cual obliga a reducir la disponibilidad en las zonas cuya atenuación es mayor. Casos puntuales pueden soportar niveles mayores de atenuación sólo si consideramos mejoras en el sistema de RF de la estación remota.

4. La atenuación por lluvia en el territorio peruano no es proporcional a la intensidad de lluvia de cada ciudad, esto se debe a que uno de los parámetros

utilizados para el cálculo de atenuación es la altura de la ciudad, que para el caso peruano se encuentra entre los 30 - 4300 msnm, lo cual da como resultado a ciudades con mayor índice de precipitación pero con menor atenuación por lluvia, como es el caso de Cerro de Pasco y Piura respectivamente.

5. Los resultados de disponibilidad de servicio, arrojados por los cálculos del enlace saliente muestran que el máximo valor alcanzado es de 99.5% principalmente en las ciudades con climas secos como Arequipa, Tacna y Moquegua, mientras que las ciudades con menor índice de disponibilidad se encuentran en la selva peruana como es el caso de Iquitos, Pucallpa, Puerto Maldonado y Chachapoyas, llegando a 98.5% de disponibilidad, debido al margen de atenuación por lluvia que se presenta. En las demás ciudades se alcanzó una disponibilidad entre 98.9 - 99.4%.

Si consideramos los resultados de forma global, sólo el 34% de ciudades supera una disponibilidad de 99%, en general la disponibilidad alcanzada en el territorio nacional es muy baja comparada con los servicios que se brindan en las bandas tradicionales como Banda C y Ku, sin embargo no estamos muy lejos de los índices de disponibilidad alcanzados en Norteamérica y Europa, donde la disponibilidad promedio alcanzada llega a 99.5%, debido principalmente a los bajos índices de precipitación que tienen.

6. Los resultados de disponibilidad obtenidos para el enlace de retorno de 2 y 4 Mbps tienen los mismos resultados que el enlace saliente. Los resultados cambian con el uso de portadoras de 6, 8 y 10 Mbps donde es necesario reducir la disponibilidad hasta un valor de 97.5 % en algunas ciudades de la selva, por lo que se recomienda dar servicios de hasta un máximo de 4 Mbps de retorno en dichas localidades.

Es posible obtener una disponibilidad entre 99.5 – 99.7% para el enlace de retorno en algunas ciudades, sólo si consideramos una portadora de 512 Kbps y 1 Mbps, los cuáles no fueron objeto de estudio considerando la proyección a mediano plazo de la banda ancha satelital en el Perú, y además que en el mercado internacional ya se ofrecen servicios con planes de hasta 20 Mbps de descarga sobre 6 Mbps de retorno, como es el caso de Tooway en Europa.

7. Debido a los valores de disponibilidad que se pueden alcanzar en los servicios, bajo los supuestos analizados, se recomienda orientarlos sólo al Sector Residencial, Pyme y Educación, pues el sector Empresarial y Gobierno requiere, en la mayoría de casos, de un grado de disponibilidad mayor a 99.6% como promedio. Como solución a estos dos sectores, se plantea compensar el enlace con una mejora en el sistema de RF de la estación remota, considerando una antena de diámetro mayor a 0.75 metros y un transmisor de 3W. Esto además se trasladaría a la prestación de servicios adicionales como es el caso del backhaul celular y la transmisión de video en Banda Ka dentro del país.
8. Los cálculos de enlace simulados arrojaron que el enlace saliente (Outbound) puede operar con un esquema de modulación y codificación DVB-S2 de hasta 32 APSK 3/4 durante cielo despejado, sin embargo hoy en día solo podemos considerar operación con una modulación de hasta 16 APSK puesto que los actuales HTS no permiten 32 APSK durante gran parte del tiempo debido a que los fuerza a operar en la zona de saturación, este resultado es comparable con la operación que tienen los actuales servicios en Norteamérica y Europa. Para el escenario donde existe lluvia en ambos extremos del enlace saliente, se recomienda la operación con una modulación robusta como QPSK 1/2, 2/3, 3/4 y 4/5 dependiendo de la ubicación de la estación remota. Es posible operar con un esquema más eficiente, sin embargo se verá afectada la disponibilidad del servicio, que ya es un factor crítico en la Banda Ka.
9. Respecto a los enlaces de retorno, se recomienda operar con un tamaño de portadora de hasta 4 Mbps para obtener la máxima eficiencia, pues más del 70% de ciudades pueden operar con una modulación 8PSK con codificación 5/6 y 3/4 - las más eficientes disponible en el estándar DVB-RCS2 - incluso en presencia de lluvias. Los enlaces de retorno con portadoras entre 6 y 10 Mbps también son operables, sin embargo los esquemas que predominan son menos eficientes que en las portadoras de menor tamaño, ya que su operación se da mayoritariamente con modulación QPSK.
10. Los resultados de eficiencia espectral demuestran que la utilización de la Banda Ka en el territorio peruano es altamente eficiente en condiciones de clima despejado, pues se logra una eficiencia global de hasta 3.33 bits/Hertz considerando un operación en 32 APSK en algunas ciudades. El sistema opera con una eficiencia entre 1.9 y 2.4 bit/Hertz aun cuando uno de dos tramos del

enlace presenta lluvias. Sólo cuando se presentan lluvias en ambos extremos del enlace, el sistema tiene una eficiencia igual a 1, sin embargo esto sucede en periodos de tiempo corto.

11. La metodología desarrollada en el presente trabajo, tanto para los cálculos de atenuación por lluvia como los cálculos de enlace, tiene resultados comparables con las herramientas propietarias utilizadas por los operadores satelitales Satmex e Hispasat, y pueden ser replicables en localidades más específicas, sea el caso de localidades rurales u otras dentro del país.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [ABA12] Abayomi, Yussuff. Haji Khamis, Nor Hisham. "Rain Attenuation Modelling and Mitigation in the Tropics: Brief Review". Published in: International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), Vol.2, No.6, December 2012, pp. 748-757.
- [AGU06] Agüero Jorge, "Curso Comunicaciones II", Capítulo: Demodulación y modulación digital, Universidad Nacional Antonio José de Sucre, Venezuela, 2006.
URL: <http://www.el.bqto.unexpo.edu.ve/~jaguero/docs/comml/capitulo4.pdf>
Ultimo acceso: 26/08/2013
- [ALB07] Alberty Eric, Defever Sophie and Moreau Cyrille. EADS Astrium, "Adaptive Coding and Modulation for the DVB-S2 Standard Interactive Applications: Capacity Assessment and Key System Issues", France, August 2007.
- [ALC08] Alcaíno Pizani, Manuel. "Dimensionamiento de la estación terrena de respaldo de servicios para operación del satélite Simón Bolívar". Universidad Central de Venezuela, Caracas, 2008.
- [ALT13] Sitio web de Altervista, Eutelsat Kasat Frequency Plan, 2013
URL: <http://frequencyplansatellites.altervista.org/>
Ultimo acceso: 15/06/2013
- [BAU11] Baugh, C. "HTS and KA-SAT: Changing the European Telecom Landscape", Northern Sky Research (NSR), Cambridge, MA, USA, May 2011.
- [BRA07] Brandt, Hartmut. Boussemart, Vincent. Kissling, Christian and Parraga, Cristina. German Aerospace Center, "Resources Management using Adaptive Fade Mitigation Techniques in DVB-S2/RCS Multi-Beam Systems", Published in: ICSSC 2007 Temporary Session, April 2007.
- [BLA04] Blake Roy, "Libro: Sistemas Electrónicos de comunicaciones", Editorial Thomson, Segunda Edición, 2004.
- [CHR12] Christensen, J. "ITU Regulations for Ka-band Satellite Networks", Asiasat, presented at The Regional Seminar on Prospects for use of the Ka-band by Satellite Communication Systems, Almaty, Kazakhstan, September 2012.

[DCT12] Departamento de Ciencia y tecnología de la Universidad de Quilmes, “Teoría de las Comunicaciones satelitales”, Buenos Aires, Argentina, 2012.

URL: <http://www.urbe.edu/info-consultas/web-profesor/12697883/articulos/Comunicaciones%20Satelites%20y%20Celulares/Teoria%20de%20las%20Telecomunicaciones.pdf>

Ultimo acceso: 21/07/2013

[DON12] Dong You, Choi. Jae Young, Pyun. Sun Kuh, Noh and Sang Woong, Lee. “Comparison of Measured Rain Attenuation in the 12.25 GHz Band with Predictions by the ITU-R Model”. Department of Information and Communications Engineering, Chosun University, Republic of Korea. Published by: Hindawi Publishing Corporation, International Journal of Antennas and Propagation, Volume 2012, Article ID 415398.

[DVB13] Digital Video Broadcasting (DVB), “DVB-S2 Fact Sheet - 2nd Generation Satellite”, Geneva, Switzerland, Agosto 2012.

URL: <http://www.dvb.org/standards>

Ultimo acceso: 12/11/2013

[DVB13B] Digital Video Broadcasting (DVB), “Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2), Guidelines for Implementation and Use of LLS: EN 301-545-2”. DVB Document A161, February 2013.

[DVB12] Digital Video Broadcasting (DVB), “DVB-RCS2 - Return Channel Satellite Fact Sheet”, Geneva, Switzerland, Mayo 2012.

URL: <http://www.dvb.org/standards/dvb-rcs2>

Ultimo acceso: 19/12/2013

[DEP05] Deplancq Xavier, Cornet Frederic “Link Budget Analysis for New Satellite Telecommunications Systems”, Francia, 2005

[EDU04] Eduardo, L. “Predição da Indisponibilidade por Chuvas em Redes VSAT no Brasil”, PUC-Rio, Rio de Janeiro, Julho 2004.

[ETS13] European Telecommunications Standards Institute (ETSI), “Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2)”. ETSI EN 302 307 V1.3.1, France, 2013.

[ETS12] European Telecommunications Standards Institute (ETSI), “Digital Video Broadcasting (DVB); Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Part 1: Overview and System Level specification”. ETSI TS-101-545-1 V1.1.1, France, 2012.

[GUE12] Guermonprez, V. “Use of Ka-band for satellite communications systems and services: the Astrium experience”, Astrium, presented at The Regional Seminar on Prospects for use of the Ka-band by Satellite Communication Systems, Almaty, Kazakhstan, September 2012.

[FER10] Fermín, J. Simancas, M. “Pronóstico de la atenuación por lluvia en las comunicaciones satelitales mediante métodos de regresión”. Universidad Rafael Belloso Chacín, Venezuela. Télématique, Diciembre 2010, vol. 9, núm. 3, pp. 23-35.

URL: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=78418410002>

Último acceso: 10/09/2013

[FEN12] Fenech, H. “Future High Throughput Satellite Systems”, presented at IEEE-AESS ESTEL Conference, Rome, Italy. October 2012.

[GAR09] García, Alberto. García, José Miguel. Riera, José Manuel y García, Pedro. “Experimento de propagación en Banda Ka en Madrid”. Dpto. de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones, ETSI de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2009.

[GUE07] Guerra Mina Danny. “Tesis: Desarrollo de un programa que permita calcular los parámetros de transmisión Forward en enlaces satelitales utilizando el estándar DVB-S2”, FIE de la Escuela Politécnica Nacional de Quito, Ecuador, 2007.

[HER10] Herradón Rafael, “Comunicación por Satélite”, Universidad Politécnica de Madrid, España, Marzo 2010.

URL: [http://ocw.upm.es/teoria-de-la-senal-y-comunicaciones-](http://ocw.upm.es/teoria-de-la-senal-y-comunicaciones-1/radiocomunicacion/contenidos/presentaciones/satelites-07.pdf/view)

[1/radiocomunicacion/contenidos/presentaciones/satelites-07.pdf/view](http://ocw.upm.es/teoria-de-la-senal-y-comunicaciones-1/radiocomunicacion/contenidos/presentaciones/satelites-07.pdf/view)

Último Acceso: 17/07/2013

[HER10] Hernández, Cesar. Corredor, Oscar y Pedraza, Luis. “Metodología para el diseño de enlaces satelitales”. Revista Tecnura, Volumen 14, Número 26, paginas 102-111, Colombia, Junio 2010.

[HET13] Hetland, J. “Ka-Band HTS Satellites: A transformational shift?”, Telenor Satellite Broadcasting AS, June 2013

[ITU01] ITU-R, P.839-3, International Telecommunication Union, “Modelo de estimación de la altura de la lluvia para utilizar en los métodos de predicción”, Geneva 2001.

[ITU03] ITU, “Final Acts WRC-03”, presented at World Radiocommunication Conference, Geneva, July 2003, p. 41.

[INP04] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. Ministerio de Ciencia y Tecnología. “Calculo de enlace para sistemas de comunicação digital via satellite”. INPE-11433-PUD/139, São Paulo, Brasil, 2004.

[ITU05] ITU-R, P.838-3, International Telecommunication Union, “Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción”, Geneva 2005.

[ITU07] ITU-R, P.618-9, International Telecommunication Union, “Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas de telecomunicación Tierra-espacio”, Geneva 2007.

[ITU12] ITU-R, P.837-6, International Telecommunication Union, “Características de la precipitación para establecer modelos de propagación”, Geneva 2012.

[LAN13] Landeros-Ayala Salvador, Chávez-Cárdenas Sergio y González-Sánchez Juan. “Análisis de la eficiencia de los estándares de transmisión de televisión digital por satélite en las bandas Ku y Ka”, artículo publicado en la revista: Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XIV (número 3), pág. 335-353, Setiembre 2013.

[LIN12] Linhares Agostinho, “Atenuação Devido a Chuvas nas Bandas Ka, Ku e X”, ANATEL, RFCEE/SRF, Brasil, 2012.

[MAN07] Mandeep, J. “Rain Attenuation Predictions at Ku-Band in south east Asia countries”. School of Electrical and Electronic Engineering. University Sains Malaysia, Penang, Malaysia. Published in: Progress In Electromagnetics Research, PIER 76, 65–74, 2007.

[MAZ11] Mazquiaran Miguel. Tesis: “Interferencias en Satélites Geoestacionarios”, Capitulo 4, Universidad Nacional Autónoma de México, México DF, 2011.

[MEL11] Melecio Vladimir, “Herramientas de Cómputo para Aplicaciones de Comunicaciones por Satélite”, Capítulo 7: Tipos de Haces, Universidad Autónoma de México, México DF, 2011.

[MIL07] Miller, P. “Ka Band – The Future of Satellite Communication?”, TELE-satellite & Broadband, September 2007.

[MOR13] Moreno, R. “Tema 4 La atmósfera: composición y estructura”. Departamento de Biología y Geología del I.E.S. Trassierra. España. Septiembre 2012.

URL: http://wikimoreno.wikispaces.com/file/detail/tema_04_atmosfera.pdf

Ultimo acceso: 26/09/2013

[MON08] Moncada, D. Fermin, J. “Atenuación por lluvia en un sistema de comunicación estación-satélite”. Universidad Rafael Beloso Chacín, Venezuela, Télématique, 2008, vol. 7, núm. 1, pp. 29-40.

URL: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=78470103>

Último acceso: 15/08/2013

[NSR12] Northern Sky Research, “Broadband Satellite Markets, 11th Edition”, December 2012.

[NEW12] Newsat, “Ka-Band White Paper”, December 2012.

URL: <http://www.newsat.com>

Ultimo acceso: 20/08/2013

[OJO12] Ojo, J. Ajewole, M and Sarkar, S. “Rain rate and rain attenuation prediction for satellite communication in Ku and Ka bands over Nigeria”. Federal University of Technology Akure, Ondo State, Nigeria. Published in: Progress in Electromagnetics Research B, Vol. 5, 207–223, 2008.

[PAN04] Panagopoulus, A. Arapogloi, P. and Cottis, P. “Satellite Communications at Ku, Ka, And V Bands: Propagation Impairments and Mitigation Techniques”. National Technical University Of Athens, The Electronic Magazine of Original Peer-Reviewed Survey Articles, Third Quarter 2004, Volume 6, No. 3.

[PER09] Pereira, C. “Atenuação e Taxa de Precipitação: Estudo de Variabilidade em Aveiro”. Universidade de Aveiro, Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática, 2009.

[PET12] Petranovich, J. “Mitigating the Effect of Weather on Ka-band High-Capacity Satellites”, ViaSat Inc., Estados Unidos, March 2012.

URL:

<http://www.viasat.com/files/assets/Broadband%20Systems/Mitigating%20the%20Effect%20of%20Weather%20on%20Ka-Band%20High%20Capacity%20Satellites.pdf>

Ultimo acceso: 12/06/2013

[PER04] Peredo Sergio. Tesis: “Software para análisis del presupuesto de enlace para comunicaciones vía satélite”, capítulo 3: Modelo del enlace Satelital, Universidad de las Américas, Puebla, México, Diciembre 2004.

URL: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/peredo_a_s/capitulo3.pdf

Ultimo acceso: 20/07/2013

[PIT12] Pitsch, J. “Banda Ka: Aplicações em Broadcasting”, SES, presented at SSPI Broadcast Day 2012, Flamengo, RJ, Brazil, Maio 2012.

[RAM07] Ramírez Cruz, Jhon. “Tesis de Grado: Diseño de un Enlace Satelital”. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Culhuacán, México, México DF, 2007.

[RAM09] Ramón Calvo Miguel, “Curso: Comunicaciones por Satélite”, Capítulo: Modulaciones digitales, Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2009.

URL: http://www.gr.ssr.upm.es/docencia/grado/csat/material/CSA08-5-ModulacionesDigitales_2p.pdf

Ultimo Acceso: 03/08/2013

[ROS08] Rosado Carlos. “Comunicación por Satélite: Principios, Tecnologías y Sistemas”, Segunda Edición, Autor - Editor, Asociación Hispanoamericana de Centros de Investigación y Empresas de Telecomunicaciones, México, 2008.

[SAH11] Saha, Jayeeta. Project Report: “Studies on Fade Mitigation Control for Microwave Satellite Signal Propagation”, Indian Institute of Technology Kharagpur, Kharagpur, India, March 2011

[SAB11] Sabogal, E. “Tasa de lluvia 1-min para Bogotá, Colombia”, Revista de Tecnología – Journal of Technology, Vol. 10, No. 1, Universidad del Bosque, Colombia, Junio 2011.

[STM13] STM Networks, “ Why Upgrade to DVB-RCS2?”, SatLink System Technical Notes, Document # 200677; Revision A – 130109, 2013.

[STN12] Signal Telecom News. “Existe una gran demanda potencial para la banda Ka en América Latina”, Entrevista a Erwin Mercado - O3B, Mayo 2012

URL: <http://www.signalstelecomnews.com/index.php/entrevistas/253-existe-una-gran-demanda-potencial-para-la-banda-ka-en-america-latina>

Ultimo acceso: 15/10/2013

[SCH11] Scheneider, M. Hartwanger, C and Wolf, H. “Antennas for multiple spot beam satellites”, CEAS Space Journal, December 2011, Volume 2, Issue 1-4, pp 59-66.

[SRI12] Sridhar, M. Padma, K. and Srinivasa, Ch. “Estimation of Rain Attenuation based on ITU-R Model in Guntur (A.P), India”, Published in: ACEEE Int. J. on Communications, November 2012, Vol. 03, No. 03.

[TEC06] Tecuanhuehue Julio, “Sistemas CDMA: CDMA ONE, CDMA 2000”, Universidad de las Américas Puebla, México, Febrero 2006.

URL: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/tecuanhuehue_r_j/

Ultimo acceso: 18/08/2013

[TOM03] Tomasi Wayne. “Sistemas de Comunicaciones Electrónicas”, Cuarta Edición, Prentice Hall, 2003.

[VID12] Vidal, O. “Next generation High Throughput Satellite system”, presented at IEEE-AESS ESTEL Conference, Rome, Italy. October 2012.

[WIN12] Winkler, R. “Broadband satellite communications in Ka band: System approach and solutions”, Thales Alenia Space, presented at The Regional Seminar on Prospects for use of the Ka-band by Satellite Communication Systems, Almaty, Kazakhstan, September 2012.