

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
ESCUELA DE POSGRADO



**OPTIMIZACIÓN DE REDES SATELITALES DE DATOS MEDIANTE EL USO DE
SATELITES DE ORBITA BAJA**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA DE LAS
TELECOMUNICACIONES**

**PRESENTADA POR:
GERSON GIL MELENDEZ SERVAN**

**ASESOR:
DOCTOR HENRY WILLIAM MERINO ACUÑA**

LIMA – PERU

2021

RESUMEN

Actualmente, en muchos países, existen redes que utilizan satélites Geoestacionarios de cobertura amplia (wide beam) cuyo costo por el uso del espectro radioeléctrico es elevado, con poca capacidad (Mbps) y alto retardo; también existen redes con satélites HTS que implica una significativa mejora en el costo del espectro, pero cubre principalmente zonas altamente pobladas. En esta coyuntura, se analiza una red VSAT existente dentro del territorio peruano que utiliza un satélite Geoestacionario wide beam (VSAT GEO) y se propone usar una constelación de satélites en órbita LEO y migrar paulatinamente el tráfico, de la red VSAT GEO hacia la nueva red VSAT LEO.

La constelación de satélites LEO a usar cuenta con múltiples haces cuya cobertura abarca toda el área geográfica objetivo de esta tesis por lo que permitirá realizar la migración de todos los enlaces a la nueva red y contribuirá a que el operador del servicio disminuya sus costos operativos por una disminución del costo del espectro y disminución del costo de los terminales remotos VSAT. Desde el punto de vista del usuario, el pago mensual por el servicio podría ser menor, el performance del servicio mejorará sustancialmente y podrá tener una mayor velocidad de navegación en caso lo desee. Adicionalmente, las constelaciones de satélites LEO permitirán reducir la brecha digital debido a la disminución del costo del servicio final y desplegar nuevas tecnologías, tales como IoT, M2M y 5G, en zonas donde actualmente no es posible.

Esta tesis busca desarrollar una red de comunicaciones por satélite que permita disminuir los costos operativos, mejorar el performance del servicio, aumentar la eficiencia en el uso del espectro y que además viabilice técnica y económicamente la migración de clientes existentes en las redes satelitales actuales hacia la solución propuesta. El análisis se realizó tomando como referencia una red VSAT desplegada en todo el territorio de Perú sin embargo la solución propuesta puede ser replicada en otros países.

DEDICATORIA

Mi tesis la dedico a mis padres por el sacrificio que hicieron para brindarme una educación, a pesar de no contar con muchos recursos y por creer en todo momento en mi capacidad; a mi hermano Máximo Meléndez, por ser un ejemplo a seguir y por brindarme todo su apoyo durante mi educación universitaria y a mi hermana Jeny por apoyarme mientras terminaba mis estudios y elaboración de la tesis.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi asesor de Tesis, doctor Henry William Merino Acuña, por todo el apoyo que me brindó durante la elaboración de la tesis y por confiar en que finalizaría esta ardua labor.



ÍNDICE

RESUMEN	2
DEDICATORIA	3
AGRADECIMIENTOS	4
ÍNDICE	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
ÍNDICE DE TABLAS	10
GLOSARIO	11
1. INTRODUCCIÓN	13
ALCANCE	16
LIMITACIONES DE LA TESIS	17
ANTECEDENTES.....	18
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	20
2.1 DEFINICIÓN DE UN SATÉLITE ARTIFICIAL	20
2.2 EVOLUCIÓN DE LOS SATÉLITES ARTIFICIALES.....	21
2.3 TIPOS DE SATÉLITES	22
2.3.1 TIPOS DE SATÉLITES POR SU USO.....	22
2.3.1.1 Satélites meteorológicos.....	22
2.3.1.2 Satélites Tether	22
2.3.1.3 Estación Espacial	23
2.3.1.4 Satélites de uso militar.....	23
2.3.1.5 Satélites de navegación (GPS).....	23
2.3.1.6 Satélites de observación de la tierra.....	23
2.3.1.7 Satélites astronómicos	23
2.3.1.8 Satélites de comunicación	24
2.3.2 TIPOS DE SATÉLITES POR SU POSICIÓN ORBITAL.....	24
2.3.2.1 Órbita Geoestacionaria (GEO).....	25
2.3.2.2 Órbita de transferencia Geoestacionaria.....	25
2.3.2.3 Órbita media (MEO).....	25
2.3.2.4 Órbita baja (LEO).....	26
2.3.2.5 Órbita cementerio.....	27
2.3.3 TIPOS DE SATÉLITES POR SU CAPACIDAD y TAMAÑO.....	27
2.4 SATÉLITES DE COMUNICACIONES (SATCOM).....	27
2.4.1 CARACTERÍSTICAS DE UN SATÉLITE DE COMUNICACIONES.....	28

2.4.2	APLICACIONES	28
2.4.3	BANDAS DE OPERACIÓN	29
2.5	REDES SATELITALES DE DATOS.....	31
2.5.1	DEFINICION	32
2.5.2	TOPOLOGÍAS	32
2.5.3	TOPOLOGÍA PUNTO A PUNTO.....	32
2.5.4	TOPOLOGÍAS PUNTO MULTIPUNTO	33
2.5.5	TOPOLOGÍAS MALLA	33
2.5.6	ELEMENTOS DE UNA RED SATELITAL DE DATOS.....	33
2.5.6.1	EL HUB O GATEWAY	34
2.5.6.2	EL SATELITE	37
2.5.6.3	EL TERMINAL REMOTO	39
2.5.6.4	EL CENTRO DE GESTION (NOC)	40
2.5.7	CARACTERÍSTICAS DE UNA RED SATELITAL DE DATOS.....	40
2.5.8	PARÁMETROS DE UN ENLACE	40
2.5.8.1	Modulación digital	40
2.5.8.2	Codificación.....	41
2.5.8.3	Técnica de compensación	42
2.5.8.4	EsNo, C/N, C/No	43
2.5.8.5	Azimet, elevación y polarización.....	43
2.5.8.6	Atenuación y Disponibilidad	43
2.5.8.7	Outbound, Inbound, Uplink y Downlink	44
2.5.8.8	Técnicas de acceso	44
2.5.8.9	DVB-S2/S2X y SCPC	47
3.	ANALISIS COMPARATIVO ENTRE RED CON SATÉLITES GEO Y LEO	49
3.1	OFERTA – SATÉLITES GEO	49
3.2	OFERTA – SATELITES LEO	50
3.2.1.1	SKYBRIDGE	50
3.2.1.2	TELEDESIC.....	50
3.2.1.3	IRIDIUM.....	51
3.2.1.4	ONEWEB.....	51
3.2.1.5	SPACE X – StarLink.....	52
3.2.1.6	TELESAT	52
3.2.1.7	AMAZON - Project Kuiper.....	52
3.2.1.8	LEOSAT	53
3.3	SITUACIÓN DEL MERCADO SATELITAL	53

3.4	ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE SATÉLITES GEO Y LEO.....	56
3.4.1	BANDA DE FRECUENCIA DE SATÉLITES GEO Y LEO.....	56
3.4.2	COBERTURA.....	56
3.4.3	PERIODO DE ROTACIÓN.....	56
3.4.4	SISTEMA DE TRACKING.....	56
3.4.5	GANANCIA DE LA ANTENA Y PIRE.....	56
3.4.6	EFICIENCIA.....	56
3.4.7	PÉRDIDA EN LOS ENLACES.....	57
3.4.8	RETARDO.....	59
3.4.9	VIDA UTIL DE LOS SATÉLITES.....	61
3.4.10	DIMENSIONES DE LOS TERMINALES REMOTOS.....	61
3.4.11	POSIBLE MODELO DEL SERVICIO.....	62
3.5	RETOS POR SUPERAR Y DESVENTAJAS DE LOS SATÉLITE LEO.....	62
4.	DISEÑO DE LA RED DE DATOS.....	64
4.1	CALCULO DE LA DEMANDA.....	64
4.1.1	Criterios de dimensionamiento generales.....	65
4.1.2	Estimación de tráfico demandado-generado por todos los usuarios finales.....	66
	DISEÑO DE LA RED VSAT GEO EXISTENTE.....	67
4.2.1	Criterios de dimensionamiento.....	67
4.2.2	Estimación de tráfico.....	69
4.2.3	Link Budget.....	70
4.2.4	Dimensionamiento.....	71
4.2.5	Topología y elementos de la red.....	73
4.3	ARQUITECTURA PROPUESTA.....	74
4.3.1	Criterios de dimensionamiento.....	75
4.3.2	Estimación de tráfico.....	77
4.3.3	Link budget.....	79
4.3.4	Dimensionamiento.....	80
4.3.5	Topología y elementos de la red.....	81
4.3.6	Características de la solución propuesta.....	83
4.4	ANÁLISIS COMPARATIVO RESPECTO AL USO DE ANCHO DE BANDA.....	85
4.5	PROCESO DE MIGRACIÓN.....	85
5.	ANÁLISIS ECONÓMICO.....	88
5.1	SATÉLITES GEO - ANÁLISIS ECONÓMICO.....	88
5.2	SATÉLITES LEO - ANÁLISIS ECONÓMICO.....	90

5.3	PROPUESTA ECONÓMICA PARA REALIZAR LA MIGRACIÓN	93
5.4	ANÁLISIS DE RENTABILIDAD DEL PROYECTO	94
5.4.1	ANÁLISIS DE RENTABILIDAD – ESCENARIO BASE	94
5.5	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL PROYECTO	97
5.5.1	Variación del costo del terminal remoto	97
5.5.2	Variación del costo de la capacidad satelital	98
5.6	Resumen del análisis de rentabilidad	99
6.	RESULTADOS OBTENIDOS	100
	CONCLUSIONES	102
	BIBLIOGRAFÍA	104
	ANEXOS	115



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Satélites Artificiales.....	21
Figura 2: Topología de una red de comunicaciones por satélite	24
Figura 3: Tipos de órbitas	24
Figura 4: Órbita de un satélite Geoestacionario	25
Figura 5: Órbita de transferencia.....	25
Figura 6: Constelación y trayectoria de los satélites LEO	26
Figura 7: Diagrama general de una red de comunicaciones por satélite	28
Figura 8: Topología descriptiva de una red satelital de datos	32
Figura 9: Topología tipo estrella	33
Figura 10: Plan de frecuencias del satélite Arsat-2	38
Figura 11: Área de cobertura de los satélites widebeam	38
Figura 12: Área de cobertura de un satélite HTS	39
Figura 13: Topología de un terminal remoto VSAT	40
Figura 14: Descripción gráfica de azimuth, elevación y polarización de una antena ..	43
Figura 15: Descripción gráfica del sentido de la comunicación en una red VSAT ...	44
Figura 16: Descripción gráfica de FDMA.....	45
Figura 17: Descripción gráfica de TDMA	45
Figura 18: Descripción gráfica de CDMA	46
Figura 19: Descripción gráfica de MF-TDMA	47
Figura 20: Descripción gráfica de TDM	47
Figura 21: Operación de una red SCPC	48
Figura 22: Operación de una red SCPC dinámica en un instante T_1	48
Figura 23: Operación de una red SCPC dinámica en un instante $T_1 + X s$	48
Figura 24: Cantidad de suscriptores a nivel mundial, por región.....	54
Figura 25: Penetración de las redes digitales a nivel mundial	55
Figura 26: Crecimiento de la cantidad de usuarios de redes digitales.....	55
Figura 27: Nivel de penetración de Internet por región	55
Figura 28: Representación gráfica del recorrido máximo y mínimo de la señal.....	60
Figura 29: Ubicación de los terminales remotos	66
Figura 30: Topología de la red	73
Figura 31: Cobertura de la constelación de satélites LEO	76
Figura 32: Segmentos a analizar a través de los cálculos de enlace	79
Figura 33: Topología de la red VSAT con satélites LEO	82
Figura 34: Diagrama de un amplificador de línea.....	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tipos de satélite por capacidad y tamaño	27
Tabla 2: Rango de frecuencias de banda C	29
Tabla 3: Rango de frecuencias de banda Ku	29
Tabla 4: Rango de frecuencias de banda DBS	30
Tabla 5: Rango de frecuencias de banda Ka	30
Tabla 6: Rango de frecuencias de banda X	30
Tabla 7: Rango de frecuencias de banda V	30
Tabla 8: Rango de frecuencias de banda L	31
Tabla 9: Rango de frecuencias de banda IF	31
Tabla 10: Tabla de modulación usadas en una red de comunicaciones por satélite ..	41
Tabla 11: Lista de modulaciones y FEC de DVB-S2X.....	41
Tabla 12: Atenuación de la señal por condiciones atmosféricas.....	58
Tabla 13: Planes de servicio y cantidad de terminales por cada plan	65
Tabla 14: Tráfico total de la red en downstream y upstream a nivel terrestre inicial	67
Tabla 15: Cantidad de enlaces VSAT GEO por año.....	69
Tabla 16: Tráfico GEO en el segmento terrestre.....	69
Tabla 17: Tráfico total de la red en downstream y upstream a nivel satelital.....	70
Tabla 18: MODCOD y eficiencia de la red VSAT GEO (bps/Hz).....	71
Tabla 19: Ancho de banda utilizado por la red VSAT GEO.....	72
Tabla 20: Dimensionamiento de portadoras de la red VSAT GEO	72
Tabla 21: Lista de equipos de banda base de la red VSAT GEO.....	74
Tabla 22: Cantidad de enlaces VSAT LEO	77
Tabla 23: Tráfico LAN de la red VSAT GEO + LEO	78
Tabla 24: Tráfico a ser soportado por la red VSAT LEO a nivel satelital	78
Tabla 25: MODCOD y eficiencia de la red VSAT LEO	80
Tabla 26: Ancho de banda que usará la red VSAT LEO	81
Tabla 27: Comparación de uso de ancho de banda de una red GEO vs LEO	85
Tabla 28: Inversión en hardware requerida para la red VSAT GEO	89
Tabla 29: Inversión recurrente requerida para la red VSAT GEO.....	89
Tabla 30: Costo mensual de cada plan de servicio - red VSAT GEO	90
Tabla 31: Inversión adicional no recurrente para la red VSAT LEO.....	91
Tabla 32: Inversión adicional recurrente para la red VSAT LEO.....	91
Tabla 33: Costo mensual de cada plan de servicio - red VSAT LEO.....	92
Tabla 34: Inversión adicional - Escenario 2.....	92
Tabla 35: Inversión adicional - Escenario 3.....	92
Tabla 36: Inversión adicional por visitas infructíferas.....	93
Tabla 37: Costo mensual del servicio en la red GEO y LEO.....	93
Tabla 38: Análisis de rentabilidad de la red VSAT GEO para un retorno de inversión del 20%.....	95
Tabla 39: análisis de rentabilidad de la solución propuesta	96
Tabla 40: Variación del costo del terminal remoto vs costo del plan de servicio.....	98
Tabla 41: Variación del VAN	98
Tabla 42: Variación del costo del servicio respecto al costo de la capacidad satelital	99
Tabla 43: Variación del VAN y TIR para diferentes costos de la capacidad satelital	99
Tabla 44: Resumen del análisis de rentabilidad Red VSAT GEO vs Red VSAT LEO	99

GLOSARIO

2G	Estándar de segunda generación para comunicaciones celulares.
3G	Estándar de tercera generación para comunicaciones celulares.
4G	Estándar de cuarta generación para comunicaciones celulares.
5G	Estándar de quinta generación para comunicaciones celulares.
ACU	Equipo responsable de controlar el posicionamiento de la antena.
Amplificador de línea	Dispositivo que incrementa la potencia de la señal.
Banda DBS	DBS se refiere a "Direct Broadcast Satellite". La banda DBS comprende el rango de frecuencias entre 17.300 – 18.400 GHz
Downconverter	Equipo que permite cambiar la frecuencia de una señal, la frecuencia de salida siempre es menor que la frecuencia de entrada.
DPI	Deep Packet Inspection. Es un sistema que permite realizar un análisis detallado de cada paquete que pasa a través de una red.
Ecualizador	Se utiliza para disminuir la interferencia y reducir la distorsión de una señal.
Firewall	Dispositivo que permite definir y aplicar reglas de acceso a una red.
Gateway	Punto central de una red VSAT, a través del cual pasado todo el tráfico de la red.
GEO	Órbita Terrestre Geoestacionaria. Órbita ubicada a aprox. 36 km de la superficie terrestre.
GPS	Satélites de posicionamiento global que permiten determinar la ubicación geográfica de un objeto.
HTS	Satélite de alta capacidad. Satélite con capacidad de transportar más de 100 Gbps
HUB	Punto central de una red VSAT, a través del cual pasa todo el tráfico de la red.
IoT	Internet of Things. Término que se refiere a la conexión de equipos a Internet.
LEO	Órbita terrestre baja. Órbita ubicada entre 200 km y 2 000 km de la superficie terrestre.
LNA	Amplificador de bajo ruido usado para amplificar la señal recibida por una antena.
M2M	Maching to Maching. Término que se refiere a la interconexión entre dispositivos.

MEO	Órbita terrestre media. Orbita ubicada a partir de los 2 000 km de la superficie terrestre.
NMS	Network Management System. Se refieren a todos los elementos que permiten la gestión y monitoreo de una red.
O3B	Other 3 Billion. Es el nombre de una empresa de comunicaciones por satélite que usa satélites de orbita media (MEO)
PO	Órbita polar. Esta orbita es usada para dar cobertura satelital en las áreas polares de la superficie terrestre.
RF	Radiofrecuencia. En el documento se usa para hablar de la antena y los equipos asociados a esta, que permiten enviar y recibir la señal del satélite.
SCU	Servo Control Unit. Equipos que forman parte del subsistema de tracking de una antena y controlan los motores de azimut, elevación y polarización.
SDWAN	Software-defined wide area network. Es una arquitectura para redes de amplia cobertura que son definidas o configurables por software.
Servicio OTT	Over The Top. Se refiere a la transmisión de contenido (principalmente audio y video) por internet.
Servidor DNS	El servidor DNS (Domain Name System) es responsable de convertir las direcciones URL a direcciones IP.
TollGate	Está formado por equipos que permiten principalmente conmutar y enrutar el tráfico que pasa a través de una red.
Upconverter	Equipo que permite incrementar la frecuencia de la señal.
UPS	Uninterruptible power supply. Se refiere a dispositivo de almacenamiento de energía y son usados para garantizar la continuidad de la alimentación eléctrica de un dispositivo.
VHTS	Very High Throughput Satellite. Satélite que pueden transponder tráfico superiores a 500 Gbps, e inclusive mayores a 1 Tbps.
VoIP	Se refiere al envío y recepción de la voz usando el protocolo IP.
VSAT	Terminal de apertura muy pequeña (Very Small Aperture Terminal). Antena tipo offset para comunicaciones bidireccionales vía satélite.
Wide beam	Beam o haz que cubre una amplia cobertura geográfica, un país, región o continente.

1. INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones por satélites surgieron en los años 60 y desde el principio han jugado un papel importante en la comunicación de datos, permitiendo llegar a zonas donde otras tecnologías terrestres no pueden, ya sea por limitaciones técnicas o por limitaciones económicas. Si bien, cada año las tecnologías terrestres han ido superando esas limitaciones, aún existe muchas zonas geográficas que no cubren; por el lado de las comunicaciones vía satélite, también han evolucionado, inicialmente se tenía satélites en banda C que permitía bajas tasa de transferencia, luego surgió banda Ku que permitió mejorar las tasas de transferencia, en paralelo, los equipos en tierra evolucionaron siendo más pequeños y eficientes y en los últimos años ha evolucionado aún más rápido, ejemplos de esto son la aparición de los satélites HTS que tienen una capacidad superior a 100 Gbps, los satélites VHTS cuya capacidad será mayor a 500 Gbps [1] y finalmente la constelación de satélites LEO para servicios de banda ancha, los cuales están en desarrollo y se estima tendrá una capacidad superior a 23.7Tbps [2].

A pesar de la evolución de las redes, la brecha digital en muchos de los países aún es alta, a pesar de que técnicamente existe al menos una tecnología a través de la cual se puede brindar conectividad y los satélites actuales cubren gran parte de la superficie terrestre [fuente propia]. Uno de los principales motivos del nivel de penetración actual de las redes de datos (usuarios de Internet: 57% de penetración [3]) es que la infraestructura usada como medio de transporte

aún es muy cara, tomando como ejemplo a una red VSAT con satélites GEO, el costo de un MHz por mes está en el orden de US\$ 1 700, si a esto sumamos el costo del equipamiento en tierra y los costos operativos, el costo final será muy elevado respecto a lo que pueda pagar un usuario ubicado en una zona rural, cuyo ingreso mensual es incluso menor que la de un salario mínimo vital.

Desde el punto de vista del usuario, los usuarios residenciales cada vez generan más tráfico, antes una de las principales necesidades a satisfacer era la comunicación (voz) pero ahora los usuarios necesitan acceder a múltiples plataformas de contenido (Facebook, youtube, Instagram, periódicos) e incluso sitios web donde realizar trámites, todo esto conlleva a una necesidad de contar con redes de mayores capacidades y prestaciones. Por el lado de las empresas, también requieren pasar más tráfico, pero no solo eso, necesitan que las redes soporten nuevas tecnologías como IoT, SDWAN, OTT, IP TV, M2M y 5G.

Por otro lado, en países como Brasil, Argentina, Perú, Chile, Ecuador, Bolivia existen muchas redes desplegadas que usan satélites GEO con haces de cobertura amplia (wide beam) que atienden a miles de usuarios [fuente propia] pero que para los proveedores de servicio representa la última alternativa a tomar en cuenta cuando necesitan atender la solicitud de conectividad de un usuario.

En el contexto antes descrito, se observa que hay una oportunidad de mejora en las redes satélites (calidad de servicio, costo y prestaciones). En esa línea, esta tesis plantea usar una constelación de satélites HTS de órbita baja (satélites LEO), ya que gracias a sus ventajas técnicas y económicas nos permitirá migrar los servicios que actualmente operan con satélites Geoestacionarios y evitar de esta forma perder a los clientes (por migración a redes terrestres); también permitirá que un mayor porcentaje de la población rural acceder a servicios de comunicación de datos (por los bajos costos del servicio), reduciendo un poco más la brecha digital. Desde el punto de vista de los proveedores de servicio, la solución planteada convertirá a las redes de comunicación por satélite en una opción que cada vez se tomará más en cuenta, sobre todo para el despliegue de nuevos servicios (ejemplo: 5G), los cuales demandan altas tasas de transferencia y baja latencia.

El objetivo específico de esta tesis es proponer una solución técnica y económica con satélites LEO que permita optimizar una red satelital desplegada en el territorio peruano, que usa un satélite Geoestacionario en banda Ku, esta optimización incluye una disminución en el costo del servicio y mejoras en su performance (disminución del delay, aumento de la tasa de

transferencia, entre otros). Las ventajas asociadas a la solución propuesta viabilizarán la migración de todo el tráfico hacia una red con satélites LEO.

Para alcanzar este objetivo se abordarán los siguientes puntos:

- Descripción de las redes de comunicaciones por satélite y de los elementos que la conforman
- Análisis del estado actual del mercado, desde el punto de vista de la oferta y la demanda.
- Análisis comparativo entre satélite LEO y GEO, y las redes asociadas a estos.
- Dimensionamiento de una red VSAT con satélites Geoestacionario para tener un punto de referencia y comparación con la red VSAT con satélites LEO.
- Dimensionamiento de una red VSAT con satélites LEO
- Análisis económico para satélites LEO y GEO

Para alcanzar las metas planteadas se ha dividido la tesis en 6 capítulos cuyo contenido se describen brevemente a continuación:

Capítulo 1: Se hace una introducción a las comunicaciones por satélite describiendo sus características y limitaciones. Además, se indica la hipótesis y los objetivos a desarrollar a lo largo del documento.

Capítulo 2: Describe los conceptos generales asociados a las comunicaciones por satélites, esto incluye la definición de un satélite artificial, tipos de satélites, la evolución de las comunicaciones por satélite y definición de las tecnologías usadas para enviar y recibir datos usando los satélites artificiales.

Capítulo 3: Abarca la oferta y demanda asociado a las comunicaciones por satélite, se indica los principales proveedores de capacidad satelital a nivel mundial, los nuevos desarrollos que se están dando, asociado a los satélites LEO. También se hace un análisis comparativo de las redes VSAT que usan satélites GEO y LEO, y los retos que debe superar las soluciones con constelación de satélites LEO para que puedan ser usados de forma masiva, a nivel mundial.

Capítulo 4: Se establecen los parámetros de un servicio con una red VSAT GEO para posteriormente realizar el dimensionamiento, tanto para la red GEO y LEO. Esto con el objetivo de determinar el ancho de banda requerido, el tráfico a transportar y el hardware requerido para atender la demanda. Además, se describe cómo se realizará el proceso de migración del tráfico hacia la red VSAT LEO.

Capítulo 5: Incluye el análisis económico de una red VSAT GEO y una red VSAT GEO, mostrando cual será el costo de un servicio en ambas redes y cómo se realizará la migración, desde el punto de vista económico.

Capítulo 6: Análisis de resultados, donde se resumen los valores obtenidos para una red VSAT GEO y LEO.

ALCANCE

El estudio toma como punto de partida una red VSAT que usa un satélite Geoestacionario wide beam en banda Ku y que cuenta con 2000 terminales remotos VSAT ubicados dentro del territorio peruano, los cuales permite a los usuarios acceder a Internet. Se debe tener en cuenta que esta premisa puede ser aplicada a cualquier otro país de Latinoamérica.

La solución propuesta contempla utilizar una constelación de satélites en órbita LEO que usan la banda Ka y están ubicados a 1200 Km de la superficie terrestre. Además, contempla la utilización de los Gateways del proveedor del satélite, los cuales estarán conectados a internet; debido a esto, la contratación de capacidad ya no será por ancho de banda (MHz) si no por tráfico cursado (Mbps). El proveedor satelital será propietario y responsable de:

- Proveer los satélites
- Proveer los Gateways
- Proveer la capacidad satelital
- Gestionar toda la infraestructura de la cual es propietario.

Adicionalmente, la solución propuesta contempla que el proveedor del servicio será propietario y responsable de:

- Clientes o usuarios finales
- Terminal remoto VSAT
- Instalación y mantenimiento de los terminales remotos
- Gestión y monitoreo del segmento de red asociado a sus terminales remotos

En el análisis económico se considera que el “costo objetivo” que tendrán los nuevos terminales remotos para satélites LEO es US\$300 [4]. Estos terminales remotos están siendo desarrollados, apalancados por los grandes proyectos de despliegue de constelaciones LEO; actualmente, más de 860 satélites LEO ya se encuentran en órbita y se tiene planificado poner en órbita otros 20 000 nuevos satélites [5].

LIMITACIONES DE LA TESIS

En este trabajo se propone un solución que cuenta con muchas ventajas respecto a las tecnologías actual sin embargo también tiene algunas desventajas y una de ellas es el costo de las antenas que serán instaladas en el local del usuario final, si bien actualmente existe una gran variedad de antenas compatibles con satélite LEO, con alta ganancia y performance, el costo de cada una es muy elevado, en la mayoría de los casos superior a los US\$ 15 000 [Fuente propia], esto hace que actualmente sea poco viable desarrollar un servicio masivo con satélites LEO que cuente como cientos de miles de enlaces, sin embargo, debido a que hay muchas empresas que están desplegando satélites LEO, la tendencia del mercado es que el costo del terminal remoto oscile alrededor de los US\$ 300 aproximadamente [4] Un ejemplo de esto es OneWeb, empresa que planea poner en órbita 648 satélite LEO [6] y que está desarrollando y probando terminales remotos de bajo costo. También se puede mencionar a Isotropic System que también está desarrollando antenas configurables por software [6].

La solución propuesta no analiza el escenario de migrar servicios desde una red con satélite GEO HTS hacia satélites LEO. Los satélites LEO tienen algunas ventajas respecto a los satélite GEO HTS sin embargo estas podrían no ser suficientes para viabilizar la migración de servicios ya que el costo inicial puede ser elevado (compra de las antenas y servicio de instalación), sobre todo en aquellos casos donde el servicio actual del usuario ha sido puesto en operación recientemente y el proveedor del servicio aún no recupera la inversión realizada. No se analiza el impacto económico el caso que los servicios actuales del usuario hayan sido puestos en operación recientemente.

El cálculo de enlace realizado no considera el impacto en la red de efecto Doppler y el cinturón de Van Allen¹.

No se analiza la comunicación Inter-satélites (satélites LEO) y tampoco se realiza un cálculo de enlace para este tramo de la comunicación.

¹ El cinturón de Van Allen son dos zonas que rodean a la tierra y que está formado por partículas cargadas de alta energía.

ANTECEDENTES

Satellite Communications Strategy selection for optimal LEO satellite communication – Diciembre del 2012

El análisis realizado en este documento tiene como objetivo mejorar el funcionamiento de las redes con satélites LEO, para lo cual se plantea modificar algunos de sus parámetros de operación (protocolo usado, tamaño de paquetes, esquemas de modulación, etc.) y se realiza simulaciones donde se modifica dichos parámetros para ver cómo impacta en el rendimiento de la comunicación. Adicionalmente, realiza cálculos de enlace y pérdidas que se tomaron que referencia (las fórmulas) en la tesis para cotejar con los valores obtenidos con el software SatMaster [7].

Estudio de los sistemas de backhaul de small cells lte por satélite de Antonio Barragán Barragán - 23 de octubre de 2015

Se plantea el uso de los satélites de comunicaciones para el transporte de tráfico celular (small cell) y durante del desarrollo del documento se incluye un dimensionamiento de tráfico a nivel de Mbps y MHz, el cual se ha usado como referencia para dimensionar nuestra demanda y los recursos de la red VSAT GEO (ítem 3.1 y 3.2) [8].

Low-Earth Orbit (LEO) 26 GHz K-band Study Group Final Report – Noviembre 2016

Este estudio propone el uso de la banda Ka de 26 GHz (25.5 GHz – 27 GHz) para incrementar la tasa de transferencia en las comunicaciones tierra-satélite usando satélites de órbita LEO. El reporte analiza los efectos de propagación, las ventajas del uso de la banda Ka, desafíos y estrategias de mitigación.

Este estudio contribuyó a seleccionar la banda Ka como banda de operación para la solución que se plantea en la tesis y sirvió como referencia técnica para definir la infraestructura a usar para diseñar el plan de migración de la red VSAT GEO a la red VSAT LEO [9].

Analysis and Comparison of LEO and MEO Satellite Networks de Trúckly Peter, Búran Peter. 14 septiembre del 2007

Se analiza algunos satélites en órbita LEO y MEO para ver cómo impactan en el delay de extremo a extremo dando como resultado que dicho valor está directamente relacionado con la cantidad de satélites de conforman la constelación de satélites y permite tener un punto de validación de los datos de retardo que se obtienen en la tesis (ítem 2.4.8) [10].

A Technical Comparison of Three Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband – 1 de octubre del 2018

El MIT ha realizado un análisis de las principales constelaciones de satélites LEO de alta capacidad (Space X, Telesat y OneWeb), comparando las características y prestaciones que tiene cada una de estas, lo cual permite entender la tendencia del mercado satelital y cuál podría ser el impacto para los usuarios que vayan a usar esta tecnología, usuarios como los que se plantea en esta tesis [11].

Broadband LEO Satellite Communications: Architectures and Key Technologies escrito por Yongtao Su, Yaoqi Liu, Yiqing Zhou, Jinhong Yuan, Huan Cao, and Jinglin Shi - 26 April 2019

Este artículo hace un análisis general de los satélites LEO, analiza su arquitectura, el diseño de la constelación, cobertura y las interferencias que se pueden dar con entre satélites LEO y GEO. Este documento ha sido usado como base teórica para diseñar la solución propuesta en la tesis y puede ser usada por el lector como punto de referencia para entender de forma global cómo opera un satélite LEO [12].

Performance Analysis of Low Earth Orbit (LEO) Satellite Link in the presence of Elevation Angle, Fading, And Shadowing - August 2009

Este trabajo se enfoca en determinar cómo cambia el BER cuando se tiene variaciones en el ángulo de elevación y degradaciones en la señal (fading y Shadowing) para comunicaciones que usen satélite LEO. Este trabajo permite determinar cual será el impacto en la calidad del servicio cuando se realice la migración de la red VSAT GEO a la red VSAT LEO [13].

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 DEFINICIÓN DE UN SATÉLITE ARTIFICIAL

Un satélite artificial es un objeto fabricado por el hombre y que gira alrededor del planeta tierra, dependiendo de su diseño y aplicación para la que hayan sido creados pueden estar más cerca o más alejados de la superficie terrestre. Por ejemplo: Los Satélite GPS están ubicados a 20 200 km aprox. [14] de la superficie de la tierra y dan una vuelta completa alrededor de la tierra en 12 horas aprox. [15]

Los satélites artificiales tienen una gran cantidad de usos, tales como monitorear el clima, geolocalización, comunicación entre dos o más sitios ubicados en la superficie terrestre, etc.



Figura 1: Satélites Artificiales [16]

Los satélites artificiales son fabricados en tierra y luego lanzados al espacio mediante la ayuda de vehículos de lanzamiento, los cuales son capaces de transportar más de un satélite, dependiendo del peso y dimensiones de estos últimos.

2.2 EVOLUCIÓN DE LOS SATÉLITES ARTIFICIALES

A continuación, se describe de forma cronológica la evolución de los satélites [17]:

- 1610: El astrónomo Johannes Kepler usa por primera vez la palabra “Satélite”.
- 1957: La Unión Soviética lanza el primer satélite artificial, el Sputnik-1. El satélite Sputnik-2 transporta a un animal vivo (Laika).
- 1958: Primer satélite americano en el espacio.
- 1962: Se da la primera comunicación vía satélite usando el satélite Telstar-1.
- 1964: Primer satélite geostacionario (Syncom 3), este satélite permitió la transmisión de televisión en vivo y cubrir los juegos olímpicos de Tokio
- 1971: Se lanza la primera estación espacial, Salyut 1.
- 1972: Inicia el programa LANDSAT, dedicado a tomar imágenes de la tierra.
- 1979: La Agencia Espacial Europea (ESA) lanza Ariane-1, el primer cohete, pensado para transportar satélites de comunicaciones.
- 1981: Se lanza el primer transbordador tripulado.
- 1990: Se lanza el Telescopio Hubble.

- 1994: Inicia la operación de la primera constelación de satélites para posicionamiento global (GPS)
- 1998: Se lanza la Estación Espacial Internacional.
- 1999: Se desarrolla las especificaciones para los satélites CubeSat.
- 2004: Lanzamiento del satélite Anik-F2, satélite HTS.
- 2012: Se registran más de 1000 satélites en órbita.
- 2013: O3B lanza los primeros satélites en órbita MEO, los cuales usan banda Ka y permiten transferir datos a más de 150Mbps por cada enlace.
- 2017: Rocket Lab Se lanza el primer cohete electrónico, desde Nueva Zelanda.
- Enero del 2018: Telesat lanza su primer satélite LEO. El plan inicial de Telesat es lanzar 117 satélites en órbita LEO.
- Mayo del 2019: SpaceX lanza los primeros 60 Satélites LEO. El plan es formar una constelación en órbita LEO con más de 12 000 satélites.
- Junio del 2019: OneWeb lanza los primeros 6 satélite. Estos satélites formarán parte de una constelación en órbita LEO, destinada a brindar servicios de conectividad de datos en todo el mundo.

2.3 TIPOS DE SATÉLITES

2.3.1 TIPOS DE SATÉLITES POR SU USO

2.3.1.1 Satélites meteorológicos

Los satélites meteorológicos están ubicados en diferentes órbitas (usualmente GEO y PO) y se utilizan principalmente para monitorear el clima y las condiciones climáticas en la tierra. Estos satélites recopilan información de la radiación de la superficie de la tierra, masa de las nubes, temperatura, incendios, huracanes, mapeo de las zonas con hielo, flujos de energía, derrames de petróleo, dimensiones de los agujeros en la capa de ozona, etc. Toda esta información puede ser usada para predecir el clima y posibles desastres naturales, efectos de la contaminación, evolución de los deshielos de los glaciares [18].

2.3.1.2 Satélites Tether

Son satélites que están anclados a otro satélite mediante un cable, se utiliza para el control de altitud, la estabilización, la propulsión y el intercambio de impulso. Actualmente, se está estudiando el uso de estos en satélites LEO, con el objetivo de reducir el costo efectivo de los sistemas de propulsión [19].

2.3.1.3 Estación Espacial

Una estación espacial es una nave espacial diseñada para albergar vida humana, está ubicada en órbita baja y es usada principalmente con fines científicos. Las particularidades de la estación espacial radican en que tiene capacidad de albergar vida por periodos que pueden superar los 20 días, poseer puertos de acoplamiento para otras naves y no cuenta con sistema de aterrizaje [20].

A lo largo de los años se han puesto en órbita varias estaciones espaciales, tales como la Tiangong-1, Tiangong-2 y la Estación Espacial Internacional; esta última fue lanzada en 1998 y forma parte de un proyecto impulsado por Estados Unidos, Rusia, Japón, Europa (ESA) y Canadá. La estación espacial fue actualizada recientemente y soporta una tasa de transferencia de datos de hasta 600 Mbps [21].

2.3.1.4 Satélites de uso militar

Estos satélites son usados con fines militares y están equipados con dispositivos que no solo permiten la comunicación satélite–tierra si no también permiten detectar y rastrear el lanzamiento de misiles, tomar imágenes de alta resolución, vigilar las actividades en determinadas zonas geográficas, meteorología, navegación, entre otros. Algunos de estos satélites están equipados con armas, capaces de destruir objetivos en tierra como en el espacio [22].

2.3.1.5 Satélites de navegación (GPS)

Estos satélites son usados por personas naturales, empresas privadas, el gobierno y los militares; su función es ayudar a determinar la ubicación geográfica de un objeto. Estos satélites permiten determinar la latitud, longitud y altitud, siendo el error de rango de usuario ≥ 7.8 m [23].

2.3.1.6 Satélites de observación de la tierra

Estos satélites son usados principalmente para monitorear la tierra, recopilan información de clima, vegetación, color del océano, radiación, toman fotos para la elaboración de mapas, etc.

2.3.1.7 Satélites astronómicos

Estos satélites son usados para observar el espacio y recopilar información de galaxias, estrellas y cualquier otro objeto en el espacio.

Uno de estos satélites es el Telescopio Hubble, el cual fue enviado al espacio en abril de 1990 [24].

2.3.1.8 Satélites de comunicación

Los satélites de comunicaciones permiten el envío de información entre dos puntos, los cuales pueden estar ubicados en el aire, agua o tierra. A través de estos satélites se puede brindar una gran variedad de servicios que incluye voz, transferencia de datos, televisión, video, acceso a Internet y transporte de tráfico de redes celulares.

En la figura 2 se ve los diversos servicios que pueden ser dados a través de un satélite de comunicaciones.

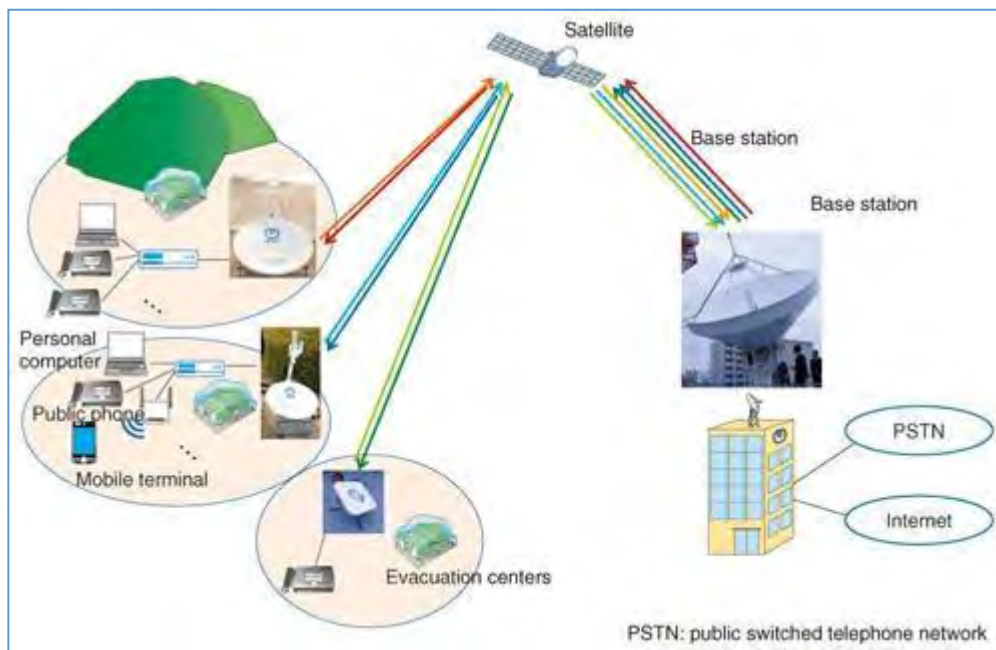


Figura 2: Topología de una red de comunicaciones por satélite [25]

2.3.2 TIPOS DE SATÉLITES POR SU POSICIÓN ORBITAL

Los satélites artificiales se encuentran orbitando alrededor de la tierra, describiendo diferentes órbitas y a distintas altitudes. La Fig. 3 muestra una descripción de dichas órbitas:



Figura 3: Tipos de órbitas [26]

2.3.2.1 Órbita Geoestacionaria (GEO)

Los satélites en la órbita Geoestacionaria giran alrededor de la tierra, a una distancia de 35 786 km [27] de la superficie terrestre, a un periodo de rotación similar al de la tierra (23 horas, 56 m, 4.9 s) [28]. Este periodo de rotación permite que el satélite se mantenga en su misma posición desde el punto de vista de un observador ubicado en la superficie terrestre.

Otra característica de estos satélites es que están ubicados en la línea ecuatorial terrestre, debido a lo cual su latitud es casi cero.

En la figura 4 se muestra un satélite Geoestacionario que está ubicado a 36 000 km aprox. de la superficie terrestre.



Figura 4: Órbita de un satélite Geoestacionario [29]

2.3.2.2 Órbita de transferencia Geoestacionaria

Los satélites (y en general las naves espaciales) usan esta órbita elíptica, para pasar de una órbita LEO a una órbita GEO, siguiendo una secuencia tal como se muestra en la figura 5.

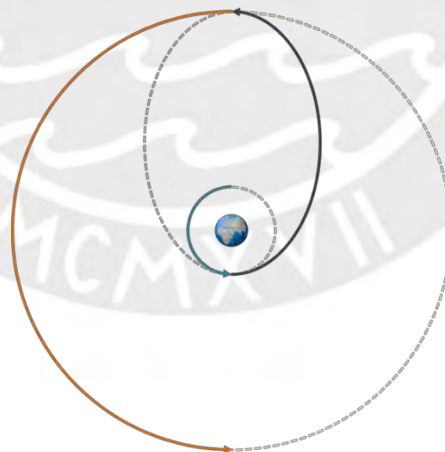


Figura 5: Órbita de transferencia [30]

2.3.2.3 Órbita media (MEO)

Los satélites MEO se ubican a partir de los 2 000 km [31] de la superficie terrestre; con un periodo orbital inferior al de la tierra (12 horas en promedio), motivo por el cual un observador en tierra verá que el satélite se mueve, a diferencia de los satélites Geoestacionarios.

Algunos de los ejemplos de satélites de órbita MEO son los GPS, Galileo y la constelación de satélites de O3B, los cuales están ubicados a 8 062 km y un periodo orbital de 288 minutos (5 vueltas a la tierra cada día) [31].

Esta órbita también es usada por los países que se encuentran más cerca a los polos, debido a que los satélites Geoestacionarios tienen bajo performance en dichas zonas o simplemente no tienen cobertura.

2.3.2.4 Órbita baja (LEO)

Los satélites LEO están ubicados entre 200 km y 2 000 km [32] de la superficie de la tierra por lo que su periodo orbital dura en promedio 100 minutos y el área de cobertura es de aprox. 1 000 km de radio [elaboración propia].

Las constelaciones de satélites LEO que están desarrollándose cuentan con procesamiento a bordo, lo cual permite recibir la señal, demodularlo y pasarlo a datos IP para analizarlo y tomar la decisión respecto a que destino enviar los paquetes, siendo posible que el destino sea transmitirlo directamente a un terminal remoto ubicado en la superficie en tierra o hacia otro satélite el cual tiene conexión directa con el terminal remoto.

En la Figura 6 se tiene un ejemplo de la cobertura de los spots beam de cada satélite LEO y el recorrido que sigue cada uno de los satélites que forman la constelación.

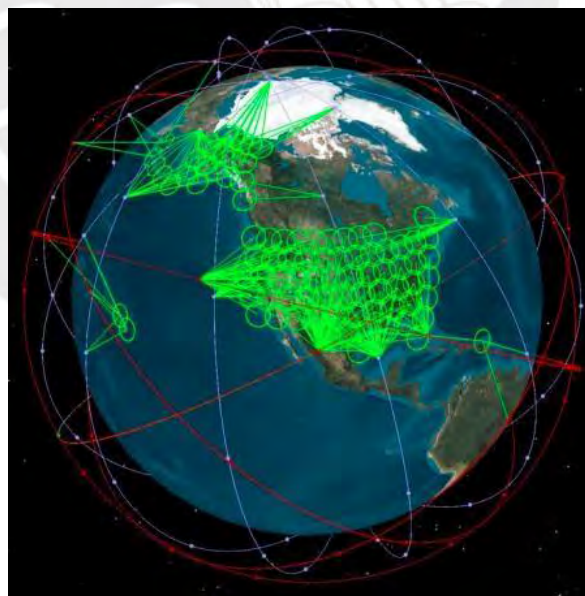


Figura 6: Constelación y trayectoria de los satélites LEO [33]

2.3.2.5 Órbita cementerio

Esta órbita se encuentra ubicada por encima de la órbita Geoestacionaria, a 300 km aprox. [34] y algunos satélites Geoestacionarios son enviados a esta zona al finalizar su tiempo de vida útil.

2.3.3 TIPOS DE SATÉLITES POR SU CAPACIDAD y TAMAÑO

Las dimensiones y pesos de los satélites varían dependiendo de la aplicación y posición orbital donde operarán. A continuación, se lista algunos de estos tipos de satélites:

Tabla 1: Tipos de satélite por capacidad y tamaño [35]

Tipo		Peso
Grandes		> 1000 kg
Medianos		500 Kg – 1000 kg
Pequeños	Minisatélites	100 Kg - 500 kg
	Microsatélites	10 Kg – 100 kg
	Nanosatélites	1 Kg – 10 kg
	Picosatélites	100 g – 1 kg
	Femtosatélites	10 g – 100 g
	Attosatélites	1 g – 10 g
	Zeptosatélites	0.1g – 1 g
CubeSat		~0.2 kg to ~40 kg

2.4 SATÉLITES DE COMUNICACIONES (SATCOM)

Los satélites de comunicaciones son ampliamente utilizados a nivel mundial para compartir información entre dos sitios e interconectarlos, gracias a las características intrínsecas de estos satélites, se puede dar conectividad en casi cualquier zona de la tierra, bastando para ello con instalar antenas transmisoras-receptoras en cada sitio.

Un satélite de comunicaciones puede ser definido como un satélite artificial que permiten enviar y recibir información de una zona de la tierra a otra, usando ondas electromagnéticas. Los satélites de comunicaciones están equipados con antenas, amplificadores de potencia, upconverters y downconverter, mediante los cuales son capaces de recibir la señal enviada desde tierra, amplificarla, cambiar de frecuencia, cambiar de polaridad y transmitirlo nuevamente a la superficie terrestre. La figura 7 representa la arquitectura general de una red de comunicaciones por satélite, con sus principales elementos.

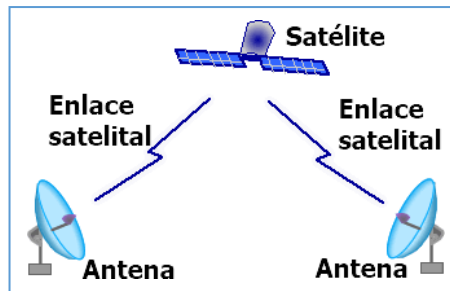


Figura 7: Diagrama general de una red de comunicaciones por satélite [elaboración propia]

2.4.1 CARACTERÍSTICAS DE UN SATÉLITE DE COMUNICACIONES

Algunas de las características de estos satélites son:

- Puede estar ubicados en órbita GEO, MEO, PO y LEO
- Usan diferentes bandas de frecuencia, dependiendo de la aplicación y zona geográfica a cubrir.
- Generalmente, la agregación de nuevos enlaces/cliente es más rápido, comprado con otros medios de comunicación como fibra, cobre, etc.
- El área de cobertura puede abarcar desde unos cientos de kilómetros hasta un continente (o más).

2.4.2 APLICACIONES

Los satélites de comunicaciones han evolucionado, de gestionar pocos Mbps a Tbps, permitiendo de esta forma desplegar una gran variedad de servicios y siendo usado en una gran cantidad de sectores tales como:

- Acceso a Internet
- VoIP
- Telemedicina
- Teleconferencias
- Teleeducación
- Backhaul Celular 2G, 3G, 4G e inclusive 5G
- Desbordamiento de tráfico
- Televisión (broadcast y on-demanda)
- Comunicaciones para embarcaciones
- Comunicaciones para aviones

Los servicios brindados por los satélites de comunicaciones se pueden agrupar en tres grupos, según su uso:

- **Servicios Fijos por satélites (FSS):** Son comunicaciones entre dos puntos, cuya ubicación es fija o están dentro de un área geográfica específica.
- **Servicio de radiodifusión por satélite (BSS):** La ITU lo define como “Un servicio de radiocomunicación en el que se transmiten las señales o retransmitidas por estaciones espaciales están destinadas a la recepción directa del público en general”.
- **Servicios Móviles por Satélites:** Estos servicios se caracterizan por que el envío y recepción vía satélite lo realizan dos puntos móviles, los cuales pueden estar tierra (tren), el agua (cruceiro) o el aire (avión).

2.4.3 BANDAS DE OPERACIÓN

Las principales bandas de frecuencia que actualmente usan los satélites de comunicaciones, y las redes asociadas a estos, son:

- **Banda C:** Dentro de la banda se pueden encontrar subdivisiones tales como la banda C estándar y la banda C-Insat

Tabla 2: Rango de frecuencias de banda C [elaboración propia]

Banda	Frecuencia de Tx	Frecuencia de Rx
Banda C extendida	5.850 – 6.425 GHz	3.625 GHz – 4.200 GHz
Banda C super extendida	5.850 – 6.725 GHz	3.400 GHz – 4.200 GHz
Banda C insat	6.725 – 7.025 GHz	4.500 GHz – 4.800 GHz
Banda C Palapa	6.425 – 6.725 GHz	3.400 GHz – 3.700 GHz
Band C rusa	5.975 – 6.475 GHz	3.650 GHz – 4.150 GHz
Banda C LMI	5.725 – 6.025 GHz	3.700 GHz – 4.000 GHz

- **Banda Ku**

Tabla 3: Rango de frecuencias de banda Ku [elaboración propia]

Banda	Nombre	Frecuencia
Banda de Tx	Banda Ku extendida	13.750 – 14.250 GHz
	Banda Ku estándar	14.000 – 14.500 GHz

	Banda Ku universal	13.750 – 14.50 GHz
	Banda Ku alta	14.500 – 14.750 GHz
	Banda Ku baja	13.250 – 13.750 GHz
Banda de Rx	Rango 1	10.700 – 10.950 GHz
	Rango 2	10.950 – 11.700 GHz
	Rango 3	11.200 – 11.700 GHz
	Rango 4	11.700 – 12.200 GHz
	Rango 5	12.200 – 12.750 GHz
	Rango 6	12.250 – 12.750 GHz
	Banda Ku universal	10.7 GHz – 12.75 GHz

- **Banda DBS**

Tabla 4: Rango de frecuencias de banda DBS [elaboración propia]

Banda	Frecuencia de Tx	Frecuencia de Rx
Banda DBS	11.700 – 12.7500 GHz	17.300 – 18.400 GHz

- **Banda Ka**

Tabla 5: Rango de frecuencias de banda Ka [elaboración propia]

Banda	Frecuencia de Tx	Frecuencia de Rx
Banda Ka	27.5 – 31 GHz	17.7 – 21.2 GHz

- **Banda X**

Tabla 6: Rango de frecuencias de banda X [elaboración propia]

Banda	Frecuencia de Tx	Frecuencia de Rx
Banda X	7.250 - 7.745 GHz	7.900 - 8.395 GHz

- **Banda V**

Tabla 7: Rango de frecuencias de banda V [elaboración propia]

Banda	Frecuencia de Tx
Banda V	40 – 75 GHz

- **Banda L**

Tabla 8: Rango de frecuencias de banda L [elaboración propia]

Banda	Frecuencia
Banda L	800 - 2150 MHz

- **Banda IF**

Tabla 9: Rango de frecuencias de banda IF [elaboración propia]

Banda	Frecuencia de central 1	Frecuencia de central 2
Banda IF	70 MHz	140 MHz

2.5 REDES SATELITALES DE DATOS

Las comunicaciones vía satélites se encuentran ampliamente desplegadas en todos los países, cubriendo principalmente la necesidad de conectividad en aquellas zonas donde no es viable desplegar una red terrestre; con la aparición de los satélites HTS y VHTS esto está cambiando debido a un abaratamiento del costo del servicio y la capacidad de cada enlace.

Actualmente las redes satelitales permiten a un usuario residencial/Pymes tener un servicio de 40 Mbps/4 Mbps [36] a un costo mucho menor comparado con los servicios en Banda C o Ku existentes.

La tecnología asociada al equipamiento en tierra también ha tenido grandes avances, lo que permite brindar una diversidad de servicios con buena calidad de servicio y sobre todo con mayor eficiencia espectral; actualmente gracias a la aparición de los satélites HTS/VHTS (densidad de potencia es mayor), el estándar DVB-S2X (un mayor número de esquemas de modulación y FEC) y técnicas de optimización (ejemplo: byte caching) se puede alcanzar hasta 5 bit/Hz.

En los últimos años se ha dado un gran crecimiento del mercado satelital en Sudamérica, se lanzaron satélites HTS como el Amazonas-3, Amazonas-5, E65WA, O3B, Telstar 19 VANTAGE, IS-29 y Al Yah-3, los cuales no solo están focalizados en las zonas más pobladas sino también en zonas rurales (ejemplo: Telstar 19 Vantage) por lo que hay una mayor probabilidad de reducir la brecha digital en dichas zonas, mediante proyectos estatales como privados, un ejemplo de esto es el surgimiento de IPT, un Operador de Infraestructura Móvil Rural (OIMR) impulsado por el grupo Telefónica, que mediante el uso de diferentes

tecnologías, incluido satélite, desplegará una red de acceso celular para brindar servicios de voz y datos en zonas rurales.

2.5.1 DEFINICION

Las redes satelitales de datos son aquellas que permiten enviar y recibir información entre dos puntos, usando como repetidor un satélite de comunicaciones. En una red satelital de datos interviene como mínimo un satélite y estaciones ubicados en la superficie terrestre (mar, aires o tierra), las cuales son capaces de transmitir y recibir en simultaneo.

En la Figura 8 se muestra los elementos que forman una red satelital de datos y el tipo de tráfico que se puede transportar a través de dicha red.

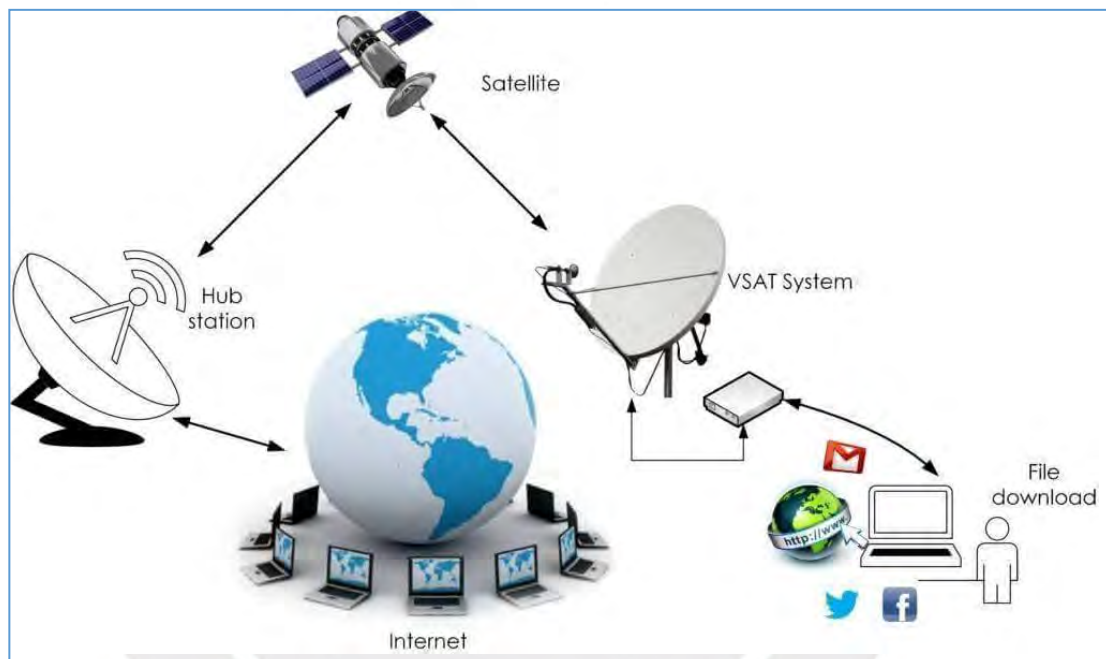


Figura 8: Topología descriptiva de una red satelital de datos [37]

2.5.2 TOPOLOGÍAS

La red satelital de datos permite que un sitio en tierra se comunique con otro de forma directa (pasando por el satélite) o a través de un elemento central, inclusive se puede dar el escenario que la información, intercambiada por dos puntos ubicados en la superficie terrestre, viaje a través de dos satélites.

2.5.3 TOPOLOGÍA PUNTO A PUNTO

En esta topología la comunicación se da únicamente entre dos puntos ubicados en tierra, siendo uno el transmisor y otro el receptor (y viceversa). El mayor beneficio de esta tecnología es el retardo en la comunicación es mucho menor, comparado con una red VSAT. El nombre que se da a estas redes es SCPC (Single channel per carrier).

2.5.4 TOPOLOGÍAS PUNTO MULTIPUNTO

Una red es punto multipunto o estrella cuando hay un elemento central/común al cual se conectan todos los terminales remotos, siendo este el elemento a través del cual pasa todo el tráfico y donde se encuentra los gestores de la red y sus recursos, como se muestra en la figura 9.

La topología que se muestra en la figura 9 será la que se use como parte de la solución técnica que se propone en este documento.

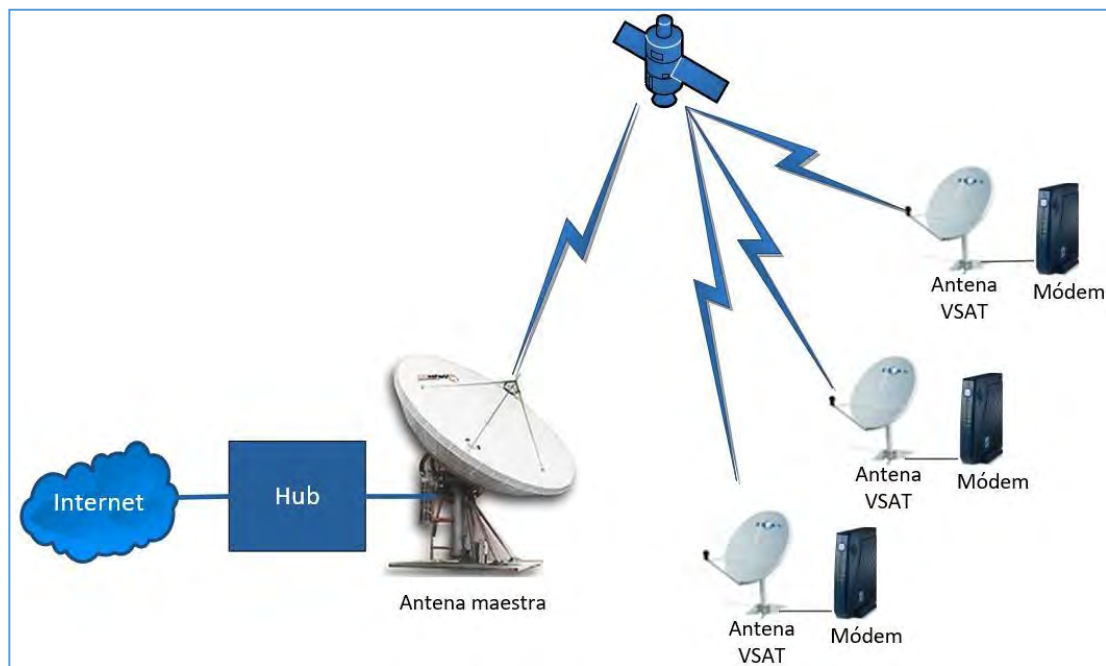


Figura 9: Topología tipo estrella [Elaboración Propia]

2.5.5 TOPOLOGÍAS MALLA

Los terminales remotos que forman parte de una red tipo malla se comunican con un nodo central, principalmente para la gestión, pero además pueden comunicarse entre ellos, a través del satélite. Esta topología permite disminuir el retardo cuando es necesario enviar información desde un terminal remoto a otro; ejemplo: enviar información entre embarcaciones.

2.5.6 ELEMENTOS DE UNA RED SATELITAL DE DATOS

Una red satelital está formada por elementos en satélite y también en la superficie terrestre, mediante los cuales se establece la comunicación de extremo a extremo.

Los elementos que forman parte de una red satelital de datos pueden ser agrupados de la siguiente manera:

- Estación Central (hub o Gateway)
- Satélite

- Terminal Remoto
- Centro de gestión

2.5.6.1 EL HUB O GATEWAY

Dependiendo de la topología de una red satelital, el hub o gateway puede estar asociado a uno más terminales remotos y dependiendo de esto será menos o más complejo.

Independiente de la cantidad de sitios remotos (o terminales remotos) que estén asociados a un hub o gateway, los elementos principales que lo conforman serán los mismos que del terminal remoto, con la diferencia que en uno tendrán equipos que cumplen una función específica y en el otro un único equipo realizará varias de las funciones necesarias para el funcionamiento de la red satelital.

Para el caso de una red VSAT, el hub o gateway será el elemento central de la red, a través del cual pasará todo el tráfico enviado desde (hacia) el terminal hacia (desde) un equipo en la red terrestre e inclusive el tráfico enviado de un terminal remoto a otro.

2.5.6.1.1 SISTEMA DE RADIO FRECUENCIA o SISTEMA DE RF

El sistema de radiofrecuencia permite en envío y recepción desde/hacia en satélite y está directamente conectado al sistema de banda base.

El sistema de RF está formado principalmente por una antena con o sin sistema de tracking, amplificadores potencia, upconverters, downconverters y amplificadores de bajo ruido (LNA). Adicionalmente, dependiendo del sistema de RF, puede contar con un Control Automático de Potencia (UPC), amplificadores de línea, ecualizadores, etc.

Las funciones que cumple el sistema de RF son:

Transmisión: Recibe la señal de la banda base, cambia su frecuencia, amplifica y transmite al satélite. Otra de las funciones que realiza es compensar las pérdidas que tiene la señal durante su recorrido hasta el satélite, para esto el sistema de RF cuenta con un UPC, en cual modificará la potencia de transmisión de la señal acorde a las pérdidas que sufre la señal.

Recepción: Recibe la señal del satélite, lo amplifica, cambia su frecuencia y lo envía a la banda base.

Para garantizar una óptima transmisión y recepción de la señal, la antena debe estar siempre orientada al satélite y con este objetivo algunas antenas (4.8m de diámetro o más) cuentan con un sistema de apuntamiento automático, el cual permite a la antena moverse de forma automática y mantenerse siempre alineada con el satélite. Para realizar dicho proceso de apuntamiento, la antena recibe una señal de referencia que envía el satélite (beacon) y en

base a las variaciones del nivel de potencia de esta, toma la decisión de a donde moverse (azimut, elevación y/o polarización). El proceso de apuntamiento automático (tracking) de la antena va midiendo el nivel de la señal del beacon y en base a ello los motores mueven la antena de izquierda a derecha (azimut), derecha a izquierda (azimut), de abajo hacia arriba (elevación), arriba hacia abajo (elevación). Además, el subsistema de tracking puede mover el polarizador de la antena en sentido horario o antihorario.

En la figura 13 se muestra en que consiste los movimientos que se realizan durante el apuntamiento de una antena (cambio de azimut, elevación y polarización de la antena).

Los elementos que forman parte del sistema de radio frecuencia son:

- Antena
- Amplificador de potencia
- LNA
- Upconverter
- Downconverter
- UPC
- Amplificador de línea
- Ecuilizador
- Subsistema de tracking
 - SCU
 - ACU
 - Beacon receiver
 - Motores de Azimut, elevación y polarización
- Deshidratador
- Gestor NMS

2.5.6.1.2 SISTEMA DE BANDA BASE (BB)

El sistema de banda base puede estar formado por un único equipo (módem) que realiza todas las funciones o por un conjunto de equipos, cada uno de los cuales desarrolla una función específica y que se integra al resto para lograr el procesamiento, conmutación, enrutamiento, modulación y demodulación de los datos.

El sistema de banda base está formado por los siguientes equipos:

- Modulador
- Demodulador
- Procesador IP

- Conmutador
- Enrutador
- NMS Server

2.5.6.1.3 SISTEMA DE TOLLGATE

El sistema de TollGate está formado por equipos responsables de realizar principalmente el enrutamiento y conmutación entre la red satelital y las redes terrestres. Otras de las funciones asociadas al sistema de TollGate es la seguridad perimetral, filtrado de contenido, resolución de DNS, DPI, Cache y optimización.

A continuación, se listan algunos de los elementos que puede tener un sistema de TollGate:

- Routers de Borde
- Router de agregación
- Switches de core
- Firewall
- Servidores Cache
- Servidores DNS
- Servidores DHCP
- Servidores de filtrado de contenido
- Servidores de optimización
- DPI

2.5.6.1.4 SISTEMA DE FACILITIES

El sistema de Facilites está formado por todos aquellos elementos externos que permiten operar a los equipos de Banda Base, TollGate, OSS/BSS y RF, esto incluye el suministro eléctrico, aire acondicionado, espacio físico, rack, puesta a tierra, etc.

Los elementos que agrupa el sistema de facilites son:

- UPS
- Tableros de transferencia
- Banco de baterías
- Generador eléctrico
- Transformador eléctrico
- Equipos de aire acondicionado de precisión (condensadores y evaporadores)
- Circuito cerrado de vigilancia

- Sub-sistema de control de acceso
- Sub-sistema de conraincendios
- Pozos a tierra
- Circuitos de iluminación
- Circuitos de tomacorrientes
- Etc.

2.5.6.1.5 SISTEMA DE OSS/BSS

El sistema OSS (Operation Soport System) and BSS (Business Soport System) es un conjunto de servidores y aplicaciones que permite la gestión, monitoreo y control de los elementos de una red satelital de datos. Estos dispositivos se pueden integrar a la red a través de APIs, SNMP, syslogs, entre otros.

2.5.6.1.6 SISTEMA DE GESTIÓN Y MONITOREO

El sistema de gestión incluye equipos y aplicaciones que permiten monitorear, crear y modificar algún parámetro en los elementos de la red.

Para el caso de una red VSAT, la banda base y el sistema de RF tienen sus propios gestores llamados NMS (Network Management System) desarrollados a la medida para gestionar cada elemento de dichos sistemas. Adicional a estos, existen otras aplicaciones y herramientas que permiten la gestión y monitoreo tales como CACTI, PRTG, SolarWinds, EM7, SpeedTest Ookla, etc.

2.5.6.2 EL SATELITE

Cada satélite de comunicaciones, similar al sistema de RF del Gateway, está equipado con amplificadores, LNA y Up/DownConvers, mediante los cuales puede recibir y retransmitir las señales electromagnéticas que recibe de tierra.

2.5.6.2.1 TRANSPONDER o BEAM

Cada satélite está segmento en unidades llamadas transponders, las cuales son semindependientes entre ellas (algunos equipos son deificados para cada transponder) y la máxima capacidad de la red está directamente asociado a las características del hardware que forme el transponder.

Desde el punto de vista de un usuario el transponder es representado por una frecuencia central y un ancho de banda en MHz, dicho ancho de banda varía, dependiendo del tipo de satélite, existen transponder de 36 MHz, 54 MHz, 72 MHz, 225 MHz, 450 MHz, entre otros.

A continuación, en la figura 10, se muestra a modo de ejemplo, los distintos BW de los transponder del satélite Arsat-2 así como el rango de frecuencias en el que opera cada uno de ellos.

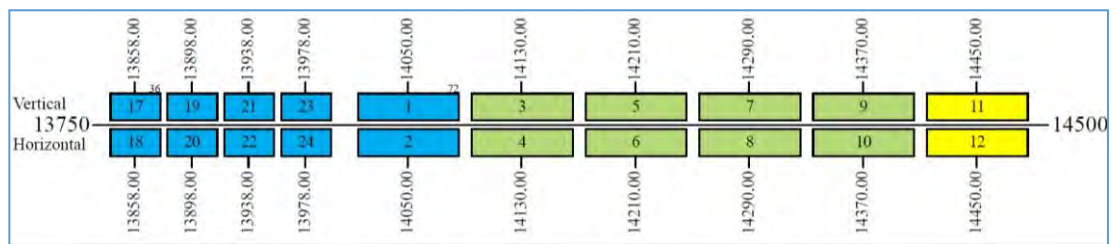


Figura 10: Plan de frecuencias del satélite Arsat-2 [38]

2.5.6.2.2 ÁRES DE COBERTURA

El área de cobertura de un satélite se refiere a la zona de la superficie de la tierra donde es posible captar la señal del satélite y/o transmitir hacia el satélite. El área de cobertura puede abarcar desde pocos kilómetros hasta cubrir más de un continente, tal como se puede apreciar en la figura 11 y 12.

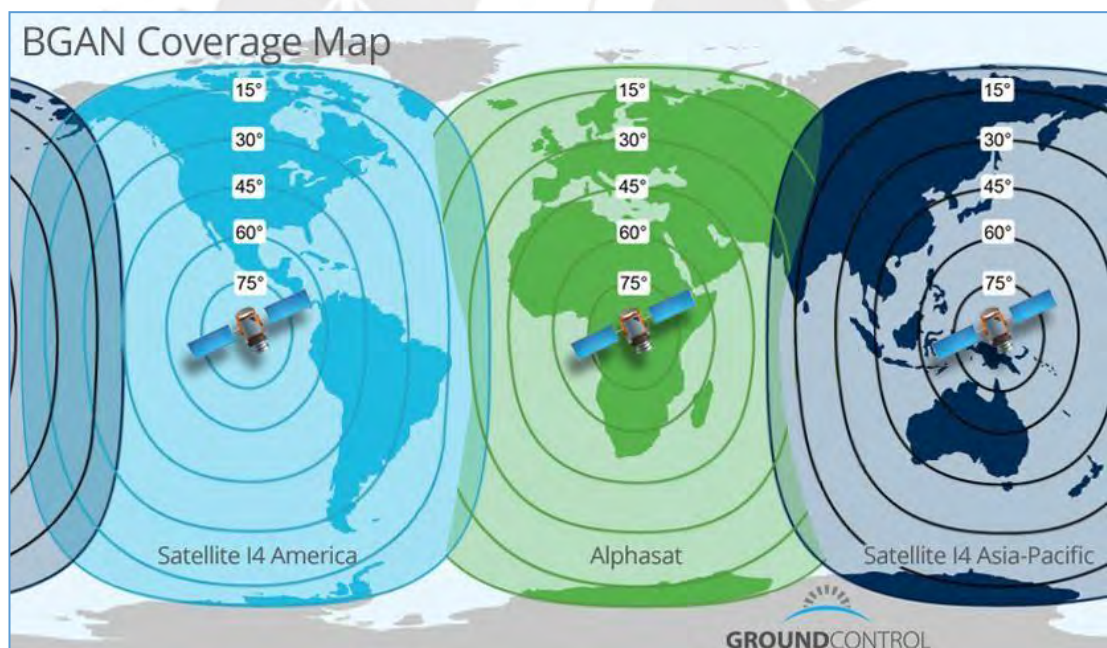


Figura 11: Área de cobertura de los satélites widebeam [39]



Figura 12: Área de cobertura de un satélite HTS [40]

2.5.6.3 EL TERMINAL REMOTO

El terminal remoto es el equipamiento en tierra que está ubicado en el local del usuario final y que permite a este enviar y recibir información al/desde el satélite.

En el caso de una red SCPC el terminal remoto puede tener las mismas características/elementos que el otro extremo del enlace (hub o Gateway) y en el caso de una red punto-multipunto o Malla, el terminal remoto será completamente diferentes, pero sin dejar de realizar las principales funciones (transmitir, recibir, modular, demodular).

El terminal remoto puede ser dividido en ODU y IDU y dependiendo de la tecnología que se use, se puede tener parte de la ODU integrada con la IDU (módem, LNB y BUC).

2.5.6.3.1 Unidad exterior (ODU)

La ODU está formado por todos aquellos elementos que son instalados fuera del local del cliente, en la parte externa. Forman parte de la ODU la antena, el BUC, el LNB, el mástil.

2.5.6.3.2 Unidad interior (IDU)

La IDU está formando básicamente por el módem satelital, el cual se conecta la ODU mediante uno o dos cables coaxiales (o fibra) y es a través de estos cables que se envía y recibe las

señales moduladas, además, a través de estos cables se puede energizar el LNB y el BUC, también se puede enviar señales de referencia para el BUC y el LNB en caso sea necesario. En la figura 13 se puede identificar cada uno de los elementos que forman del terminal remoto, tanto outdoor como indoor.

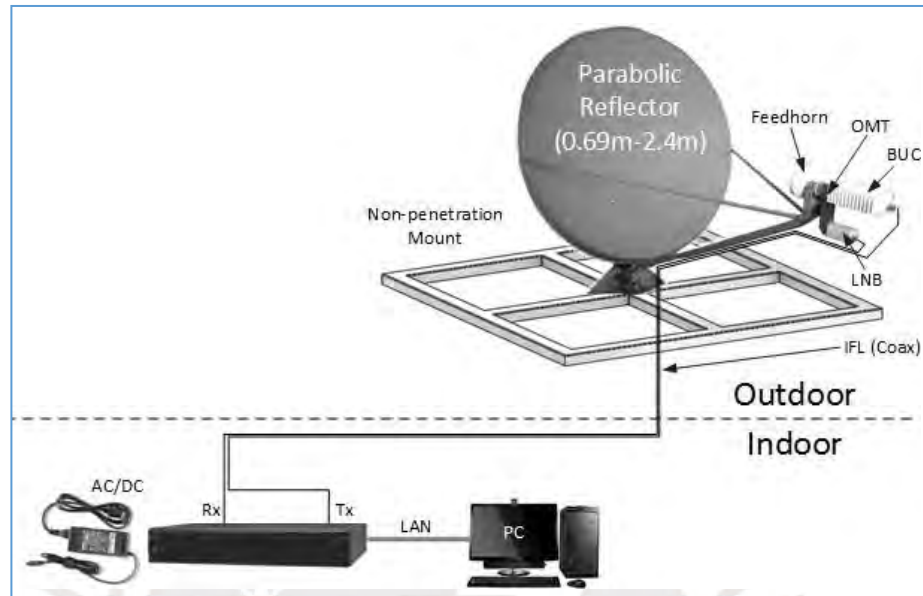


Figura 13: Topología de un terminal remoto VSAT [41]

2.5.6.4 EL CENTRO DE GESTION (NOC)

El NOC o “Network Operation Center” está formado por el elemento humano responsable de realizar la configuración, monitoreo y mantenimiento (preventivo, correcto) de la red.

2.5.7 CARACTERÍSTICAS DE UNA RED SATELITAL DE DATOS

Cuando se habla de comunicaciones por satélite, los primeros temas en discusión son la velocidad de conexión que puede ofrecer (speed rate, data rate o tasa de transferencia), la cobertura y el costo asociados, pero para poder definir cada uno de ellos es necesario entender cuáles son los parámetros que hacen posible la comunicación, es decir, el envío y recepción de datos en cada extremo del enlace.

2.5.8 PARÁMETROS DE UN ENLACE

2.5.8.1 Modulación digital

La modulación se utiliza para enviar información sobre un medio radioeléctrico; la señal portadora de información es combinada con otra señal (onda portadora) utilizando diferentes técnicas con el objetivo de hacer un mejor uso del medio de comunicación y de mitigar

posibles interferencias o ruido presentes durante el recorrido de la señal combinada (señal modulada), desde el transmisor hasta el receptor.

El tipo de modulación que se usa en comunicaciones por satélite es la modulación digital y existen dos tipos de modulación digital que son más usadas, QAM (Quadrature Amplitude Modulation) y PSK (Phase Shift Keying). Adicionalmente cada una de estas modulaciones tiene variaciones, tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 10: Tabla de modulación usadas en una red de comunicaciones por satélite
[elaboración propia]

Modulación	Variaciones
PSK	OQPSK, BPSK, QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK, 64APSK, 128APSK, 256APSK
QAM	16-QAM

2.5.8.2 Codificación

La codificación también es conocida como FEC (Forward Error Correction) y es una técnica diseñada para aumentar la confiabilidad de las comunicaciones de datos. Esta técnica permite al receptor corregir errores en la información recibida sin la necesidad de pedir al transmisor que envíe nuevamente dicha información; para lograr esto, el transmisor agrega algunos bits de redundancia cada vez que envía información.

Dependiendo de la robustez que se necesita, se tendrá más o menos bits de redundancia por lo que en una comunicación por satélite se puede encontrar muchos tipos de FEC, los cuales combinados con el esquema de modulación permitirán una comunicación confiable y eficiente. A continuación, se muestran como ejemplo parte de las modulaciones y FEC usados por el estándar DVB-S2X.

Tabla 11: Lista de modulaciones y FEC de DVB-S2X [elaboración propia]

MODCOD	
Modulación (MOD)	FEC (COD)
QPSK	1/4, 1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9, 9/10, 13/45, 9/20, 11/20
8PSK	3/5, 2/3, 3/4, 5/6, 8/9, 9/10, 23/36, 25/36, 13/18

8APSK-L	5/9, 26/45
16APSK	2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9, 9/10, 26/45, 3/5, 28/45, 23/36, 25/36, 13/18, 7/9, 77/90
16APSK-L	5/9, 8/15, 1/2, 3/5, 2/3
32APSK	3/4, 4/5, 5/6, 8/9, 9/10, 32/45, 11/15, 7/9
32APSK-L	2/3
64APSK	11/15, 7/9, 4/5, 5/6
64APSK-L	32/45
128APSK	3/4, 7/9
256APSK	32/45, 3/4
256APSK-L	29/45, 2/3, 31/45, 11/15

2.5.8.3 Técnica de compensación

Las comunicaciones por satélite usan diferentes rangos de frecuencia para transmitir y recibir información, dependiendo de estos la señal transmitidas por las antenas sufren más o menos pérdidas por diferentes fenómenos tales como lluvias, gases, nubes y centelleo. Debido a que la atenuación puede representar una pérdida de completa de la información enviada, existe varias técnicas de compensación que permiten mitigar sus efectos

- **Modulación y codificación adaptativa (ACM):** Esta técnica permite cambiar la modulación y FEC de la señal a ser transmitida dependiendo del nivel de atenuación de dicha señal.
- **Control de potencia de subida (UPC):** La técnica UPC consiste en variar la potencia de la señal a transmitir con el objetivo que compensar las pérdidas de potencia que podría sufrir la señal, en su recorrido hacia el satélite; para ello el sistema de RF mide los niveles de potencia de la señal del beacon del satélite y en base a esto determina cuanta potencia debe agregar o quitar a la señal, antes de ser transmitida por la antena. Debido a las limitaciones en el sistema de RF (capacidad de amplificar de amplificadores), generalmente se puede compensar hasta 6 dB de pérdida.
- **Control automático de potencia (ALC):** Esta técnica es similar al UPC, con la diferencia que se aplica en el satélite. El objetivo es que la señal retransmitida por el satélite tenga en todo momento la misma potencia. Por ejemplo, una señal recibida por el satélite en condiciones óptimas tiene una potencia de -15 dBW y luego de

amplificarla lo retransmite a la superficie terrestre con 30 dBW; luego por cambios en las condiciones climatológicas (lluvia) la potencia de la señal baja a -16 dBW, el satélite compensará la pérdida agregando 1 dB a la señal, antes de retransmitir, logrando así que la señal a la salida del satélite sea 30 dBW.

2.5.8.4 EsNo, C/N, C/No

Los valores de EsNo, C/N, C/No representan la relación que existe entre la señal y el ruido. En forma general, se puede usar dichos parámetros como un indicador de la calidad de la señal recibida.

2.5.8.5 Azimut, elevación y polarización

Esos tres valores, que también se muestran en la figura 14, indican hacia donde está orientada la antena (apuntada) y permiten al instalador alinear la antena ubicada en tierra con la antena del satélite.

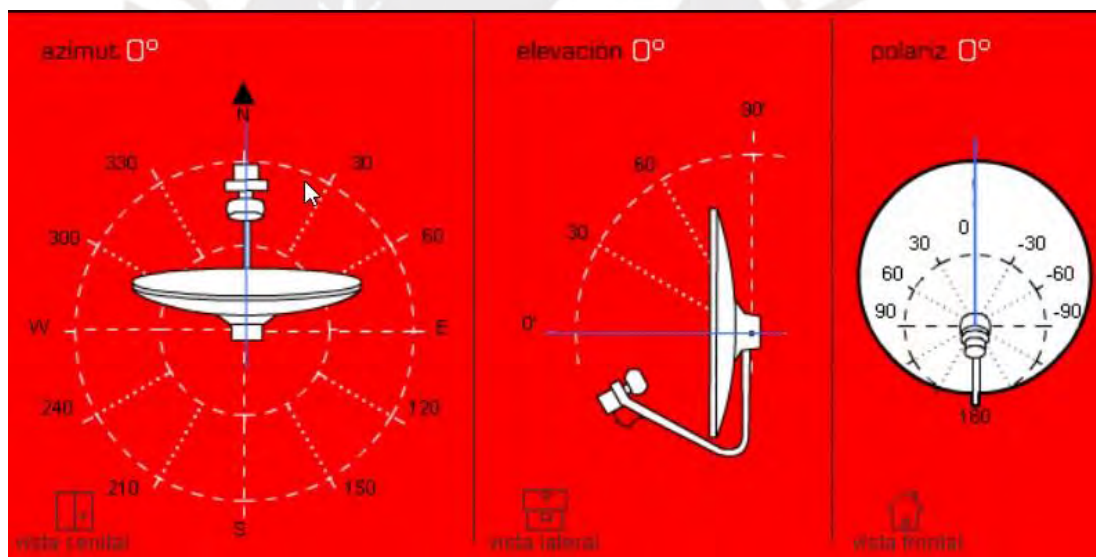


Figura 14: Descripción gráfica de azimut, elevación y polarización de una antena [42]

2.5.8.6 Atenuación y Disponibilidad

En las comunicaciones por satélite, la señal viaja por diferentes capas de la atmósfera terrestre (troposfera, estratosfera, mesosfera, etc.) las cuales afectan a las características de la señal tales como pérdida de potencia (o atenuación), despolarización, cambio de fase, etc. Debido a esto, la señal no logra alcanzar al receptor o llega con demasiados errores, haciendo temporalmente imposible la comunicación, es por esto que en base a estimaciones se fija una disponibilidad, la cual presenta el tiempo (%) durante el cual la comunicación por satélite si se puede dar.

Desde el punto de vista comercial, generalmente la disponibilidad del servicio es medida de forma mensual, aunque puede haber variaciones; por ejemplo, los proveedores de capacidad satelital ofrecen una disponibilidad del enlace en año promedio.

2.5.8.7 Outbound, Inbound, Uplink y Downlink

Estos se refieren al sentido de la comunicación y dependerá del punto de referencia que se haya tomado, en comunicaciones por satélite que usan redes VSAT, el punto de referencia es el Gateway.

- **Outbound, downstream o Forward Link:** Es cuando la señal va desde el gateway al terminal remoto.
- **Inbound, Upstream o Return Link:** Es cuando la señal va desde el terminal remoto al gateway
- **Uplink o subida:** Se llama así a la señal que va desde la antena en tierra (en el Gateway o terminal remoto) al satélite
- **Downlink o bajada:** Se llama así a la señal que va desde la antena del satélite a la antena en la superficie terrestre.

La figura 15 muestra de forma gráfica la definición de cada uno de los sentidos de la comunicación.

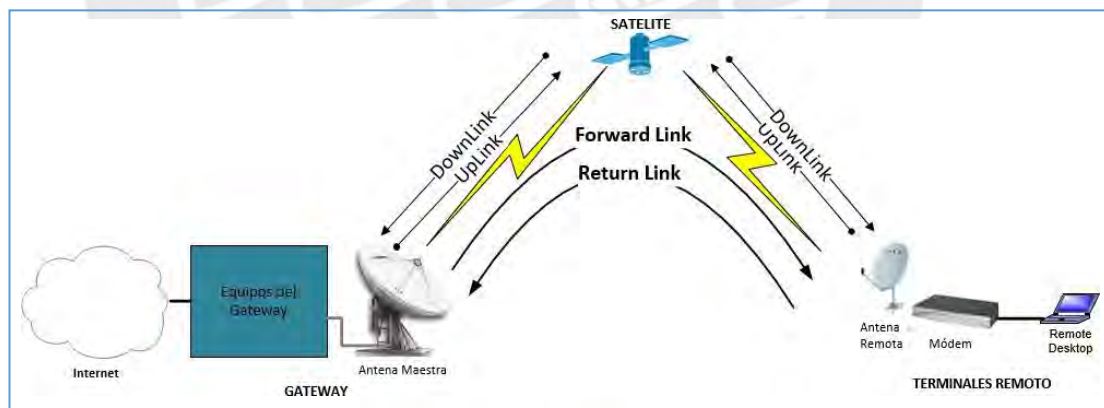


Figura 15: Descripción gráfica del sentido de la comunicación en una red VSAT [elaboración propia]

2.5.8.8 Técnicas de acceso

Las técnicas de acceso determinan en qué momento se podrá transmitir la señal y en qué frecuencia [53].

- **FDMA:** Es una técnica que divide el ancho de banda en segmentos más pequeños y cada uno de estos segmentos es asignado a un terminal remoto (o transmisor). En la figura 16 se muestra en el eje X el tiempo, en el eje Y la frecuencia y cómo se asigna los recursos a cada terminal.

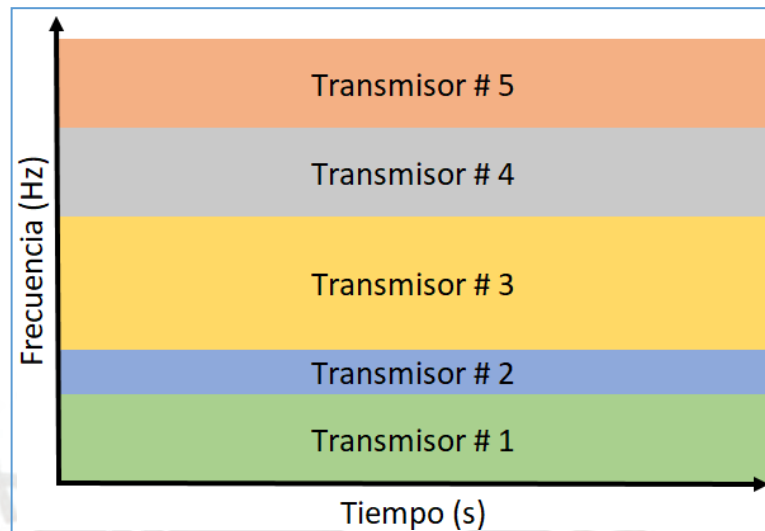


Figura 16: Descripción gráfica de FDMA [elaboración propia]

- **TDMA:** Esta técnica consiste en dividir un canal o ancho de banda en slots de tiempo, de tal forma que cada transmisor tendrá como mínimo un slot de tiempo para enviar información. En la figura 17 se muestra en el eje X el tiempo, en el eje Y la frecuencia y cómo se asigna los recursos a cada terminal (slots de tiempo).



Figura 17: Descripción gráfica de TDMA [elaboración propia]

- **CDMA:** Esta técnica permite a los transmisores enviar información en la misma frecuencia (ancho de banda) y al mismo tiempo, pero con distinto código.

En la figura 18 muestra la asignación de recursos para uno de terminales, en el plano del tiempo , la frecuencia y el código.

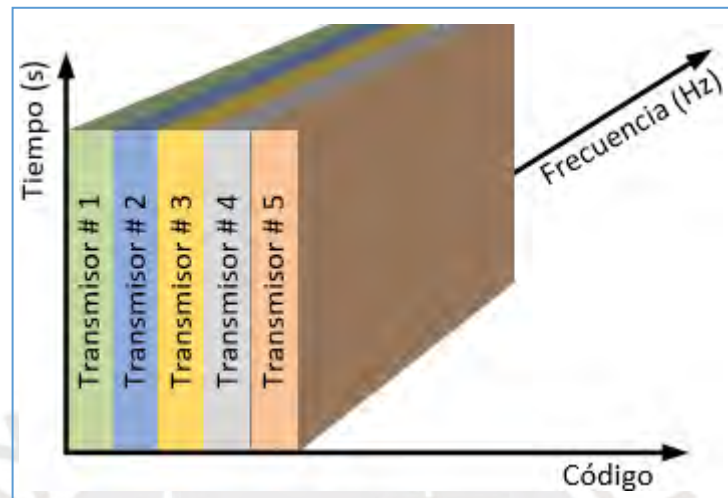


Figura 18: Descripción gráfica de CDMA [elaboración propia]

En las redes de comunicaciones por satélites se usan variaciones de estas técnicas.

- **MF-TDMA:** Consiste en tener múltiples anchos de banda (portadoras) y cada uno de ellos segmentado en slots de tiempo (TDMA), esto permite tener a dos o más transmisores transmitiendo al mismo tiempo, pero en distinta frecuencia.

En la figura 19 se muestra la asignación de recursos, donde un terminal puede usar más de un slot o rango de tiempo y un ancho de banda, dependiendo del volumen de tráfico que vaya a transmitir dicho terminal.

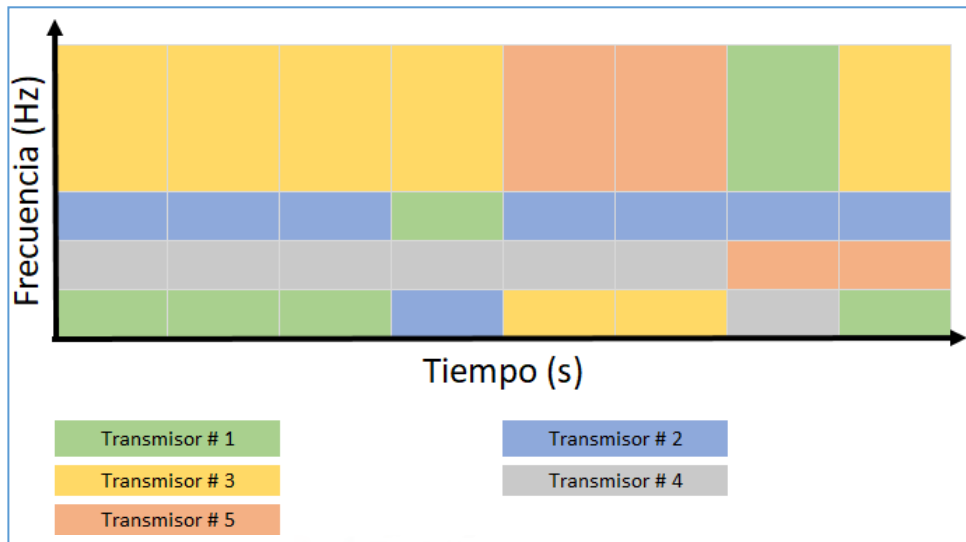


Figura 19: Descripción gráfica de MF-TDMA [elaboración propia]

2.5.8.9 DVB-S2/S2X y SCPC

- **DVB-S2 y DVB-S2X:** Es un estándar que usa una variación de la técnica de multiplexación por tiempo donde existe un único ancho de banda segmentado en slots de tiempo tal como se muestra a modo de ejemplo en la figura 20 y el sistema envía información al receptor usando uno o más time slots.

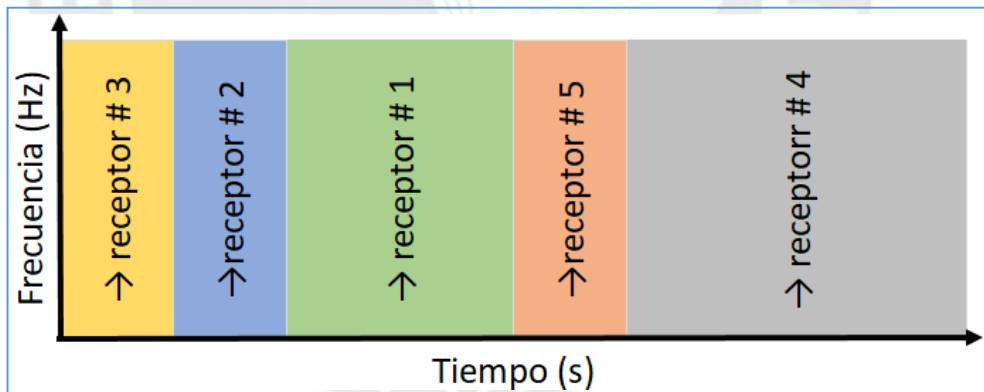


Figura 20: Descripción gráfica de TDM [elaboración propia]

- **SCPC (Single Carrier per Channel):** Cada transmisor tiene asignada un ancho de banda dedicado en todo momento. En las redes VSAT de alta capacidad, sobre todo las que son usadas para backhaul celular, se está usando (en el inbound) una combinación de SCPC con MF-TDMA, que para efectos de esta tesis lo llamaremos SCPC dinámico.

Este método consiste en asignar una portadora dedicada a cada terminal y variar su ancho de banda dependiendo del tráfico que requiera pasar; el ancho de banda que no

use un terminal será asignado de forma automática a otro terminal remoto que sí requiera pasar más tráfico.

Algunas de las ventajas que brinda el SCPC dinámico son alta tasa de transferencia, mayor eficiencia que una red con MF-TDMA debido a que no se requiere tantas cabeceras, uso más eficiente del ancho de banda respecto a una red SCPC debido a que cada terminal usa solo el ancho de banda que necesita, posibilidad de realizar sobresuscripción (a diferencia de una red SCPC). En resumen, se puede decir que SCPC dinámico combina la alta eficiencia de un enlace SCPC con la flexibilidad de un enlace MF-TDMA.

En las figuras 21, 22 y 23 se muestra el modo de asignación de ancho de banda (BW) de una red SCPC y una red con SCPC dinámico. En la figura 21 se puede observar que el BW se mantiene constante a pesar de que el tráfico no siempre usa todo el ancho de banda en cambio en las figuras 22 y 23 se puede ver que el ancho de banda se va ajustando al volumen de tráfico que pasa por la red.

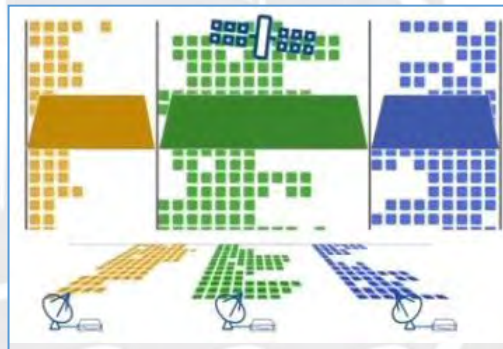


Figura 21: Operación de una red SCPC [43]

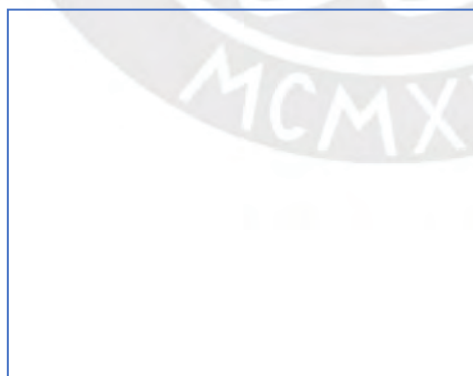


Figura 22: Operación de una red SCPC dinámica en un instante T_1 [43]

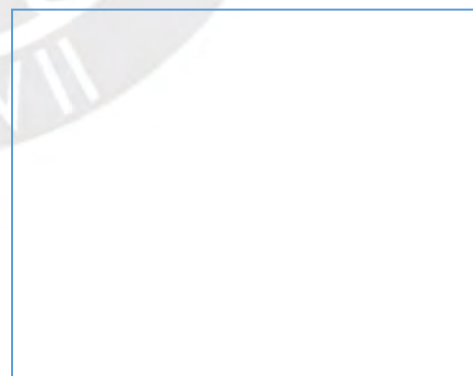


Figura 23: Operación de una red SCPC dinámica en un instante $T_1 + X$ s [43]

3. ANALISIS COMPARATIVO ENTRE RED CON SATÉLITES GEO Y LEO

A continuación, se realizará un análisis de la oferta, la demanda y una comparación de las características de una red VSAT GEO y LEO.

3.1 OFERTA – SATÉLITES GEO

Actualmente existe una gran cantidad de proveedores de capacidad satelitales, cuya flota de satélites es principalmente Geoestacionarios y usan bandas C, Ku y Ka para brindar servicios fijos por satélite

A continuación, se listan los principales proveedores de capacidad satelital que actualmente operan a nivel mundial.

- **Hispasat:** Empresa española que opera más de 10 satélites
- **Eutelsat:** Empresa francesa que opera más de 25 satélites
- **Telesat:** Empresa canadiense que opera más de 16 satélites
- **SES:** Empresa con sede en Luxemburgo que opera más de 40 satélites, de los cuales 20 están en órbita MEO
- **ABS:** Empresa con sede en Hong Kong que opera 6 satélites
- **Intelsat:** Empresa con sede en Luxemburgo que opera más de 49 satélites.

3.2 OFERTA – SATELITES LEO

Las redes con satélites LEO tienen varios años operando y se puede encontrar el mercado proveedores como Iridium que han tenido éxito desplegando este tipo de redes para proveer servicios de voz y datos de baja tasa de transferencia, pero también hubo proveedores como SkyBridge que hicieron un despliegue inicial para luego suspender sus planes.

En los últimos años, la tendencia respecto a las redes de comunicaciones vía satélite fue los satélites HTS, principalmente en órbita GEO, pero han aparecido una tendencia, la cual consiste en desplegar constelaciones de satélite en órbita LEO, este despliegue está siendo impulsado por la mayor demanda de servicios y tráfico a nivel mundial, y por la aparición de nuevas tecnologías que viabilizan el desarrollo y operación de las redes con satélites LEO.

A continuación, se describe las características de las constelaciones de satélites LEO que se desarrollaron o están en proceso de planificación e implementación.

3.2.1.1 SKYBRIDGE

A continuación, se describen las características de la solución planteada por Skybridge [44]

- **Tipo de servicio:** Servicios de ancho de banda, orientado principalmente para acceso a Internet.
- **Estatus:** El proyecto fue cancelado en el 2 001
- **Cantidad de satélites:** 64 satélites en banda Ku
- **Cantidad de planos orbitales:** 2 planos orbitales y 32 satélites por cada plano orbital
- **Ubicación:** 1 457 km aprox. en órbita circular
- **Cobertura por satélite y beam:** Cada satélite tendría una cobertura de 3 000 km y cada spot beam tendría 350 km de radio
- **Throughput:** Se esperaba tener 60 Mbps para el Outbound y 2 Mbps para inbound.

3.2.1.2 TELEDESIC

Teledesic fue una compañía cuyo objetivo era crear una red satelital para brindar servicios de banda ancha principalmente en zonas rurales y de poca presencia de otros proveedores de servicio. Las características la constelación propuesta por Teledisic son: [45]

- **Tipo de servicio:** Servicios de banda ancha
- **Cantidad de satélites:** Inicialmente se contemplaba tener 840 satélites, pero luego se redujo a 288 satélites
- **Cantidad de planos orbitales:** Inicialmente 21 planos orbitales circulares y 40 satélites por órbita. El diseño final contemplaba 12 planos orbitales con 24 satélites cada uno.
- **Ubicación:** Entre 695 km y 700 km de altitud

- **Cobertura por satélite y beam:** 700 km aproximadamente
- **Estatus:** Inactiva

3.2.1.3 IRIDIUM

Iridium es una constelación de satélite de órbita baja cuyo principal objetivo es brindar servicios satelitales móvil (voz y datos) [46].

- **Tipo de servicio:** Servicios de voz, datos, IoT para Barcos, Aviones, Trenes, etc.
- **Estatus:** Operativo
- **Cantidad de satélites:** 66 satélites en órbita polar que usan banda L y banda Ka. La compra realizada por la empresa incluye 66 satélites operativos, 9 repuestos en órbita y 6 repuestos en tierra.
- **Cantidad de planos orbitales:** 6 planos orbitales separados 30° y 11 satélites por cada plano orbital
- **Ubicación:** 780 km aproximadamente y se desplazan a 27000 km/h aprox.
- **Throughput:** Hasta 1.4 Mbps (Iridium Certus Broadband) and hasta 8Mbps para terminales fijos/transportables.

3.2.1.4 ONEWEB

Los principales datos de la constelación de satélites LEO que están siendo desplegada por Oneweb son [47]:

- **Tipo de servicio:** Servicios de banda ancha
- **Estatus:** En proceso de implementación. En febrero del 2019 se lanzó los 6 primeros satélites y ya se ha realizado pruebas, logrando alcanzar tasas de transferencia de datos de hasta 200 Mbps.
- **Cantidad de satélites:** 648 satélites en banda Ku, 600 activos y 48 de repuesto en órbita. El peso de cada satélite es de 160 g aprox.
- **Cantidad de planos orbitales:** 18 planos orbitales
- **Ubicación:** 1200 km aprox.
- **Throughput:** Hasta 7.5 Gbps por satélite
- **Terminal remoto:** Antenas de 36 cm x 16 cm aprox. en banda Ku
- **Gateway:** Entre 50 y 70 Gateways con antenas auto apuntables en banda Ka

3.2.1.5 SPACE X – StarLink

Space X es una empresa estadounidense que más satélite tiene planeado lanzar y hasta el momento ha solicitado aprobación de la FCC para lanzar más de 12 000 satélites y la información pública que se tiene respecto a dicha constelación es la que se resumen a continuación [48].

- **Tipo de servicio:** Banda ancha
- **Estatus:** En proceso de despliegue
- **Cantidad de satélites:** ~12 000 satélites. Actualmente se han lanzado 953 satélites.
- **Cantidad de planos orbitales:** 83 planos orbitales
- **Ubicación:** Entre 335.9 km y 1325 km. 550 km para la primera fase de satélites formado por 1 584.
- **Throughput:** Se espera tener una capacidad total entre 2.5 a 3 Terabits por segundo

3.2.1.6 TELESAT

Proveedor canadiense que actualmente ofrece capacidad satelital con satélite GEO widebeam y HTS. La constelación de satélites LEO que están desplegando estará formado por 117 satélites y sus características son [49]:

- **Tipo de servicio:** Banda Ancha
- **Estatus:** En servicio y con proyección de lanzar más satélites
- **Cantidad de satélites:** 117 satélites en banda Ka. 17 satélite en órbita actualmente
- **Cantidad de planos orbitales:** 11 planos orbitales
- **Ubicación:** Órbita polar e inclinada, a una altitud de 1 000 km
- **Throughput:** el MIT estimó que la capacidad de esta constelación sería 2.66 Tbps.

3.2.1.7 AMAZON - Project Kuiper

La empresa Amazonas creó el proyecto Kuiper para proveedor servicios de banda ancha usando satélites de orbita baja [50].

- **Tipo de servicio:** Banda ancha
- **Estatus:** En etapa de planificación
- **Cantidad de satélites:** 3 236 formarán la constelación de satélites llamada Kuiper. La primera etapa contempla 578 satélites.
- **Cantidad de planos orbitales:** 98 planos orbitales
- **Ubicación:** Entre 590 y 630 km de altitud

3.2.1.8 LEOSAT

Las características de la constelación de satélites planteada por LEOSAT es la siguiente [51]:

- **Tipo de servicio:** Servicios de banda ancha
- **Estatus:** Activo. LEOSAT tiene un acuerdo para brindar servicios, LEOSAT proveerá la infraestructura a Globalsat para brindar servicios de alta capacidad, con retardos similares a los de la fibra y Globalsat brindará a LEOSAT el acceso al mercado americano.
- **Cantidad de satélites:** 108 satélite,
- **Ubicación:** aprox. 1 400 km
- **Throughput:** Cada satélite contará con 10 antenas en banda Ka y cada una de ellas proveerá conectividad de hasta 1.6 Gbps, 2 antenas con capacidad de hasta 5.2 Gbps y 4 enlaces ópticos inter satélite.

3.3 SITUACIÓN DEL MERCADO SATELITAL

Las comunicaciones por satélites han logrado abarcar cada vez más mercado, impulsados por la aparición de nuevas tecnologías tales como los satélites HTS, la banda Ka, el estándar DVB-S2X, roll off de hasta 2% [fuente propia], byte caching, etc. La cantidad de usuarios de satélites de comunicaciones está llegando casi a los 5 millones, y se espera que esta cantidad aumentará sustancialmente a partir del 2022, año en el cual se tendrá operativo la mayoría de las constelaciones de satélites LEO de alta capacidad.

El proveedor de equipamiento de tierra para redes satelitales y proveedor de servicios, Hughes, reportó un crecimiento de 2% gracias a lanzamiento de sus servicios en Centro América y Sudamérica, logrando tener un total de 1.388 millones de suscriptores [52].

En Sudamérica, existen muchos proveedores locales que cuentan con una gran cantidad de suscriptores a través de satélites Geoestacionarios, así como redes VSAT y SCPC. Un ejemplo de esto son las empresas del grupo Telefónica, que cuentan en total con más de 15 Gateways/Hubs en el continente americano [fuente propia].

La figura 24 muestra la evolución de la cantidad de suscriptores de servicios VSAT a nivel mundial, este estudio fue realizado NSR, empresa especializada en realizar en este tipo de análisis. Lo tendencia de crecimiento apunta a tener más de 20 millones [53] de suscriptores de servicios VSAT a nivel mundial para el 2027 [53].

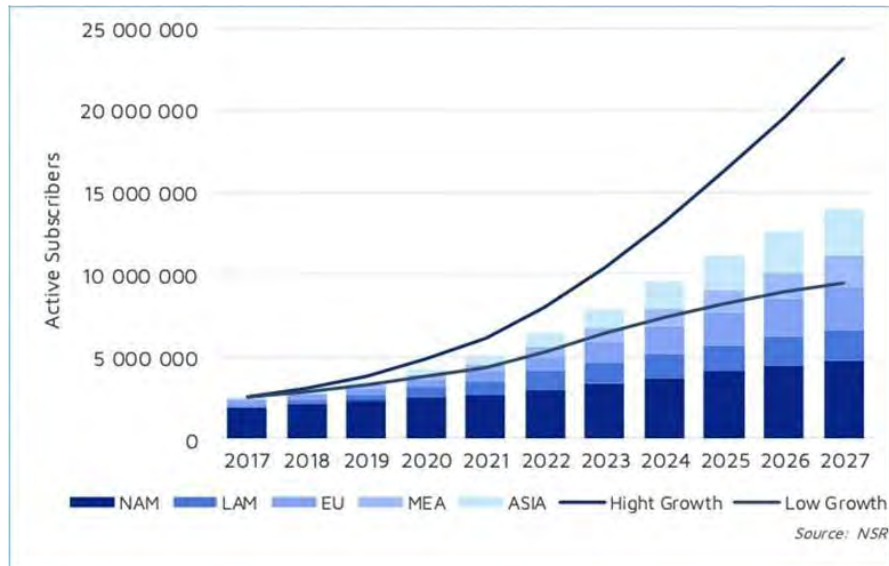


Figura 24: Cantidad de suscriptores a nivel mundial, por región [53]

Según la página web DataPortal [54] (figuras 26, 27 y 28), que se encarga de elaborar reportes sobre la evolución de la conectividad a nivel mundial, se tiene las siguientes estadísticas:

- Hay 7.676 billones de habitantes, de los cuales el 56% está ubicado en zonas urbanas.
- Hay 5.11 billones de usuarios móviles únicos en el mundo, un aumento de 100 millones (2%) en el último año.
- Hay 4.39 mil millones de usuarios de Internet en 2019, un aumento de 366 millones (9%) en comparación con enero de 2018.
- Hay 3.48 mil millones de usuarios de redes sociales en 2019, con un crecimiento mundial total de 288 millones (9%) desde esta vez el año pasado.
- 3.26 mil millones de personas usan las redes sociales en dispositivos móviles en enero de 2019, con un crecimiento de 297 millones de nuevos usuarios que representa un aumento anual de más del 10%

En las figuras 25, 26, y 27 se muestra con mayor detalle los resultados del análisis realizado por DataPortal, donde se desglosa la población en cantidad de usuarios móviles, usuarios de internet, usuarios activos en redes sociales y usuarios de redes sociales por celular, así como también la penetración de internet a nivel mundial, siendo América Latina la región del continente con mayor penetración (73%).



Figura 25: Penetración de las redes digitales a nivel mundial [54]



Figura 26: Crecimiento de la cantidad de usuarios de redes digitales [54]

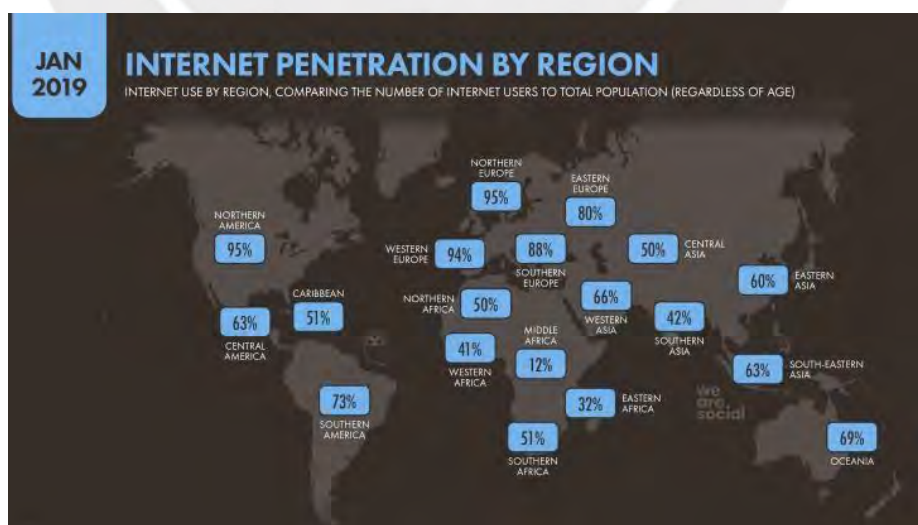


Figura 27: Nivel de penetración de Internet por región [54]

3.4 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE SATÉLITES GEO Y LEO

A continuación, se realizará una comparación, a nivel de características técnicas, de los satélites geoestacionarios y LEO, enfocándonos las principales características de los satélites de comunicaciones y las redes asociadas, tales como la cobertura, periodo de rotación, tamaño de los terminales remotos, etc.

3.4.1 BANDA DE FRECUENCIA DE SATÉLITES GEO Y LEO

3.4.2 COBERTURA

Debido a la altitud a la cual están ubicados los satélites LEO, el área que cubre un haz o beam es mucho menor al de un satélite GEO tradicional, usualmente el beam de un satélite LEO tiene un diámetro de hasta 3 000 kilómetros [55].

3.4.3 PERIODO DE ROTACIÓN

Un satélite geoestacionario tiene el mismo periodo de rotación de la tierra (23 horas y 56 minutos) y un satélite LEO tiene un periodo de rotación entre 90 y 110 minutos, lo cual conlleva a que un satélite LEO de la vuelta a la tierra entre 6 y 8 veces; el tiempo de contacto entre el satélite y el equipamiento en tierra dura entre 5 y 15 minutos [56].

3.4.4 SISTEMA DE TRACKING

El sistema de seguimiento automático de una antena para satélite LEO requiere mucha más precisión y performance debido a que un satélite LEO se mueve a 7.25 km/s (satélite a una altitud de 1 200 km) mientras de un satélite GEO tiene un movimiento mínimo.

Una antena para satélites GEO tiene una velocidad axial de $0.5^\circ/s$ y una aceleración axial de $0.2^\circ/s^2$ y una antena para un satélite LEO tiene una velocidad de $5^\circ/s$ y una aceleración de $5^\circ/s$ [57].

3.4.5 GANANCIA DE LA ANTENA Y PIRE

Las antenas de Gateway para satélites LEO usualmente son de 3.7 m a 13 m de diámetro, con una ganancia mínima de 43.9 dBi (banda S) [58].

Las antenas de Gateway para satélites GEO usualmente son de 4.8 m a 13 m de diámetro, con una ganancia mínima de 53.5 dBi [58].

3.4.6 EFICIENCIA

Una red que usa satélites GEO tradicional puede alcanzar un MODCOD 16APSK $\frac{3}{4}$ (para un satélite con un PIRE y G/T promedio), una red que usa satélites GEO HTS puede alcanzar hasta 64 APSK, mientras que una red que usa satélites LEO puede alcanzar hasta 128APSK.

3.4.7 PÉRDIDA EN LOS ENLACES

Una de las grandes ventajas de usar un satélite LEO es la baja pérdida que tiene la señal, esto debido a la distancia que recorre la señal, en el caso de los satélites Geoestacionarios, la señal recorre casi 36 000 Km mientras que para los satélites LEO la señal recorre menos de 2 000 km [59].

Algunas de las atenuaciones que sufre la señal en su recorrido entre la estación en tierra y el satélite son:

- Atenuación atmosférica
- Atenuación por Lluvia
- Atenuación por nubes
- Atenuación por Mal alineamiento
- Atenuación por Polarización
- Atenuación por Gases Atmosféricos
- Atenuación en los equipos de transmisión y recepción (feeder, guías de onda, equipos y conectores).
- Pérdidas en espacio libre
- Otros

Pérdida en espacio libre

Para el cálculo de la pérdida que sufre la señal en un espacio libre se usará una fórmula simplificada, tal como se muestra a continuación:

$$L_{\text{free}}(\text{dB}) = 10 * \log_{10} \left[\left(\frac{4 * \pi * D}{C_{\text{m/s}}} \right)^2 \right] = 10 * \log_{10} \left[\left(\frac{4 * \pi * D}{\lambda} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

$$\lambda = \frac{C_{\text{m/s}}}{f_{\text{Hz}}} \dots\dots\dots (2)$$

D : Distancia entre la antena transmisora y el satélite

f : Frecuencia de la señal transmitida en Hz

λ : Longitud de onda

C: Velocidad de la luz, 299 792 458 m/s

Para el caso de satélite GEO, considerando una distancia de $35\,872 \times 10^3$ m entre la antena transmisora y el satélite, una frecuencia de 14 GHz (banda Ku) y la velocidad de la luz, la pérdida de la señal en espacio libre sería 206.47 dB.

Para el caso de satélite LEO, considerando una distancia de 1200×10^3 m entre la antena transmisora y el satélite, una frecuencia de 30 GHz (banda Ka) y la velocidad de la luz, la pérdida de la señal en espacio libre sería 183.57 dB.

De los valores obtenidos para una red con satélites GEO y otra con satélites LEO, la pérdida de la señal es mucho menor para el caso de un satélite LEO.

Pérdidas atmosféricas

Uno de los principales problemas que conlleva el uso de una red Las pérdidas que sufre la señal durante su recorrido desde y hace el satélite son debido a lluvias, nubes, centelleo, gases, nieve, etc.

Los cálculos realizados usando el software Satmaster para una señal en banda Ku da como resultado 0.2 dB en condiciones de lluvia para una frecuencia de 14.125 GHz y 0.12 dB para una frecuencia de 11.861 GHz, adicionalmente hay otras atenuaciones que sufre la señal, los cuales son mostrados la tabla.

Tabla 12: Atenuación de la señal por condiciones atmosféricas [elaboración propia]

		Satélite GEO		Satélite LEO	
		Downlink	Uplink	Downlink	Uplink
Datos de entrada	Satélite	E117WA		LEO	LEO
	Latitud del site	12.098S		37.866S	37.866S
	Longitud del site	77.033W		58.08W	58.08W
	Altitud del site	3.139km		0.084 km	0.084 km
	Frecuencia	14.125 GHz	11.861 GHz	28.5 GHz	19.5 GHz
	Polarización	H	V	R	L
	Modelo de lluvia	ITU-R		ITU-R	ITU-R
	Disponibilidad	99.50%		99.50%	

		Downlink	Uplink	Downlink	Uplink
Resultados	Absorción atmosférica	0.05 dB	0.04 dB	0.75 dB	0.76 dB
	Centelleo troposférico	0.14 dB	0.26 dB	0.24 dB	0.21 dB
	Atenuación por nubes	0.46 dB	0.33 dB	1.81 dB	0.88 dB
	Atenuación por lluvia	0.20 dB	0.12 dB	4.93 dB	2.32 dB
	Atenuación total	0.73 dB	0.56 dB	7.5 dB	3.97 dB
	Incremento del ruido debido a precipitaciones	1.14 dB	0.82 dB	*	1.52 dB
	Degradación	1.8 dB	1.26 dB	*	*
	Discriminación de cros polarización	59.65 dB	61.50 dB	*	*
	Indisponibilidad anual en año promedio	43.83 horas	43.83 horas	43.83 horas	43.83 horas
	Indisponibilidad en el peor mes	11.393 horas	11.393 horas	11.393 horas	11.393 horas

3.4.8 RETARDO

Mientras más cerca está el satélite, menor será el tiempo de propagación de la onda y por consiguiente, esto tendrá un impacto directamente proporcional en el tiempo de transmisión de la señal.

El retardo promedio en una red GEO es 600 ms mientras que en una red LEO es 70 ms aproximadamente (dependiendo de la altitud del satélite)

El tiempo de propagación de la señal depende directamente de la distancia que hay entre el satélite y la superficie terrestre y formula para calcularlo es:

$$a_{\max} = \cos^{-1} \left(\frac{r_e}{r_s} \right) \dots \dots \dots (3)$$

A continuación, se muestra una representación geométrica mediante la cual se puede calcular y entender los parámetros que determinan el tiempo de propagación.

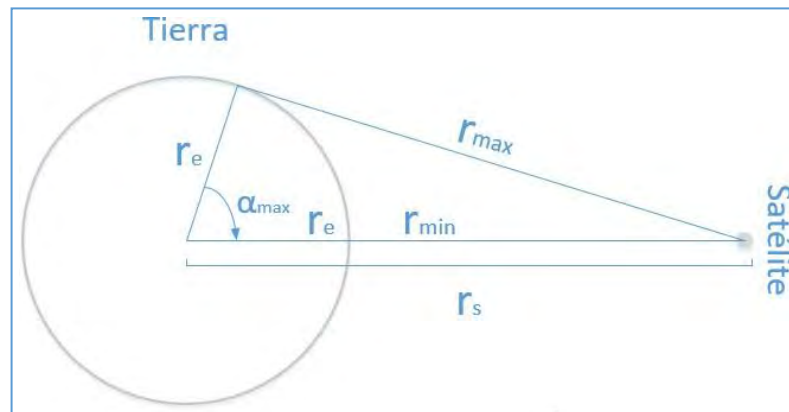


Figura 28: Representación gráfica del recorrido máximo y mínimo de la señal [elaboración propia]

Considerando que el diámetro de la tierra es 6370 km, que un satélite GEO orbita a 42 242 km del centro de la tierra y que un satélite LEO orbita a 7 570 km del centro de la tierra, el tiempo mínimo y máximo de propagación de la señal es:

GEO	LEO
• $a_{\max} = 81.33^\circ$	• $a_{\max} = 32.7^\circ$
• $r_{\min} = 35\,872\text{ km}$	• $r_{\min} = 1\,200\text{ km}$
• $r_{\max} = 41\,759\text{ km}$	• $r_{\max} = 4\,089.6\text{ km}$
• $T_{\min} = 478\text{ ms}$	• $T_{\min} = 16\text{ ms}$
• $T_{\max} = 557.17\text{ ms}$	• $T_{\max} = 54.6\text{ ms (*)}$

(*) Se asume que la señal viaja por un único satélite

Al tiempo de propagación se tiene que adicionar el tiempo de procesamiento de la señal cuando pasa por los equipos (segmento terrestre y satelital) para determinar el tiempo de transmisión de la señal o delay.

Para el caso de satélites LEO, también se tiene que adicionar el tiempo de transmisión entre satélites ya que la señal puede ser enviada por más de un satélite antes de retornar a tierra [60].

$$\text{Delay} = T_p + 2 * T_{\text{DOWN}} + 2 * T_{\text{UP}} + 2 * X * T_{\text{ISL}} \dots \dots \dots (4)$$

Donde:

T_P = Tiempo de procesamiento en todos los elementos de la red

T_{UP} = Tiempo de propagación de señal que va desde la antena en tierra a la antena del satélite.

T_{DOWN} = Tiempo de propagación de la señal que va desde la antena en el satélite hasta la antena en tierra.

T_{ISL} = Tiempo de propagación de la señal que viaja entre satélites.

X = número de conexiones entre satélites, a través de los cuales pasa la señal antes de ser enviada a tierra.

3.4.9 VIDA UTIL DE LOS SATÉLITES

Los satélites GEO tienen una vida útil de 15 años, aunque existen algunos casos donde se ha recargado combustible para aumentar su tiempo de vida útil, este tiempo de vida está limitado por la cantidad de combustible que puede llevar cada satélite y por el desgaste de los equipos debido a su uso y factores externos tales como radiación solar, temperatura, meteoritos, etc.

En el caso de los satélites LEO, el tiempo de vida útil es entre 7 y 10 años [61], esto debido a que usualmente son satélites de menor dimensión (respecto a los satélites GEO), llevan menos combustible y existe un mayor desgaste ocasionado por la atmósfera terrestre, mientras más cerca esté de la superficie terrestre, más resistencia pondrá la atmósfera, esto sumado a los efectos del cinturón de Van Allen.

3.4.10 DIMENSIONES DE LOS TERMINALES REMOTOS

Las antenas en banda C para satélites GEO comúnmente van desde 1.8m y para banda Ku se usan antenas desde 1.2m de diámetro. En el caso de redes con satélites LEO, las antenas en tierra son de menor tamaño y ganancia, siendo posible usar antenas con haz dirigible por software (Electronically Steerable Antennas) manteniendo una eficiencia igual e incluso superior a la de una red con satélites GEO.

Usualmente el mínimo diámetro de antena usando en una red con satélites GEO varía entre 74cm y 1.8m, dependiendo de la banda de operación.

- Banda C: ≥ 1.8 m
- Banda Ku: ≥ 1.2 m
- Banda Ka: ≥ 74 cm

En las redes con satélites LEO, la tendencia del mercado es usar antenas con un tamaño que oscila entre 30 cm y 74 cm

En el caso de los BUCs, en una red con satélite GEO se requiere usualmente 3 W con una antena de 1.2 m (banda Ku) o 1W con antena de 74 cm (en banda Ka) pero en una red con satélite LEO se requiere una menor ganancia

3.4.11 POSIBLE MODELO DEL SERVICIO

A diferencia de las redes datos por satélite tradicionales, donde un satélite cubre una amplia área geográfica (un país, región o continente) y se puede usar un único Gateway, una red con satélites LEO requiere una gran cantidad de Gateway y mucha infraestructura instalada en cada Gateway; debido a esto, la mejor opción para los proveedores de servicio de acceso a Internet y datos por satélite es de adquirir a los proveedores satelitales un servicio completo que incluya no solo la capacidad satelital (como en los modelos de negocio tradicional) si no también la infraestructura en tierra.

El modelo de negocio antes mencionado implicará que los proveedores de servicio tales como Telefónica, Claro, Hughes, no tengan que invertir en infraestructura (Capex) y que paguen en base a la cantidad de suscriptores que tengan y su consumo asociado.

3.5 RETOS POR SUPERAR Y DESVENTAJAS DE LOS SATÉLITE LEO

Los satélites LEO traen muchos beneficios respecto a los satélites GEO, tal como se mencionó en el ítem anterior, pero también trae una serie desventajas y retos que se deben superar antes de que se brinde servicios a los usuarios finales.

- Radiación – cinturón de Van Allen: En cinturón de Allen, debido a su alta concentración de energía representa un gran reto para los satélites que están compuesto de una gran cantidad de dispositivos electrónicos.
- Resistencia propia de la termosfera y exosfera: A diferencia de los satélites GEO, los satélites LEO están ubicados en una zona de la atmósfera donde existe una mayor concentración de elementos tales como gases (Exosfera) y cinturón de Van Allen.
- Cantidad de satélites ya existentes: Existe una gran cantidad de satélite en orbital LEO y si a esto agregamos los que serán lanzados por proveedores como Space X, Amazonas, Telesat, Oneweb, la cantidad será mucho mayor, aumentando el riesgo de

colisión y aumentando la cantidad de desechos espaciales si es que no se implementa un plan para retornar dichos satélites cuando cumplen su tiempo de vida útil.

- Interferencias con la frecuencia de otros satélites y redes terrestres: Los satélites LEO también operarán en las mismas bandas de frecuencia que otros satélites LEO y GEO, esto implica una mayor probabilidad de interferencias por lo que se deben implementar mecanismos para mitigarlas, mecanismos tales como “progressive pitch”.
- Cache debido a la conmutación o handover: Debido a que el tiempo que un satélite está en contacto con una estación en tierra es muy corto, y que la señal debe pasar por más de un satélite antes de ser reenviada a tierra, los elementos tanto en el satélite como en la superficie terrestre deben contar con mecanismo para almacenar la información durante el handover entre satélites.
- Efecto Doppler: El efecto doppler representa un gran reto a superar en las comunicaciones por satélite, que se incrementa mientras más rápido se mueve el satélite, es debido a que el equipamiento en tierra deberá contar con mecanismos que permitan ajustar de forma automática las variaciones en la frecuencia de la señal y tiempo de propagación.
- Sistema de tracking: Las antenas en tierra deben tener un sistema de seguimiento automático de alta precisión para mantenerse siempre alineadas con el satélite y sobre todo para no interrumpir la comunicación, incluso cuando se da el handover.
- Cantidad de satélites: Los satélites LEO usan la técnica de spot beams y su área de cobertura cubre pocos cientos de kilómetros, esto sumado a que da varias vueltas alrededor de la tierra cada día, conlleva al uso de muchos satélites para cubrir toda la superficie Terrestre, es por ello por lo que empresas como Telesat o Oneweb podrán en órbita más de 100 satélite LEO.
- Tiempo de vida útil: Los satélites LEO tienen una vida útil de aprox. 5 años por lo que los proveedores están lanzando varios satélites de respaldo y, además, cuentan con satélites de respaldo en tierra.

4. DISEÑO DE LA RED DE DATOS

En los siguientes subcapítulos se establecerán un conjunto de premisas que nos permitirán determinar las características y elementos que forman parte de una red VSAT GEO, esto incluirá los cálculos de enlace, el cálculo del ancho de banda requerido para soportar el tráfico de la red, la configuración de las portadoras outbound en inbound (BW o MODCOD) y finalmente la estimación del hardware necesario en el gateway y terminal remoto, para atender la demanda en dicha red.

Adicionalmente, tomando como los parámetros del servicio de cada sitio de la red VSAT GEO se diseñará una red VSAT con satélites LEO, este diseño incluirá los cálculos de enlaces, estimación de capacidad satelital requerida y determinación del hardware necesario para realizar la optimización de la red VSAT GEO, mediante la migración de todos los terminales remotos hacia la red VSAT LEO.

4.1 CALCULO DE LA DEMANDA

Como punto de partida se plantea la existencia de una red VSAT formada por 2000 terminales remotos ubicados dentro del territorio peruano que tiene un servicio de acceso a internet, esta red VSAT usa un único hub con un satélite de órbita geoestacionario en banda Ku.

En los siguientes dos ítems se define con mayor detalle las características de la red VSAT GEO.

4.1.1 Criterios de dimensionamiento generales

A continuación, se define todos los parámetros y características necesarios para el diseño de la red, dichos datos fueron establecidos en base a información de redes que actualmente están operando en distintos países de Latinoamérica y en base a información de los proveedores de capacidad satelital con los que opera dichas redes.

Datos generales de la red

- Tipo de red: Red VSAT
- Topología: Estrella
- Tipo de servicio: Acceso a internet
- Simultaneidad: Downstream 48% y Upstream 40%
- Planta en operación: 2 000 terminales remotos VSAT
- Ubicación de los terminales remotos: Dentro del territorio peruano

En la tabla 13 se muestra un consolidado de planes de servicio y la cantidad de terminales remotos asociados para el primer año; Adicionalmente, en el anexo “Planta existente” se indica la lista de los terminales remotos sus coordenadas y plan de servicio asociado.

Tabla 13: Planes de servicio y cantidad de terminales por cada plan [elaboración propia]

MIR Downstream ²	MIR Upstream ³	CIR (%)	Año 1
128.0 Kbps	42.0 Kbps	100%	175
256.0 Kbps	85.0 Kbps	70%	112
512.0 Kbps	170.0 Kbps	90%	364
1000.0 Kbps	333.0 Kbps	40%	98
1400.0 Kbps	466.0 Kbps	22%	120
2000.0 Kbps	666.0 Kbps	10%	453
2500.0 Kbps	833.0 Kbps	20%	168
3000.0 Kbps	1000.0 Kbps	12%	510
Total general			2000

² **MIR Downstream:** Representa la máxima tasa de transferencia con la que puede descargar información (datos) un terminal VSAT. Esta comunicación va del hub/Internet a la VSAT/host

³ **MIR Upstream:** Representa la máxima tasa de transferencia con la que pueda transmitir información (datos) un terminal VSAT. Esta comunicación va de la VSAT/host al hub/Internet.

En la siguiente imagen (figura 29) se muestra la ubicación de los terminales remotos dentro del área de estudio, teniendo una mayor concentración de terminales remotos en la costa y sierra.

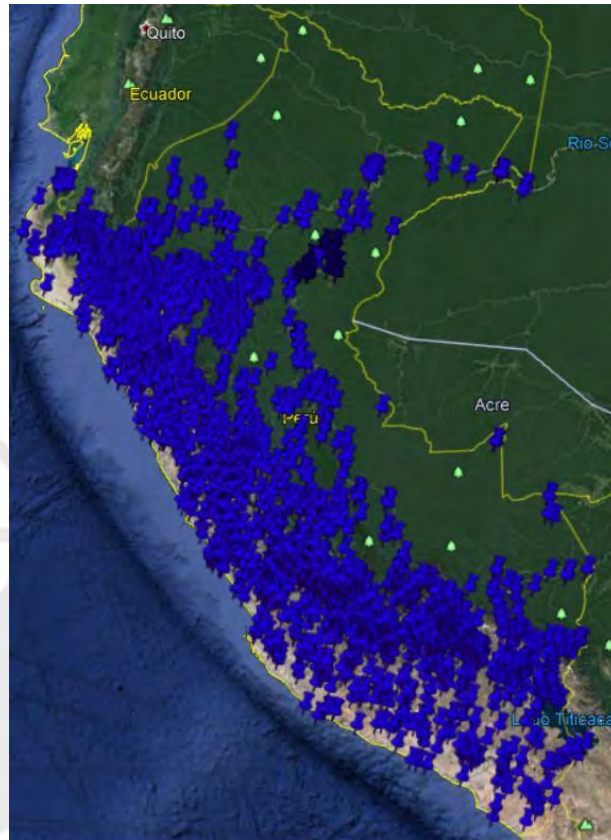


Figura 29: Ubicación de los terminales remotos [elaboración propia]

4.1.2 Estimación de tráfico demandado-generado por todos los usuarios finales

Teniendo en cuenta la cantidad de terminales remotos, plan de servicio y simultaneidad, se estableció que el tráfico total que soporta la red VSAT GEO es 309.39Mbps en outbound y 85.77Mbps en inbound, tal como se muestra en la tabla 14. Adicionalmente, se consideró que el ancho de banda garantizado por terminal remoto en momentos de saturación de la red es igual al CIR del plan de servicio asignado al terminal remoto.

A continuación, se muestra la formula usada para calcular el tráfico total en downstream (↓) y upstream (↑) en el segmento terrestre (segmento LAN). Los valores de simultaneidad pueden ser obtenidos del ítem 3.2.1

$$\text{Tráfico_LAN} = \text{MIR} * \text{CIR} * \# \text{VSAT} * \text{Simultaneidad} \dots\dots\dots (5)$$

Tabla 14: Tráfico total de la red en downstream y upstream a nivel terrestre inicial
[elaboración propia]

MIR Downstream	MIR Upstream	CIR (%)	# VSAT	Tráfico_LAN (↓)	Tráfico_LAN (↑)
128.0 Kbps	42.0 Kbps	100%	175	10.75 Mbps	2.94 Mbps
256.0 Kbps	85.0 Kbps	70%	112	9.63 Mbps	2.67 Mbps
512.0 Kbps	170.0 Kbps	90%	364	80.51 Mbps	22.28 Mbps
1000.0 Kbps	333.0 Kbps	40%	98	18.82 Mbps	5.22 Mbps
1400.0 Kbps	466.0 Kbps	22%	120	17.74 Mbps	4.92 Mbps
2000.0 Kbps	666.0 Kbps	10%	453	43.49 Mbps	12.07 Mbps
2500.0 Kbps	833.0 Kbps	20%	168	40.32 Mbps	11.20 Mbps
3000.0 Kbps	1000.0 Kbps	12%	510	88.13 Mbps	24.48 Mbps
Total general			2000	309.39 Mbps	85.77 Mbps

4.2 DISEÑO DE LA RED VSAT GEO EXISTENTE

La tesis tiene como objetivo optimizar una red VSAT GEO por lo que, como punto de partida, en este capítulo se diseñara la red VSAT GEO, definiendo para ello algunas características tales como banda de frecuencia de operación, características del satélite Geoestacionario, etc.

4.2.1 Criterios de dimensionamiento

A continuación, se define todas los parámetros y características necesarios para el diseño de la red, dichas datos fueron establecidos en base a estadísticas extraídas de redes en producción.

Datos generales de la red VSAT GEO [elaboración propia]

- Eficiencia: 2.78bps/Hz en Downstream y 1.5 bps/Hz en inbound. Estos valores han sido de los cálculos de enlace.
- Técnica de acceso: DVB-S2 en Downstream y MF-TDMA en Upstream
- MODCOD Downstream y eficiencia: Máximo 16APSK5/6 (2.86 bps) y mínimo 8PSK3/4 (1.93 bps). Los valores consideran un roll off del 5%.
- MODCOD Upstream: Máximo 8PSK4/5 (1.55 bps/Hz) y mínimo QPSK3/4 (0.97 bps/Hz). Los valores consideran un roll off del 20%.
- Overhead⁴: Downstream 10% y Upstream 29%

⁴ Estos son valores promedio que se obtuvieron luego de observar el comportamiento de tres redes en operación, asociados a hubs distintos y con terminales ubicados en distintos países.

- **Gateway:**
 - 1 Gateway
 - Ubicación: En Perú (Lat: -12.285787, Long: -76.846651)
 - Antena de 9.1m
 - BUC TWTA de 750W con configuración redundante 1:1
 - LNBs con configuración redundante 1:1
 - Capacidad máxima del modulador: 45Msps
 - Capacidad máxima del demodulador: 7.5Msps y 8 portadoras

Termina Remoto

- Módem con DVB-S2 en outbound y MF-TDMA en inbound
- Antena offset de 1.2 m de diámetro
- BUC de 3W
- LNB PLL

Satélite

- Tipo de satélite: Geoestacionario en banda Ku estándar
- Tipo de cobertura: Cobertura amplia
- Banda: Banda Ku
- Frecuencia Tx/Rx: 14.0 GHz – 14.5 GHz (Tx) y 11.7GHz – 12.2 GHz (Rx)
- Posición orbital: 116.8 grados Oeste
- IBO (dB): 4.9 dB
- OBO (dB): 3.3 dB
- PIRE Operación/Saturación (dBW): 50.3/53.6
- G/T máximo (dB/K): 8.7
- SFD (dBW/m²): -92.6
- Ancho de banda de cada transponder (MHz): 36

Tráfico y cantidad de terminales

- Lo indicado en los ítems 3.1.2
- Se considera que la variación en la cantidad de terminales VSAT GEO oscila entre los años 1 y 4 (entre nuevos enlaces y enlaces dados de baja) sin que afecte la cantidad de terminales totales sin embargo a partir del año 5, con la aparición de soluciones con satélites LEO y soluciones terrestres, el descenso de la cantidad de terminales VSAT GEO disminuye un 15% anual. En la tabla 15 se aprecia que la cantidad de terminales VSAT GEO inicialmente es 2 000 pero debido a la aparición

de otras tecnologías, la cantidad de terminales VSAT GEO en el año 10 se reduce a 769.

Tabla 15: Cantidad de enlaces VSAT GEO por año [elaboración propia]

MIR Downstream ⁵	MIR Upstream ⁶	CIR (%)	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
128.0 Kbps	42.0 Kbps	100%	175	175	175	175	149	127	108	92	79	68
256.0 Kbps	85.0 Kbps	70%	112	112	112	112	96	82	70	60	51	44
512.0 Kbps	170.0 Kbps	90%	364	364	364	364	310	264	225	192	164	140
1000.0 Kbps	333.0 Kbps	40%	98	98	98	98	84	72	62	53	46	40
1400.0 Kbps	466.0 Kbps	22%	120	120	120	120	102	87	74	63	54	46
2000.0 Kbps	666.0 Kbps	10%	453	453	453	453	386	329	280	238	203	173
2500.0 Kbps	833.0 Kbps	20%	168	168	168	168	143	122	104	89	76	65
3000.0 Kbps	1000.0 Kbps	12%	510	510	510	510	434	369	314	267	227	193
Total general			2000	2000	2000	2000	1704	1452	1237	1054	900	769

4.2.2 Estimación de tráfico

El tráfico a nivel terrestre considerando la evolución de la planta existente y utilizando la fórmula 5 (ver ítem 4.1.2) nos da como resultando los valores indicados en la tabla 16; inicialmente el tráfico será 309.39 Mbps/85.77 Mbps pero en el año 10 solo se tendrá 139.28 Mbps/45.22 Mbps, esto debido a la disminución en la cantidad de enlaces VSAT GEO (ver tabla 15).

Tabla 16: Tráfico GEO en el segmento terrestre [elaboración propia]

Año	Tráfico LAN downstream	Tráfico LAN upstream
Año 1	309.39 Mbps	85.77 Mbps
Año 2	309.39 Mbps	85.77 Mbps
Año 3	309.39 Mbps	85.77 Mbps
Año 4	309.39 Mbps	85.77 Mbps
Año 5	263.56 Mbps	73.06 Mbps
Año 6	224.56 Mbps	62.25 Mbps
Año 7	191.37 Mbps	53.05 Mbps
Año 8	163.12 Mbps	45.22 Mbps
Año 9	139.28 Mbps	38.61 Mbps
Año 10	118.97 Mbps	32.98 Mbps

Cuando el tráfico ingresa a los equipos de banda base y terminal remoto, antes de ser enviado al satélite, se agrega un overhead, el cual varía dependiendo de la tecnología de banda base

⁵ **MIR Downstream:** Representa la máxima tasa de transferencia con la que puede descargar información (datos) un terminal VSAT. Esta comunicación va del hub/Internet a la VSAT/host

⁶ **MIR Upstream:** Representa la máxima tasa de transferencia con la que pueda transmitir información (datos) un terminal VSAT. Esta comunicación va de la VSAT/host al hub/Internet.

que se usa, para este caso se consideró 10% para el downstream y 29% para el upstream (ver ítem 3.2.1), por lo que el tráfico a ser transmitido al satélite sería 340.33 Mbps en downstream y 110.64 Mbps en upstream (tráfico LAN: 309.39 Mbps/85.77 Mbps).

Para la estimación de tráfico a ser transmitido al satélite se puede usar cualquiera de las siguientes dos fórmulas:

$$\text{Tráfico}_{Sat} = \text{MIR} * \text{CIR} * \#\text{VSAT} * \text{Simultaneidad} * (1 + \text{overhead}) \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{Tráfico}_{Sat} = \text{Tráfico}_{LAN} * (1 + \text{overhead}) \dots\dots\dots (7)$$

Nota: La simultaneidad se tomó del ítem 3 1.1 y el overhead del ítem 3.2.1

Tabla 17: Tráfico total de la red en downstream y upstream a nivel satelital [elaboración propia]

Año	Tráfico downstream	Tráfico upstream
Año 1	340.33 Mbps	110.64 Mbps
Año 2	340.33 Mbps	110.64 Mbps
Año 3	340.33 Mbps	110.64 Mbps
Año 4	340.33 Mbps	110.64 Mbps
Año 5	289.91 Mbps	94.25 Mbps
Año 6	247.02 Mbps	80.31 Mbps
Año 7	210.50 Mbps	68.43 Mbps
Año 8	179.43 Mbps	58.33 Mbps
Año 9	153.21 Mbps	49.81 Mbps
Año 10	130.86 Mbps	42.54 Mbps

4.2.3 Link Budget

Los cálculos de enlace realizado con la ayuda del software SATMASTER dieron como resultado que el máximo MODCOD que se tendría en condiciones de cielo claro será 16APSK5/6 en el downstream y 8PSK4/5 en el upstream.

Los datos ingresados al software fueron tomados de los ítems 4.1.1, 4.1.2, 4.2.1 y 4.2.2, para mayor detalle sobre los parámetros a ingresar en el SATMASTER ver el anexo “Link Budget GEO - Satmaster”

En la siguiente tabla se indica la eficiencia que se alcanza con cada MODCOD y además se determina la eficiencia promedio de la red tomando como referencia 4 terminales remotos ubicados dentro del territorio peruano y en diferentes zonas geográficas. Los 2000 terminales se han dividido en 4 grupos (por ubicación geográfica) y asociado a uno de los 4 sites mostrados

en la tabla (en base a la “distribución de la planta”) y se asume que el grupo de terminales tiene el mismo comportamiento que el site al que está asociado.

Tabla 18: MODCOD y eficiencia de la red VSAT GEO (bps/Hz) [elaboración propia]

	Site	Latitud	Longitud	Distribución de la Planta	Condición		MODCOD	Eficiencia (bps/Hz)	Eficiencia promedio (bps/Hz)
Downstream	Site 1	-12.70	-69.23	22%	Clear Sky	75%	16APSK5/6	2.86	2.78
					Rain Fade	25%	8PSK3/4	1.93	
	Site 2	-11.40	-75.83	26%	Clear Sky	80%	16APSK5/6	2.86	
					Rain Fade	20%	16APSK4/5	2.74	
	Site 3	-12.02	-77.01	26%	Clear Sky	80%	16APSK5/6	2.86	
					Rain Fade	20%	16APSK4/5	2.74	
	Site 4	-6.06	-78.76	26%	Clear Sky	80%	16APSK5/6	2.86	
					Rain Fade	20%	16APSK3/4	2.57	
Upstream	Site 1	-12.70	-69.23	22%	Clear Sky	75%	8PSK4/5	1.55	1.5
					Rain Fade	25%	QPSK3/4	0.97	
	Site 2	-11.40	-75.83	26%	Clear Sky	80%	8PSK4/5	1.55	
					Rain Fade	20%	8PSK3/4	1.45	
	Site 3	-12.02	-77.01	26%	Clear Sky	80%	8PSK4/5	1.55	
					Rain Fade	20%	8PSK3/4	1.45	
	Site 4	-6.06	-78.76	26%	Clear Sky	80%	8PSK4/5	1.55	
					Rain Fade	20%	8PSK3/4	1.45	

4.2.4 Dimensionamiento

Para determinar el ancho de banda necesario para soportar todo el tráfico se utilizó la eficiencia indicada en el ítem 4.2.3 (tabla 18), dando como resultado la tabla siguiente, la cual muestra que la red VSAT GEO necesita 122.42 MHz en outbound y 73.76 MHz en inbound (tabla 19).

La fórmula usada para calcular el BW requerido fue:

$$BW = MIR * CIR * Simultaneidad * (1 + overhead) * \#VSAT * Eficiencia \dots\dots\dots (8)$$

Tener en cuenta que los valores de simultaneidad y overhead son tomados del ítem 4.2.1 y el valor de eficiencia es tomado del ítem 4.2.3

Tabla 19: Ancho de banda utilizado por la red VSAT GEO [elaboración propia]

Año	Tráfico downstream	Tráfico upstream
Año 1	122.42 MHz	73.76 MHz
Año 2	122.42 MHz	73.76 MHz
Año 3	122.42 MHz	73.76 MHz
Año 4	122.42 MHz	73.76 MHz
Año 5	104.29 MHz	62.83 MHz
Año 6	88.86 MHz	53.54 MHz
Año 7	75.72 MHz	45.62 MHz
Año 8	64.54 MHz	38.89 MHz
Año 9	55.11 MHz	33.21 MHz
Año 10	47.07 MHz	28.36 MHz

El dimensionamiento del hardware se tuvo que realizar considerando el escenario con mayor demanda (año 1), dando como resultado que cada transponder de 36 MHz permitirá pasar un tráfico promedio de 100.08 Mbps, debido a esto para el downstream se necesita tres portadoras de 36 MHz cada una y una portadora de 14.42 MHz. Par el caso del upstream, teniendo en cuenta las limitaciones en ancho de banda, cantidad de portadoras de retorno soportada por los demoduladores del hub y la eficiencia, se determinó que cada portadora sería de 646 KHz.

La cantidad de redes y portadoras de la siguiente tabla se elaboró tomando como datos entrada el ancho de banda total requerido (tabla 19), el ancho de banda de cada transponder y el ancho de banda de cada portadora upstream, el cual es determinado dividiendo el máximo MIR Upsteam (1000 Kbps) entre la eficiencia máxima en upstream (1.55 bps/Hz).

Tabla 20: Dimensionamiento de portadoras de la red VSAT GEO [elaboración propia]

	subred 1	subred 2	subred 2	subred 2
BW Downstream	36.00 MHz	36.00 MHz	36.00 MHz	14.42 MHz
BW Upstream	21.00 MHz	21.00 MHz	21.00 MHz	10.76 MHz
	33 Carriers	33 Carriers	33 Carriers	17 Carriers
	0.646 MHz x Portadora	0.646 MHz x Portadora	0.646 MHz x Portadora	0.646 MHz x Portadora
	1000 Kbps - Máximo x Carrier	1000 Kbps - Máximo x Carrier	1000 Kbps - Máximo x Carrier	1000 Kbps - Máximo x Carrier

En resumen, la red VSAT GEO contará con 4 redes, cada red tendrá una portadora Outbound (downstream) de 36 MHz. En el inbound, se tendrá portadoras de 646 KHz, en tres de las subredes se tendrá 33 portadoras y en la cuarta red se tendrá 17 portadoras.

4.2.5 Topología y elementos de la red

La red VSAT GEO está segmentado en 4 partes (ver figura 30) o subred a nivel de banda base, pero comparten la infraestructura de TollGate y RF, tal como se ve en la siguiente imagen.

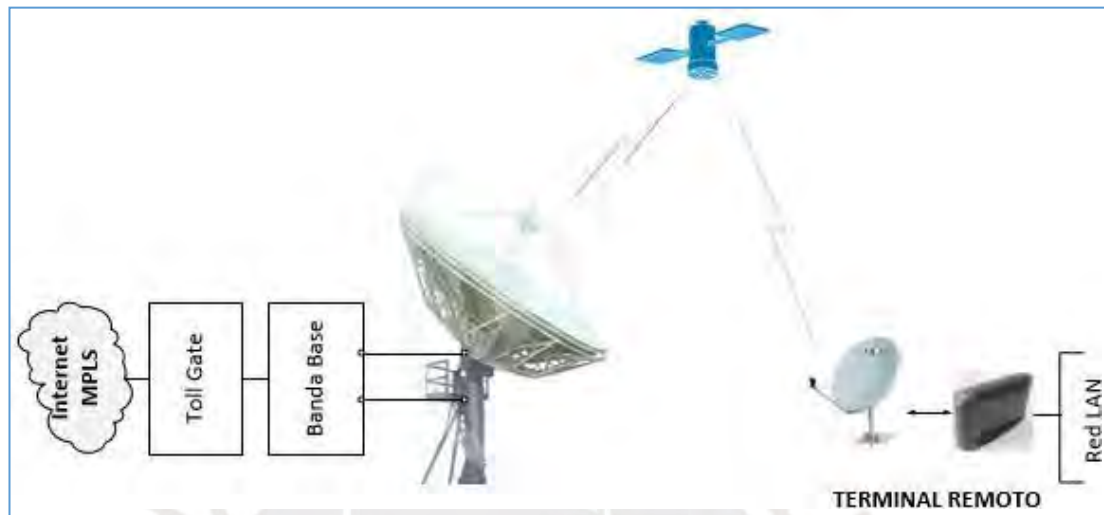


Figura 30: Topología de la red [elaboración propia]

En los siguientes ítems se describe con mayor detalle los equipos que forman parte de la red VSAT GEO.

Sistema de RF

El sistema de RF está formado por una antena de hasta 9.1m formado por el reflector principal, sub reflector, feeder, diplexor y King Post con libertar de movimiento de 200° en azimut, un subsistema de tracking formado por ACU, un beacon Receiver, SCU, 2 Motores, Limit Switch, Resolver, un subsistema de Rx formado por un arreglo de LNBS (1:1), un switch de redundancia, un controlador indoor de LNBS y 1 divisor 1:8 activo, un sub sistema de Tx formado por un arreglo de amplificadores de potencia de 400 W redundante 1:1 y un analizador de espectros en banda L (5 MHz a 2 100 MHz).

Sistema de Banda Base

Los equipos que forman parte del sistema de banda base son 8 modulador en configuración redundante 1:1 y uno de repuesto, 12 demoduladores en configuración redundante 1:N y uno de repuesto, 6 servidores de procesamiento en balanceo de carga y uno de repuesto, 4 Switches y uno de repuesto, dos routers de agregación y 2 Firewall para gestión fuera de banda, 6 servidor NMS redundando con arreglo de discos interno o externo y un rack

En la siguiente tabla se muestra la distribución de los equipos de banda base por cada subred y también se indica los repuestos.

Tabla 21: Lista de equipos de banda base de la red VSAT GEO [elaboración propia]

Equipos	subred 1	subred 2	subred 3	subred 4	Repuesto
Rack + PDU	2				
Chasis 20 Slots	2				
Moduladores	2	2	2	2	1
Demoduladores	4	4	4	2	1
Procesadores IP	6				1
NMS Server	6				1
Switches	4				1
Routers de agregación	2				1
Router de borde	2				
Firewall	2				
Servidor DNS	2				
Rack 42RU	1				

Sistema de TollGate

El sistema de tollgate estará formado por 2 routers de agregación, 2 routers de frontera, 2 switches de core, 2 firewall perimetrales, 2 servidores DNS y un rack

Terminal remoto

Cada terminal remoto incluye un modem satelital, una antena, un BUC, un LNB y un par de cables coaxiales

4.3 ARQUITECTURA PROPUESTA

La solución propuesta para optimizar la red VSAT GEO consiste en reemplazar todo el hardware existente en el local del usuario final (terminal remoto) y usar una constelación de satélite en órbita LEO que tienen spots beams y operan en banda Ka. Para el caso del Gateway, se contempla usar la infraestructura del proveedor de los satélites.

En una red VSAT GEO el dueño del satélite, usualmente, solo provee la capacidad satelital y el proveedor de servicio es responsable de adquirir los equipos, las licencias, el datacenter, etc. necesarios para brindar el servicio al usuario final sin embargo en una red VSAT con satélites LEO (red VSAT LEO) la responsabilidad del proveedor de capacidad satelital también es brindar el gateway, esto debido a que la constelación de satélites usan una mayor cantidad de Gateways o hubs, ubicados en distintas zonas geográficas y no está dedicada al área geográfica considerada en este estudio, abarca una área geográfica mayor.

En los siguientes subcapítulos se establece las premisas para elaborar los cálculos de enlace y en base a ello se determinará el ancho de banda y hardware necesario para la nueva red. Además, se describe las características de la solución propuesta.

4.3.1 Criterios de dimensionamiento

Los criterios de dimensionamiento a tomar en cuenta consideran la planta existente en la red VSAT GEO y se toma como datos referenciales sobre las características de una satélite LEO, esto debido a que las constelaciones de satélites aún están en etapa de desarrollo y diseño. Existe varios proveedores que ya han lanzado satélites, pero principalmente para realizar pruebas y que esto permita mejorar el rendimiento de los futuros satélites y el servicio en general.

A continuación, se listan los criterios y premisas que se tomarán a en cuenta para realizar el link budget, determinar el ancho de banda requerido y el hardware necesario para realizar la migración de servicios, desde la red VSAT GEO a la nueva red.

Datos generales

- Técnica de acceso: DVB-S2X en Downstream y SCPC dinámico en Upstream
- Overhead⁷: Downstream 3.2% y Upstream 3%

Gateway

- 1 Gateway que soporta multibeam
- Ubicación: Dentro del territorio peruano
- 3 antenas de 3.6 m
- BUC de 600 W con configuración redundante 1:1 en cada antena
- LNBS con configuración redundante 1:1 en cada antena

Constelación de Satélites [2]

- Satélite: LEO en banda Ka
- Banda: Banda Ka
- Frecuencia Tx/Rx del Gateway: banda Ka
- Frecuencia Tx/Rx del beam de usuario: banda Ku
- Tipo de cobertura: Spot Beam
- Cantidad de spots beams de usuario: 7

⁷ Los valores de overhead fueron tomados de las especificaciones técnicas de un fabricante de equipos de banda base

- Cantidad de satélite por plano orbital: 32 satélites
- PIRE Operación/Saturación (dBW) del Gateway: 38
- PIRE Operación/Saturación (dBW) del beam de usuario: 34.6
- G/T máximo (dB/K) del Gateway: 11.4
- G/T máximo (dB/K) del beam de usuario: -1
- Ancho de banda de cada transponder o spot beam: 250 MHz simétrico
- Cobertura de la constelación de satélites: A nivel mundial, incluido Perú.

En la figura 31 se muestra la cobertura que tendría la constelación de satélites LEO, únicamente para Perú, y que se usaría para migrar la red VSAT GEO. Esta cobertura está formada por 7 spot beams de usuario y forma solo una aproximación de la cobertura que tendrá las constelaciones LEO que tendrá Amazon, Telesat, SpaceX, LEO, etc.

Si consideramos que cada beam sea de 250 MHz/250 MHz (Downstream/Upstream) y que en banda Ka se dispone de aproximadamente 3.5 GHz para transmisión y 3.5 GHz de ancho de banda para recepción, se puede soportar los 7 spot beams desde un mismo Gateway, el cual puede estar ubicado dentro de Perú. Tener en cuenta que esto solo es una estimación ya que el propósito de la tesis no abarca el diseño de la cobertura de la constelación de satélites LEO.



Figura 31: Cobertura de la constelación de satélites LEO [elaboración propia]

Termina Remoto

- Módem con DVB-S2X en outbound y SCPC dinámico en inbound.
- 2 antenas offset de 75 m de diámetro.
- BUCs de 1W con LNBs PLL integrado en un solo bloque.
- Ubicación: Dentro del territorio peruano

Cantidad de terminales

- La cantidad de terminales considerando que hay un crecimiento del 15% anual (a partir del año 5) en el número de enlaces VSAT por lo que sería 2 000 desde el año 1 hasta el año 4, y luego de la migración hacia la red VSAT LEO, la cantidad de terminales se incrementará hasta tener 4 047 terminales remotos. La evolución de la cantidad de terminales por año es mostrada en la tabla 22.

Tabla 22: Cantidad de enlaces VSAT LEO [elaboración propia]

MIR Downstream [Kbps]	MIR Upstream [Kbps]	CIR (%)	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
128.0 Kbps	42.0 Kbps	100%	175	175	175	175	175	202	233	268	309	356
256.0 Kbps	85.0 Kbps	70%	112	112	112	112	112	129	149	172	198	228
512.0 Kbps	170.0 Kbps	90%	364	364	364	364	364	419	482	555	639	735
1000.0 Kbps	333.0 Kbps	40%	98	98	98	98	98	113	130	150	173	199
1400.0 Kbps	466.0 Kbps	22%	120	120	120	120	120	138	159	183	211	243
2000.0 Kbps	666.0 Kbps	10%	453	453	453	453	453	521	600	690	794	914
2500.0 Kbps	833.0 Kbps	20%	168	168	168	168	168	194	224	258	297	342
3000.0 Kbps	1000.0 Kbps	12%	510	510	510	510	510	587	676	778	895	1030
Total general			2000	2000	2000	2000	2000	2303	2653	3054	3516	4047

4.3.2 Estimación de tráfico

El tráfico que soportará la red VSAT LEO será igual al tráfico de la red VSAT GEO y no se considera un incremento del MIR de los planes de servicio (ítem 3.1.2).

El tráfico en el segmento terrestre ha sido terminado usando la fórmula 5 y el resultado de dicho ejercicio es mostrado a detalle en la tabla 23. El tráfico se mantiene en 309.39 Mbps/85.66 Mbps hasta el año 4, luego de hacer la migración desde la red VSAT GEO a la red VSAT LEO, el tráfico se incrementa debido a la cantidad de terminales remotos, esto conlleva a tener un tráfico de 626 Mbps/173.54 Mbps en el año 10.

Tabla 23: Tráfico LAN de la red VSAT GEO + LEO [elaboración propia]

Año	Downstream	Upstream
Año 1	309.39 Mbps	85.77 Mbps
Año 2	309.39 Mbps	85.77 Mbps
Año 3	309.39 Mbps	85.77 Mbps
Año 4	309.39 Mbps	85.77 Mbps
Año 5	309.39 Mbps	85.77 Mbps
Año 6	356.29 Mbps	98.77 Mbps
Año 7	410.38 Mbps	113.77 Mbps
Año 8	472.47 Mbps	130.98 Mbps
Año 9	543.92 Mbps	150.78 Mbps
Año 10	626.00 Mbps	173.54 Mbps

Cuando el tráfico ingresa a los equipos de banda base y terminal remoto, antes de ser enviado al satélite, se agrega un overhead, el cual varía dependiendo de la tecnología de banda base que se usa por lo que el tráfico transmitido al satélite es mayor, para este caso, tomando los valores de overhead del ítem 4.3.1, el tráfico luego de la migración (año 5) será 319.29 Mbps en Downstream y 88.51 Mbps en upstream, tal como se muestra en la tabla 24. Al final del periodo de análisis el tráfico será 646.03 Mbps/179.09 Mbps.

Este resultado difiere del obtenido para la red VSAT GEO debido a que el valor de overhead es distinto, atribuible a que se considera una plataforma de banda base más eficiente. Adicionalmente, la cantidad de terminales VSAT aumenta a partir del año 5.

La fórmula 6 y 7 fueron usadas para determinar el tráfico total.

Tabla 24: Tráfico a ser soportado por la red VSAT LEO a nivel satelital [elaboración propia]

Año	Tráfico LAN downstream	Tráfico LAN upstream
Año 1	324.86 Mbps	96.92 Mbps
Año 2	324.86 Mbps	96.92 Mbps
Año 3	324.86 Mbps	96.92 Mbps
Año 4	324.86 Mbps	96.92 Mbps
Año 5	319.29 Mbps	88.51 Mbps
Año 6	367.69 Mbps	101.93 Mbps
Año 7	423.51 Mbps	117.41 Mbps
Año 8	487.59 Mbps	135.17 Mbps
Año 9	561.33 Mbps	155.61 Mbps
Año 10	646.03 Mbps	179.09 Mbps

4.3.3 Link budget

Los satélites LEO cuentan con procesamiento a bordo que permite recibir la señal enviada por el hub o terminal remoto y convertirlo en datos para que posteriormente sean conmutados hacia otro satélite o reenviarlo a la superficie terrestre.

Debido a esta característica de los satélites LEO, el cálculo de enlace debe ser realizado de forma independiente por cada segmento del enlace.

- **Tramo A:** Enlace del Gateway al satélite receptor (satélite A)
- **Tramo B:** Enlace desde el satélite receptor (satélite A) al satélite transmisor (satélite B)
- **Tramo C:** Enlace desde el satélite transmisor (satélite B) al terminal remoto
- **Tramo D:** Enlace desde el terminal remoto al satélite receptor (satélite B)
- **Tramo E:** Enlace desde el satélite receptor (satélite B) al satélite transmisor (satélite B)
- **Tramo F:** Enlace desde el satélite transmisor (satélite A) al gateway.

En la figura 32 se muestra cada uno de los tramos que se debe analizar a través de los cálculos de enlace.

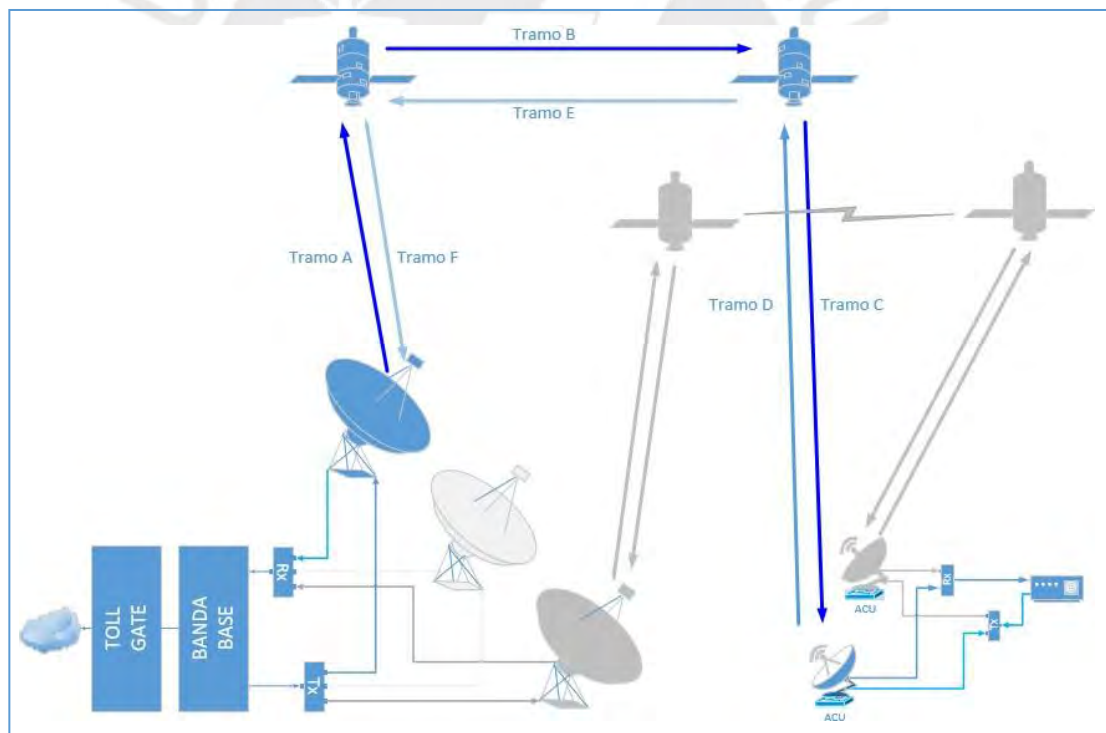


Figura 32: Segmentos a analizar a través de los cálculos de enlace [elaboración propia]

Los datos ingresados al software para realizar los cálculos de enlace fueron tomados del ítem 3.3.1, para mayor detalle sobre los parámetros a ingresar en el SATMASTER ver el anexo “Link Budget GEO - Satmaster”

El cálculo de enlace realizado usando el software SATMASTER, considerando 80% de la red con cielo despejado y 20% con lluvia, dio como resultado que la eficiencia de la red se incrementa sustancialmente respecto a la red VSAT GEO, tal como se muestra en la tabla 25. Los parámetros del satélite fueron tomados del estudio realizado por Inigo del Portilloa, Bruce G. Cameronb, y Edward F. Crawleyc [83]. El detalle de los cálculos de enlace se puede encontrar en el anexo 2.

Tabla 25: MODCOD y eficiencia de la red VSAT LEO [elaboración propia]

		Site	Latitud	Longitud	Distribución de la Planta	Condición		MODCOD	Eficiencia (bps/Hz)	Eficiencia promedio (bps/Hz)
Downstream	Uplink	Hub	-12.29	-76.85	100%	Clear Sky	80%	256APSK 32/45	5.16	5.0
						Rain Fade	20%	64APSK4/5	4.37	
	Downlink	Site 1	-12.70	-69.23	22%	Clear Sky	75%	32APSK11/15	3.35	3.31
						Rain Fade	25%	16APSK2/3L	2.44	
		Site 2	-11.40	-75.83	26%	Clear Sky	80%	32APSK3/4	3.42	
						Rain Fade	20%	16APSK77/90	3.49	
		Site 3	-12.02	-77.01	26%	Clear Sky	80%	32APSK3/4	3.42	
						Rain Fade	20%	16APSK5/6	3.05	
Site 4	-6.06	-78.76	26%	Clear Sky	80%	32APSK3/4	3.42			
				Rain Fade	20%	16APSK7/9	2.85			
Upstream	Uplink	Site 1	-12.70	-69.23	22%	Clear Sky	75%	256APSK31/45L	5.00	4.92
						Rain Fade	25%	32APSK8/9	4.06	
		Site 2	-11.40	-75.83	26%	Clear Sky	80%	256APSK31/45L	5.00	
						Rain Fade	20%	256APSK2/3L	4.84	
		Site 3	-12.02	-77.01	26%	Clear Sky	80%	256APSK31/45L	5.00	
						Rain Fade	20%	256APSK2/3L	4.84	
		Site 4	-6.06	-78.76	26%	Clear Sky	80%	256APSK31/45L	5.00	
						Rain Fade	20%	256APSK2/3L	4.84	
	Downlink	Site 1	-12.29	-76.85	22%	Clear Sky	80%	64APSK7/9	4.26	4.26
						Rain Fade	20%	64APSK7/9	4.26	

4.3.4 Dimensionamiento

Considerando los resultados de eficiencia obtenidos en los cálculos de enlaces, se determinó que se requiere 96.46 MHz para el downstream y 20.78 MHz upstream, cuando se migra los enlaces a la red VSAT LEO y debido al incremento paulatino de la cantidad de enlaces, el BW en el año 10 será 195.17 MHz/42.04 MHz. Debido a que la constelación de satélites requiere varios spots beams, la capacidad requerida estará distribuida entre los 7 sport beams.

En la siguiente tabla se muestra la capacidad satelital requerida por año, sin tener en cuenta a que sport beam corresponde.

Tabla 26: Ancho de banda que usará la red VSAT LEO [elaboración propia]

Año	Tráfico downstream	Tráfico upstream
Año 1	122.42 MHz	73.76 MHz
Año 2	122.42 MHz	73.76 MHz
Año 3	122.42 MHz	73.76 MHz
Año 4	122.42 MHz	73.76 MHz
Año 5	96.46 MHz	20.78 MHz
Año 6	111.09 MHz	23.93 MHz
Año 7	127.95 MHz	27.56 MHz
Año 8	147.31 MHz	31.73 MHz
Año 9	169.59 MHz	36.53 MHz
Año 10	195.17 MHz	42.04 MHz

Nota: La fórmula 8 fue usada para calcular los datos de la tabla 26.

4.3.5 Topología y elementos de la red

Debido a que la solución propuesta considera el uso de satélites LEO cuyo periodo de rotación es menor al de la tierra, a nivel satelital se tendrá por lo menos 32 satélites en la misma trayectoria orbital para poder dar cobertura de forma ininterrumpida en toda el área de estudio. Respecto al tramo terrestres, en el Gateway se contará, como mínimo, con dos antenas transmisoras/receptoras de 3.5m de diámetros con tracking automático y una tercera antena de respaldo. Este equipamiento y los demás elementos que forman el Gateway serán provistos por el proveedor del satélite, como parte del servicio que contratará el proveedor de servicio. En el caso del terminal remoto, se requerirá dos antenas de 75cm con tracking automático.

La figura 33 muestra el recorrido que seguiría la señal, desde la estación transmisora hasta el terminal remoto (o viceversa), pudiendo ser que la señal pasa a través de un único satélite o de varios satélites, todo esto, depende de la ubicación del terminal remoto que recibirá la señal. Además, se muestra cómo conmutaría el tráfico, desde una antena a otra, y desde un satélite a otro. En la figura, el tráfico está pasando por todos los elementos de color azul pero cuando los satélites de color azul estén cerca de perder contacto con las antenas en tierra, inmediatamente las antenas de color gris sincronizarán con los satélites de color gris y el hub pasará el tráfico de las antenas de color azul a las antenas de color gris, asegurando así la continuidad del servicio. Tener en cuenta que un satélite en órbita LEO está en contacto con una antena en tierra por un periodo corto de tiempo.

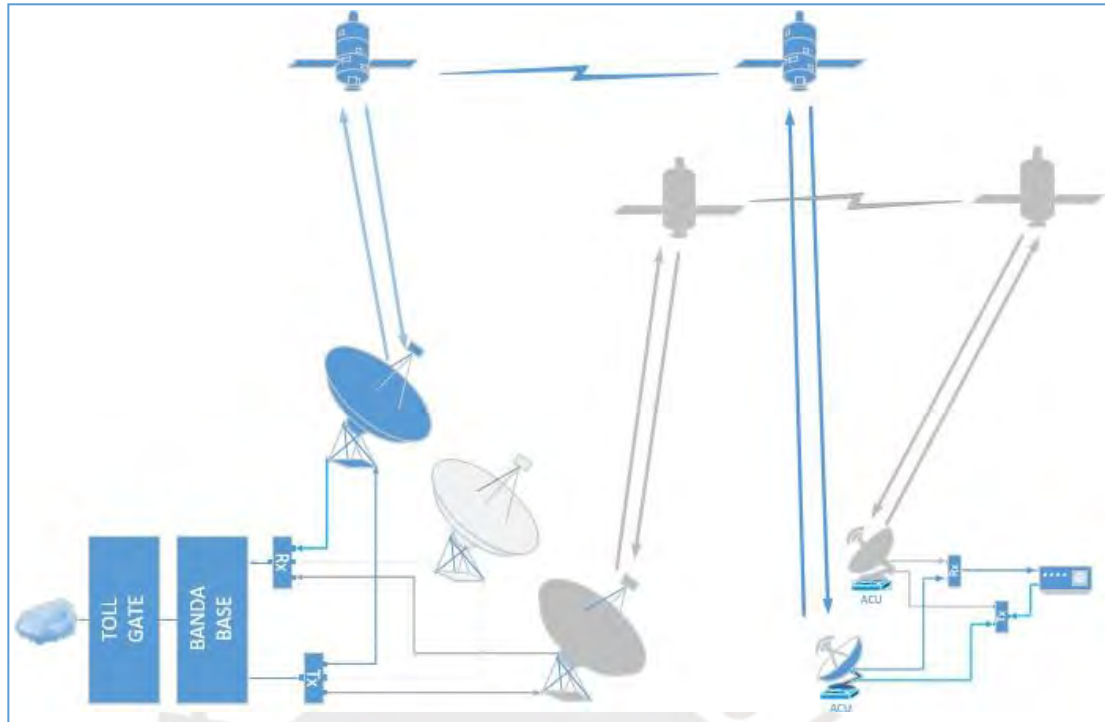


Figura 33: Topología de la red VSAT con satélites LEO [elaboración propia]

A continuación, se detalla todos los componentes que tiene la solución propuesta.

Sistema de RF

El sistema de RF así como todos los elementos del Gateway serán provistos por el proveedor de los satélites. El sistema de RF estará formado por 3 antenas formadas por un reflector principal de 3.5m de diámetro, sub reflector, feeder, duplexor y King Post, con libertad de movimiento en azimut de 360°, 1 subsistema de tracking Sub sistema de tracking formado por ACU, Beacon Receiver, SCU, 3 Motores, Limit Switch, Resolver, LNB (o LNA con Downconverter), un subsistema de Rx formado por un arreglo de LNBS (1:1 o 1:2 usualmente), switch de redundancia, controlador de LNBS y Divisores 1:8, un subsistema de Tx formado por un arreglo de amplificadores de potencia 1:2 y Combinadores 8:1 activo, una matriz de Tx/Rx en banda L para combinar/dividir la señal de las antenas y elegir la ruta de la señal, un subsistema de M&C (mandatorio) formado por un Software de gestión que se integra a los subsistema de RF mediante SNMP o mediaconverters, y habilita las funciones de monitoreo, control y configuración.

Sistema de banda base

El sistema de banda base estará formado por un modulador asociado a cada beam y en todos formando parte de un arreglo de redundancia 1:N, demoduladores en configuración redundante 1:N que demodulan las señales que llegan de los 12 spot beams, servidores de procesamiento

en balanceo de carga N+M. Una de sus funciones es mitigar los efectos del efecto Doppler, Switches, Routers de agregación, Firewall para gestión fuera de banda, Servidor NMS redundando con arreglo de discos interno o externo.

Sistema de Toll Gate

El sistema de tollgate está formando por equipos en una configuración redundante 1:1; dicho sistema contará routers de Agregación, routers de frontera, switches de Core, firewall Perimetrales y servidores DNS

Terminal remoto

El terminal remoto será brindado por el proveedor de servicio al usuario final y está formado por 1 Módem satelital que soporta DVB-S2X en outbound y SCPC dinámico en inbound, 2 antenas offset de 74m de diámetro con tracking automático (motores, ACU) y un BUC de 1W con LNBs PLL integrados en un solo bloque.

Este equipamiento considera el uso de las antenas tradicionales que actualmente existen en el mercado sin embargo hay antenas de baja ganancia con beams programables/dirigibles electrónicamente y la tendencia del mercado es contar con una única antena controlada por software que sea capaz de transmitir y recibir señal de dos satélites en simultaneo.

4.3.6 Características de la solución propuesta

La nueva red ofrece múltiples ventajas respecto a la red VSAT GEO, las cuales permitirán no solo realizar la migración de los enlaces si no también desarrollar nuevos servicios, dichas ventajas y características se describen a continuación:

Gateway

- Plataforma escalable, que permite pasar de cientos de terminales a miles de terminales, bastando la agregación de hardware modular.
- Esquemas de modulación altamente eficientes y técnicas de acceso dinámicos.
- Técnicas de compensación del efecto Doppler.
- Soporte de diferentes protocolos y servicios, que incluye TCP, UDP, SNMP, BGP, VPN, VoIP, DHCP, Backhaul Celular, SDWAN, etc.
- Hardware de alto procesamiento, mayor o igual a 350 000 pps.
- Soporte de Jumbo Frame, hasta 9 000 bytes
- Soporte de IPv4 e IPv6
- Ajuste automático de potencia

- Interfaces GigaEthernet o Giga ópticas.
- Configuración con configuración redundante 1:1 y 1:N
- Técnicas de optimización de tráfico y aceleración para reducir el BW satelital a usar y mejorar la experiencia de usuario. Esto incluye, compresión de paquetes (cabeceras y payload), byte caching, entre otros.

Terminal remoto

- Módem con la capacidad de actualizar la configuración y firewall a través del enlace.
- Terminales remotos autocomisionables, es decir, que el instalador no requiera el soporte de un operador de NOC para instalar satisfactoriamente el terminal remoto y dejar operativo el servicio.
- Soportar DVB-S2X y esquemas de modulación de alta eficiencia como 32APSK, 64APSK y 128APSK (o similares).
- Rápido proceso de sincronización y con algoritmos avanzados para compensar el efecto Doppler.
- Sistema de tracking de alta precisión que permite realizar el seguimiento del satélite sin que se degrade o pierda el servicio.
- Capacidad de procesamiento para soportar distintos protocolos y servicios como TCP, UDP, SNMP, SDWAN, VoIP, Backhaul celular, VPNs, Video, etc.
- Entorno de gestión del módem satelital amigable, basado en web.
- El módem satelital con herramientas amigables para realizar la instalación del terminal remoto.
- Ajuste automático de potencia
- IPv4 e IPv6

Satélite

- Múltiples antenas con múltiples haces reconfigurables y redirigibles.
- Procesamiento a bordo
- Compensación del efecto Doppler
- Capacidad de enviar y recibir datos entre satélites
- Uso técnicas de mitigación de interferencias con satélites GEO y MEO, esto incluye el apagado del satélite cuando está alineado con la señal de otro satélite, paso progresivo (Progressive Pitch).
- Sistema y esquema para evitar colisiones

- Protección contra efectos externos, sobre todo contra partículas con alta concentración de energía (cinturón de Van Allen).
- Compatible con múltiples tipos de hardware para Gateways y Terminales remotos.

4.4 ANÁLISIS COMPARATIVO RESPECTO AL USO DE ANCHO DE BANDA

En la siguiente tabla se muestra el ancho de banda requerido por la red VSAT GEO y LEO para soportar el tráfico de los 2000 terminales remotos VSAT y se determina el ahorro en capacidad satelital que se tendría por la migración hacia la red VSAT GEO.

Tabla 27: Comparación de uso de ancho de banda de una red GEO vs LEO [elaboración propia]

Red	Downstream (MHz)	Upstream (MHz)
Red VSAT GEO	122.42 MHz	73.76 MHz
Red VSAT LEO	96.46 MHz	20.78 MHz
Ahorro	78.94 MHz (*)	

(*) Los 78.94 MHz de ancho de banda obtenidos contribuyen con la viabilidad de migrar los servicios hacia la red propuesta.

4.5 PROCESO DE MIGRACIÓN

La migración del servicio del usuario final a la red VSAT LEO implicará que el proveedor del servicio adquiera un terminal remoto compatible con la red VSAT LEO (comprar equipos) y luego realizar la instalación del mismo en el local del usuario final. El terminal remoto deberá incluir dos antenas con un sistema de seguimiento o tracking automático (motores, ACU, y GPS).

En condiciones normales o estándar, la instalación implicará realizar los siguientes trabajos:

1. Determinar el lugar donde será instalada las antenas.
2. Determinar el lugar donde será instalado el módem satelital
3. Determinar la ruta que seguirá el cable coaxial que conectará ODU con la IDU.
4. Instalar el mástil o soporte de la antena
5. Instalar la antena con su electrónica (transceiver).
6. Configurar el módem satelital y el ACU asociado a la antena.
7. Apuntar la antena hacia el satélite, usando el ACU.
8. Realizar el tendido del cable coaxial y control de tracking
9. Instalar el módem y ACU en el ambiente asignado por el usuario final.

10. Conectar todos los equipos y realizar pruebas para validar que el acceso a internet esté operando correctamente y que el servicio opere de forma ininterrumpida.
11. Conectar la red LAN del usuario final al nuevo módem satelital y validar que el usuario final pueda acceder a Internet

Una instalación estándar implica realizar los pasos anteriores sin embargo la optimización de la red VSAT GEO conlleva superar algunos problemas y muchos de estos podrían hacer inviable la solución propuesta; en este trabajo solo analizaremos el escenario en el cual el área asignada para instalar las antenas no permite que estas operen correctamente debido a que hay obstáculos en su línea de vista de las antenas. En caso de que la línea de vista esté obstaculizada se deberá realizar adecuaciones e invertir en materiales adicionales, no contemplados para una instalación estándar.

El uso de la red VSAT LEO requiere que un espacio libre mucho mayor al de una antena para redes VSAT GEO debido a que las antenas para satélites LEO se mueven constantemente, tanto en azimut como en elevación, por lo que el área, en la dirección donde la antena transmitirá, deberá estar libre de obstáculos. En este trabajo se plantea dos soluciones, la primera es quitar/evitar el obstáculo y la segunda es mover la antena hacia una nueva ubicación. Además, se considera que en el 2% de los casos se tuvo que mover la antena hacia una ubicación alejada del módem y en un 5% de los casos, se tuvo que quitar los obstáculos. Se debe tener en cuenta que, en un escenario real, estos porcentajes pueden variar, dependiendo de muchos factores tales como el país, el tipo de cliente, la ubicación del usuario final, el tipo de local o edificio y las preferencias o limitaciones que indique el usuario final.

A continuación, se describen tres posibles retos a superar durante el proceso de migración, en el local del usuario final y se describe la solución técnica a implementar para luego incluirlo en el análisis económico.

Escenario 1: Instalar la antena en una zona sin limitaciones técnicas

Este escenario implica realizar una rápida migración del servicio debido a que la no requerirá ninguna adecuación especial.

Escenario 2: La antena está a más de 60 m del módem satelital

En una instalación estándar la distancia entre la antena y el módem satelital es como máximo 60 m. En caso de que la distancia sea mayor a esta, se requerirá un amplificador de línea para el cable de Tx y otro para el cable de Rx. El amplificador de línea tendrá las siguientes características:

- Ganancia: 10 dB
- Frecuencia de operación: 850 a 2 210 MHz
- Permitirá pasar el voltaje DC que envía el módem satelital al transceiver. Se está considerando que el transceiver tendrá un puerto de Tx y un puerto de Rx.
- Permitirá pasar la señal de referencia de 10 MHz
- Conectores tipo F

La figura 34 muestra el diagrama interno de un amplificador de línea, con los elementos que lo conforman y la ruta que sigue cada una de las señales. El amplificador de línea permite pasar la señal de 10 MHz, la energía DC y la señal de RF.

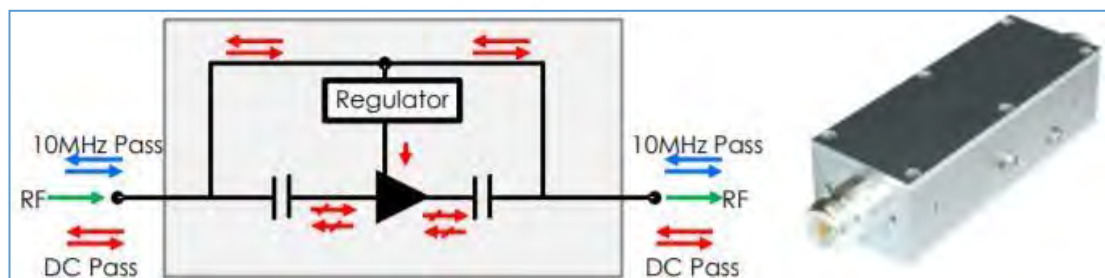


Figura 34: Diagrama de un amplificador de línea [62]

Escenario 3: Quitar/evitar los obstáculos en la línea de vista de las antenas

Para este estudio se considera que colocará un soporte o mástil de mayor longitud (separación entre la antena y el suelo ≤ 2 m) para superar los obstáculos existentes.

El soporte tendrá las siguientes características:

- Longitud: 2 m
- Diámetro aproximado: 7.6 cm
- Material: Metal con tratamiento galvanizado por método de inversión en baño caliente con espesor de 70/120 micrones para aumentar su durabilidad y evitar una rápida corrosión.
- Permitir que, una vez instalada la antena, este soporte vientos de hasta 80 km/h en operación normal y hasta 200 km/h antes de deformarse.

5. ANÁLISIS ECONÓMICO

5.1 SATÉLITES GEO - ANÁLISIS ECONÓMICO

Se realizó la estimación de costos de todos los elementos necesarios para brindar servicios con un satélite Geoestacionario, incluyendo el segmento terrestre y la capacidad satelital, esto con el objetivo de determinar el costo que tendrá que pagar cada usuario final, en base al plan de servicio deseado.

En la siguiente tabla se resumen las inversiones o gasto no recurrentes que se deben hacer para implementar un Gateway o hub y contar con 2 000 terminales remotos, la estimación de costos incluye el costo del hardware, las licencias, la importación y la instalación de todo el equipamiento. Los montos mostrados están para los primeros 5 años, la inversión adicional para seguir brindando servicios hasta el año 10 (inversión año 6 a 10) y la inversión total contabilizado desde el año 0 hasta el 10.

- Inversión año 0 a 5: \$5,749,664.68 dólares americanos
- Inversión año 6 al 10: \$1,506,973.62 dólares americanos
- Inversión total del 0 a 10 (sumatoria de los dos anteriores): \$7,256,638.31

Tabla 28: Inversión en hardware requerida para la red VSAT GEO [elaboración propia]

Sistema	Inversión año 0 al 5	Inversión año 6 al 10	Inversión año 0 al 10
Banda Base	\$1,725,011.90	\$1,031,279.60	\$2,756,291.50
Facilities	\$0.00	\$0.00	\$0.00
OSS/BSS	\$52,000.00	\$41,600.00	\$93,600.00
Personal	\$16,731.00	\$6,219.20	\$22,950.20
RF	\$473,623.53	\$180,018.82	\$653,642.35
Terminal Remoto	\$3,139,968.25	\$0.00	\$3,139,968.25
TollGate	\$342,330.00	\$247,856.00	\$590,186.00
Total**	\$5,749,664.68	\$1,506,973.62	\$7,256,638.31

(*) Para el caso de facilities que incluye el datacenter, la energía, aire acondicionado entre otros, se considera alquilar a un tercero.

(**) El análisis económico está expresados en dólares estadounidenses.

La tabla 29 muestra todos los gastos recurrentes anuales por hasta 10 años que tendrá el proveedor de servicios, de estos el mayor monto está asociado a la capacidad satelital; se considera que el costo de cada MHz es \$1,700.00 mensual por lo que, si se necesita contratar 196.18 MHz, el monto a pagar anualmente al proveedor de la capacidad satelital es \$4,002,072 y el monto a pagar sería \$19,417,611.74 si sumamos la inversión todos de todos los años hasta el año 5 (considerando que la demanda de MHz disminuye a partir del año 5).

Tabla 29: Inversión recurrente requerida para la red VSAT GEO [elaboración propia]

Sistema	Inversión año 0 al 5	Inversión año 6 al 10	Inversión año 0 al 10
Acceso a Internet	\$306,227.72	\$136,646.69	\$442,874.41
Banda Base	\$490,261.20	\$392,208.96	\$882,470.16
Facilities	\$75,900.00	\$91,080.00	\$166,980.00
OSS/BSS	\$39,000.00	\$31,200.00	\$70,200.00
Personal	\$1,661,263.75	\$1,993,516.50	\$3,654,780.26
Red de gestión	\$21,000.00	\$16,800.00	\$37,800.00
RF	\$171,649.41	\$137,319.53	\$308,968.94
Satellite	\$19,417,611.74	\$8,664,627.12	\$28,082,238.85
Terminal Remoto	\$792,000.00	\$720,000.00	\$1,512,000.00
TollGate	\$225,615.00	\$180,492.00	\$406,107.00
Total	\$23,200,528.83	\$12,363,890.79	\$35,564,419.62

Nota: La inversión del año 0 a 10 es la suma de la inversión del año 0 al 5 y la inversión del año 6 al 10.

Teniendo en cuenta la inversión de las dos tablas anteriores se realizó la estimación de costos para cada plan de servicios, los cuales son válidos para la red VSAT GEO propuestas, con todas sus particularidades asociadas y definidas en el ítem 4.1.1. La tabla 30 muestra justamente el monto que tendría que pagar el usuario final, para cada uno de los planes de servicio definidos en esta tesis. En caso el usuario final contrate un servicio con un plan de 128 Kbps/42 Kbps y un CIR del 100%, el pago mensual que tendría que hacer es US\$ 131.2

Tabla 30: Costo mensual de cada plan de servicio - red VSAT GEO [elaboración propia]

MIR Downstream	MIR Upstream	CIR (%)	Pago mensual
128.0 Kbps	42.0 Kbps	100%	\$131.3
256.0 Kbps	85.0 Kbps	70%	\$171.4
512.0 Kbps	170.0 Kbps	90%	\$390.2
1000.0 Kbps	333.0 Kbps	40%	\$343.2
1400.0 Kbps	466.0 Kbps	22%	\$271.6
2000.0 Kbps	666.0 Kbps	10%	\$187.7
2500.0 Kbps	833.0 Kbps	20%	\$421.0
3000.0 Kbps	1000.0 Kbps	12%	\$312.2

5.2 SATÉLITES LEO - ANÁLISIS ECONÓMICO

La estimación de costos de la solución propuesta considera que el proveedor de servicios contratará al proveer de capacidad satelital 395.16 Mbps (año 5) y esto incluye la capacidad satelital y la utilización del hardware del gateway.

En la siguiente tabla se muestra todas las inversiones o gastos no recurrentes que se tendría en el escenario en el cual los servicios son soportados por una red VSAT LEO a partir del año 5, es decir, que la migración de la red VSAT GEO a la red VSAT LEO se inicia en el año 4 y finaliza el último día del año 4. La inversión total no recurrente hasta el año 4 debido a la red VSAT GEO es \$5,741,764.40 y la inversión no recurrente debido a la red VSAT LEO es \$4,169,769.57 (Año 4: \$2,065,886.30+ Año 5 al 10: \$2,103,883.27)

Tabla 31: Inversión adicional no recurrente para la red VSAT LEO [elaboración propia]

Red	Sistema	Inversión (año 0 al 4)	Inversión (año 5 al 10)
GEO	Banda Base	\$1,725,011.90	\$0.00
	Facilities	\$0.00	\$0.00
	OSS/BSS	\$52,000.00	\$0.00
	Personal	\$15,171.00	\$0.00
	RF	\$473,623.53	\$0.00
	Terminal Remoto	\$3,133,627.97	\$0.00
	TollGate	\$342,330.00	\$0.00
	Subtotal GEO	\$5,741,764.40	\$0.00
LEO	Terminal Remoto	\$2,065,886.30	\$2,103,883.27
	subtotal LEO	\$2,065,886.30	\$2,103,883.27
Total		\$7,807,650.70	\$2,103,883.27

La tabla 32 muestra los gastos recurrentes que tendrá el proveedor de servicios, para esto se ha considerado que el costo de cada Mbps que transporte el proveedor del satélite será US\$50 mensuales y que el terminal remoto costará \$300. En base a las estimaciones realizadas se tiene que la inversión total asociada a la red VSAT GEO es US\$ \$21,458,616.63 (\$18,851,082.65 + \$2,607,533.98) y para la red VSAT LEO es \$2,176,000.00 (\$63,400.00 + \$2,112,600.00). Una consideración adicional es que el proceso de planificación y migración a la red VSAT LEO inicia en el mes 6 del cuarto año y finaliza en el mes 12 del mismo año, esto implica que habrá un incremento paulatino de uso de recursos en la red VSAT LEO por lo que se consideró que a partir del mes 10 ya se pagaría por la totalidad de los Mbps requeridos (395.16Mbps).

Tabla 32: Inversión adicional recurrente para la red VSAT LEO [elaboración propia]

Red	Sistema	Inversión (año 0 al 4)	Inversión (año 5 al 10)
GEO	Acceso a Internet	\$252,960.00	\$456,715.20
	Banda Base	\$392,208.96	\$0.00
	Facilities	\$60,720.00	\$10,626.00
	OSS/BSS	\$31,200.00	\$39,000.00
	Personal	\$1,329,011.00	\$2,080,192.78
	Red de gestión	\$16,800.00	\$21,000.00
	RF	\$137,319.53	\$0.00
	Satellite	\$16,008,371.16	\$0.00
	Terminal Remoto	\$442,000.00	\$0.00
	TollGate	\$180,492.00	\$0.00
	Subtotal GEO	\$18,851,082.65	\$2,607,533.98
LEO	Satellite	\$59,400.00	\$2,022,600.00
	Terminal Remoto	\$4,000.00	\$90,000.00
	Subtotal LEO	\$63,400.00	\$2,112,600.00
Total		\$18,914,482.65	\$4,720,133.98

Tomando como datos de entrada los costos mostrados en las dos tablas anteriores, se determinó el costo de cada plan de servicio en una red VSAT LEO, asumiendo que la migración de la red finaliza el último día del año 4. El resultado de dicho análisis se muestra en la siguiente tabla. Se puede observar en la tabla 33 que el plan 128Kbps/42Kbps con CIR del 100% tendrá un costo mensual para el usuario final de US\$61.6 (en la red VSAT GEO era US\$131.3).

Tabla 33: Costo mensual de cada plan de servicio - red VSAT LEO [elaboración propia]

MIR Downstream	MIR Upstream	CIR (%)	Pago mensual
128.0 Kbps	42.0 Kbps	100%	\$61.6
256.0 Kbps	85.0 Kbps	70%	\$69.7
512.0 Kbps	170.0 Kbps	90%	\$113.6
1000.0 Kbps	333.0 Kbps	40%	\$104.1
1400.0 Kbps	466.0 Kbps	22%	\$89.8
2000.0 Kbps	666.0 Kbps	10%	\$72.9
2500.0 Kbps	833.0 Kbps	20%	\$119.8
3000.0 Kbps	1000.0 Kbps	12%	\$97.9

Los costos indicados en la tabla 33, incluyen inversiones adicionales en casos de presentarse los escenarios 2 y 3 descritos en el ítem 4.5. Estos costos son mostrados en la siguiente tabla 34, 35 y 36.

Costos para el escenario 2: Se considera como repuesto 1 par de cables de 100m, un par de cables de 1m y 2 amplificadores de línea

Tabla 34: Inversión adicional - Escenario 2 [elaboración propia]

ítem	Costo unitario	Cantidad	Costo total
Par de cables RG11 de 100m con conectores tipo F	\$63.32	42	\$2,659.44
Para de cable RG11 de 1m con conectores Tipo F	\$ 5.9	22	\$129.80
Amplificador de línea de 10dB	\$ 351	22	\$7,722.00
			\$10,511.24

Costos para el escenario 3: Se considera como repuesto 2 mástiles

Tabla 35: Inversión adicional - Escenario 3 [elaboración propia]

ítem	Costo unitario	Cantidad	Costo total
Mástil de 2m	\$158.08	52	\$8,220.16

Adicionalmente, se considera que en un 2% de los casos se requerirá una segunda visita para realizar la instalación del terminal remoto y el costo de esto sería \$6240, tal como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 36: Inversión adicional por visitas infructíferas [elaboración propia]

ítem	Costo unitario	Cantidad	Costo total
Segunda visita	\$156.00	52	\$6,240.00

5.3 PROPUESTA ECONÓMICA PARA REALIZAR LA MIGRACIÓN

La migración de servicios implica realizar inversiones en hardware (terminal remoto), instalación y materiales adicionales en caso de instalaciones no estándar, dichos costos si son trasladados directamente al usuario final, podría hacer inviable la solución, desde el punto de vista del usuario final, debido a esto se propone trasladar al usuario dicha inversión en su renta mensual, por un periodo de tres años. En base a esto, el costo de mensual del servicio, por plan de servicio sería lo mostrado en la tabla 37.

Tabla 37: Costo mensual del servicio en la red GEO y LEO [elaboración propia]

MIR Downstream	MIR Upstream	CIR (%)	Costo mensual GEO	Costo mensual LEO
128.0 Kbps	42.0 Kbps	100%	\$131.3	\$61.6
256.0 Kbps	85.0 Kbps	70%	\$171.4	\$69.7
512.0 Kbps	170.0 Kbps	90%	\$390.2	\$113.6
1000.0 Kbps	333.0 Kbps	40%	\$343.2	\$104.1
1400.0 Kbps	466.0 Kbps	22%	\$271.6	\$89.8
2000.0 Kbps	666.0 Kbps	10%	\$187.7	\$72.9
2500.0 Kbps	833.0 Kbps	20%	\$421.0	\$119.8
3000.0 Kbps	1000.0 Kbps	12%	\$312.2	\$97.9

5.4 ANALISIS DE RENTABILIDAD DEL PROYECTO

Para realizar la viabilidad económica del proyecto se hizo un análisis de sensibilidad que contempla la variación de los siguientes factores:

- Costo del terminal remoto: El escenario base de análisis contempla que cada terminal remoto costará \$300 [9]
- Costo mensual de la capacidad satelital: Los reportes mostrados por diferentes entidades especializadas en el mercado satelital indican que el costo de la capacidad satelital diferirá mucho entre proveedor y proveedor, siendo más probable que el Space X tenga la oferta más competitiva. [63]
- Costo de financiamiento: Se considerará como base 20% que es un valor que se puede aplicar en la mayoría de los países donde no hay una crisis económica.

5.4.1 ANALISIS DE RENTABILIDAD – ESCENARIO BASE

Los valores de VAN y TIR que se muestran en las tablas 38 y 39 toman como datos de entrada un costo por terminal de \$300, costo de la capacidad satelital de \$50/mes/Mbps y un retorno de inversión del 20%; en base a estos datos se obtuvo valores de VAN y TIR que demuestran que sí es económicamente viable implementar la solución propuesta.

En análisis de rentabilidad realizado para la red VSAT GEO hasta el año 10 da como resultado un VAN de \$1,364,880.64 y un TIR de 28.62% en un periodo de 10 años y considerando un retorno de inversión del 20% (ver tabla 38). Debido a que la solución planteada puede replicarse en cualquier otro país, principalmente de Latinoamérica, el resultado obtenido viabiliza la implementación de esta solución en países como Perú, Ecuador o Colombia.

La tabla 38 muestra en análisis económico considerando que los servicios son soportados por satélites Geoestacionarios durante todo el periodo de análisis (10 años).

Tabla 38: Análisis de rentabilidad de la red VSAT GEO para un retorno de inversión del 20% [elaboración propia]

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	
Egresos GEO	-\$5,511,124.24	-\$4,674,146.13	-\$4,995,698.72	-\$4,790,657.42	-\$4,790,722.42	-\$4,187,844.58	-\$3,849,844.20	-\$3,253,783.86	-\$2,627,576.08	-\$2,176,609.12	-\$1,963,051.15	
Ingreso GEO	\$0.00	\$6,785,067.89	\$6,785,067.89	\$6,785,067.89	\$6,785,067.89	\$5,780,062.99	\$4,924,893.47	\$4,196,737.98	\$3,577,050.48	\$3,054,411.34	\$2,608,990.01	
Egreso LEO	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	
Ingreso LEO	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	
Flujo de caja (FCA o EFCF)	-\$5,511,124.24	\$2,110,921.75	\$1,789,369.16	\$1,994,410.46	\$1,994,345.46	\$1,592,218.41	\$1,075,049.27	\$942,954.11	\$949,474.40	\$877,802.22	\$645,938.86	
EFCF Acumulado	-\$5,511,124.24	-\$3,400,202.48	-\$1,610,833.32	\$383,577.15	\$2,377,922.61	\$3,970,141.02	\$5,045,190.29	\$5,988,144.40	\$6,937,618.80	\$7,815,421.01	\$8,461,359.87	
Factor de descuento	\$1.00	\$0.83	\$0.69	\$0.58	\$0.48	\$0.40	\$0.33	\$0.28	\$0.23	\$0.19	\$0.16	
Valor actual	-\$5,511,124.24	\$1,759,101.46	\$1,242,617.48	\$1,154,172.72	\$961,779.26	\$639,876.87	\$360,031.82	\$263,161.19	\$220,817.40	\$170,123.95	\$104,322.73	
10 Años	VAN	\$1,364,880.64										
	Periodo de recuperación	2.808 años										
	TIR	28.62%										
	Profitability index (PI)	1.25										

La solución propuesta contempla que la migración de todos enlaces finalice en el año 4 por lo que considerando las inversiones a realizar para red VSAT GEO y LEO, el análisis de rentabilidad considerando un costo de inversión del 20% da como resultado un VAN de \$1,780,774.72 y un TIR de 28.91%, tal como se muestra en la tabla 39. El resultado del análisis es que el proyecto es rentable, esto debido a que el periodo de recuperación es menor a 3 años, el PI es mayor a 1 y el exceso de rentabilidad es mayor al esperado (VAN = \$1,780,774.72).

La tabla 39 incluye la solución propuesta por lo que el servicio será soportado por el satélite GEO hasta el cuarto año y luego será migrado a la constelación de satélites LEO.

Tabla 39: análisis de rentabilidad de la solución propuesta [elaboración propia]

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Egresos GEO	-\$5,511,124.24	-\$4,674,270.66	-\$4,995,823.25	-\$4,790,781.95	-\$4,620,846.95						
Ingreso GEO	\$0.00	\$6,785,067.89	\$6,785,067.89	\$6,785,067.89	\$6,785,067.89	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Egreso LEO	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	-\$2,129,286.30	-\$626,856.35	-\$1,027,124.79	-\$1,125,254.07	-\$1,234,766.95	-\$1,363,143.62	-\$1,446,871.49
Ingreso LEO	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$2,208,059.11	\$2,542,690.93	\$2,928,899.21	\$3,371,834.96	\$3,881,829.89	\$4,467,795.35
Flujo de caja (FCA o EFCF)	-\$5,511,124.24	\$2,110,797.22	\$1,789,244.64	\$1,994,285.94	\$34,934.64	\$1,581,202.76	\$1,515,566.15	\$1,803,645.15	\$2,137,068.01	\$2,518,686.28	\$3,020,923.86
EFCF Acumulado	-\$5,511,124.24	-\$3,400,327.01	-\$1,611,082.38	\$383,203.56	\$418,138.20	\$1,999,340.96	\$3,514,907.10	\$5,318,552.25	\$7,455,620.26	\$9,974,306.54	\$12,995,230.40
Factor de descuento	\$1.00	\$0.83	\$0.69	\$0.58	\$0.48	\$0.40	\$0.33	\$0.28	\$0.23	\$0.19	\$0.16
Valor actual	-\$5,511,124.24	\$1,758,997.69	\$1,242,531.00	\$1,154,100.66	\$16,847.34	\$635,449.93	\$507,560.04	\$503,364.26	\$497,013.72	\$488,138.27	\$487,896.07

10 años	VAN	\$1,780,774.72
	Periodo de recuperación	2.808 años
	TIR	28.91%
	Profitability index (PI)	1.32

También se realizó un análisis de índice financiero ROI para la red GEO y para la red LEO, dando como resultado lo siguiente:

- ROI de la red GEO: 20%
- ROI de la red LEO: 39%

Respecto al resultado de la red LEO, la posibilidad de tener un mayor margen de ganancia para el proveedor podría ser traducido efectivamente en ganancia neta o aprovechar esta ventaja para ofertar un servicio más barato y así captar más clientes.

5.5 ANALISIS DE SENSIBILIDAD DEL PROYECTO

A continuación, se analizará cual es el impacto económico si varía el costo de los factores más críticos de esta solución, los cuales son el costo del terminal remoto y el costo de la capacidad satelital.

5.5.1 Variación del costo del terminal remoto

Para el análisis de sensibilidad se tomó 5 valores o costos de antenas y en base a esto se determinó cual sería el costo del servicio para el usuario final. Se usó como referencia el costo del plan de servicio debido a que una solución con satélites LEO es mucho más atractiva (desde el punto de vista económico) si el costo del plan de servicio es menor al que se tiene en una red VSAT GEO.

- \$300 por terminal: Este costo está basado en los objetivos trazados por el proveedor O3B. Adicionalmente, este costo es similar al de un kit en banda Ka para clientes residenciales (para una red VSAT GEO HTS).
- \$1,250.00 por terminal: Se tomó como referencia el costo objetivo del proveedor de antenas ALCAN Systems.
- \$2,015.00 por terminal: El caso que el terminal remoto cueste \$1,992.00, el costo del plan de servicio más básico costará igual que en una red VSAT GEO. En la tabla 40 se puede apreciar (marcado con un asterisco) que el plan de 128 Kbps/42 Kbps con CIR del 100% cuesta lo mismo en ambas redes.
- \$5,562.00 por terminal: Si el terminal remoto cuesta \$5,505.00, el costo del plan de mayor velocidad será igual en las redes VSAT GEO y LEO. En la tabla 40 se puede apreciar (marcado con dos asteriscos) que el plan de 3000 Kbps/3000 Kbps con CIR del 10% cuesta lo mismo en la red VSAT GEO y LEO.
- US\$16800 por terminal: Es el costo mínimo de una antena Driveaway [Fuente propia]. El plan de servicio cuenta más del doble que en una red VSAT GEO.

Tabla 40: Variación del costo del terminal remoto vs costo del plan de servicio [elaboración propia]

MIR Downstream [Kbps]	MIR Upstream [Kbps]	CIR (%)	GEO	LEO				
				\$ 300 x Terminal	\$ 1250 x Terminal	\$ 1992 x Terminal	\$ 5505 x Terminal	\$ 16800 x Terminal
128.0 Kbps	42.0 Kbps	10%	\$131.3	\$61.5	\$100.7	\$131.3 (*)	\$275.9	\$740.9
256.0 Kbps	85.0 Kbps	70%	\$171.4	\$69.5	\$108.8	\$139.3	\$283.9	\$749.0
512.0 Kbps	170.0 Kbps	90%	\$390.2	\$113.3	\$152.7	\$183.3	\$327.9	\$792.9
1000.0 Kbps	333.0 Kbps	40%	\$343.2	\$103.9	\$143.3	\$173.8	\$318.4	\$783.5
1400.0 Kbps	466.0 Kbps	20%	\$271.6	\$89.6	\$128.9	\$159.4	\$304.1	\$769.1
2000.0 Kbps	666.0 Kbps	10%	\$187.7	\$72.8	\$112.0	\$142.6	\$287.2	\$752.2
2500.0 Kbps	833.0 Kbps	20%	\$421.0	\$119.4	\$158.9	\$189.4	\$334.1	\$799.1
3000.0 Kbps	1000.0 Kbps	10%	\$312.2	\$97.6	\$137.0	\$167.6	\$312.2 (*)	\$777.2

Respecto a la variación del VAN, el valor resultante para todos los escenarios siempre es superior al VAN de la red VSAT GEO. En la tabla 41 se puede apreciar que el VAN se incrementa sustancialmente si el costo del terminal es \$16,800.00 lo cual es bueno para el proveedor de servicio sin embargo el costo para el usuario final se incrementa haciendo inviable implementar esta solución (ver tabla 40).

Tabla 41: Variación del VAN [elaboración propia]

	GEO	LEO
VAN	\$1,459,345.24	\$13,338,927.90

5.5.2 Variación del costo de la capacidad satelital

El análisis realizado por la empresa NSR en mayo del 2019 indica que el costo Mbps/mes variaría aproximadamente entre \$75/Mbps/mes y \$500/Mbps/mes [63] para el 2021, pudiendo bajar hasta menos de \$50/Mbps/mes en el 2028. En análisis de sensibilidad realizado tomará como datos iniciales de entrada el precio de \$50/Mbps/mes

Los resultados que se muestran en las tablas 42 y 43 indican que la solución propuesta sigue siendo viable a pesar de que el costo de la capacidad satelital se incrementa hasta los \$601.5/Mbps/mes; se llega a esta conclusión comparando el precio de cada plan de servicio y los valores de VAN y TIR obtenidos para la red VAS GEO y LEO.

Tabla 42: Variación del costo del servicio respecto al costo de la capacidad satelital
[elaboración propia]

MIR Downstream [Kbps]	MIR Upstream [Kbps]	CIR (%)	GEO	LEO		
				\$ 50/Mbps/Mes	\$ 556/Mbps/Mes	\$ 601.5/Mbps/Mes
128.0 Kbps	42.0 Kbps	100%	\$131.3	\$61.6	\$131.3	\$137.5
256.0 Kbps	85.0 Kbps	70%	\$171.4	\$69.7	\$167.4	\$176.2
512.0 Kbps	170.0 Kbps	90%	\$390.2	\$113.6	\$365.0	\$387.6
1000.0 Kbps	333.0 Kbps	40%	\$343.2	\$104.1	\$322.5	\$342.2
1400.0 Kbps	466.0 Kbps	22%	\$271.6	\$89.8	\$257.9	\$273.0
2000.0 Kbps	666.0 Kbps	10%	\$187.7	\$72.9	\$182.1	\$191.9
2500.0 Kbps	833.0 Kbps	20%	\$421.0	\$119.8	\$392.8	\$417.3
3000.0 Kbps	1000.0 Kbps	12%	\$312.2	\$97.9	\$294.5	\$312.2

Tabla 43: Variación del VAN y TIR para diferentes costos de la capacidad satelital
[elaboración propia]

	GEO	LEO		
		\$ 50/Mbps/Mes	\$ 556/Mbps/Mes	\$ 601.5/Mbps/Mes
VAN	\$961,779.3	\$1,780,774.7	\$5,560,041.3	\$5,899,876.6
Periodo de recuperación	2.81	2.81	2.81	2.81
TIR	29%	29%	39%	40%
Profitability index (PI)	1.25	1.32	2.01	2.07

5.6 Resumen del análisis de rentabilidad

En la tabla 44 se realiza un resumen de los resultados obtenidos en el análisis de rentabilidad de la red VSAT GEO y del análisis de rentabilidad para el escenario de optimización de la red VSAT GEO (migración hacia una red VSAT LEO en el año 4). Desde el punto de vista de la inversión a realizar, hay una diferencia sustancial a favor de la red VSAT LEO (\$11,929,802.99).

Tabla 44: Resumen del análisis de rentabilidad Red VSAT GEO vs Red VSAT LEO
[elaboración propia]

	GEO	LEO
Inversión total	\$35,564,419.62	\$23,634,616.63
VAN	\$1,364,880.64	\$1,780,774.72
Periodo de recuperación	2.808 años (~34 meses)	2.808 años (~34 meses)
TIR	28.62%	28.91%
Profitability index (PI)	\$1.25	\$1.32

6. RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación, se resumen los resultados obtenidos durante el desarrollo de este estudio, haciendo hincapié en los factores más representativos de la solución propuesta.

- **Análisis de oferta**

- GEO: Existe una gran cantidad de proveedores de capacidad satelital con satélites geoestacionarios, en diferentes bandas (C, Ku, Ka, X), siendo los más grandes SES, Hispasat, Eutelsat, Intelsat y Telesat.
- LEO: La constelación de satélites LEO para comunicaciones de datos de forma masiva está en proceso de diseño y despliegue, siendo los principales actores SpaceX (+17 000 satélites), Oneweb (648 satélites), Telesat (117 satélites), LeoSat (108 satélite) y Amazon (3 236).

- **Análisis de demanda**

Las redes móviles tienen el mayor nivel de penetración, pero a nivel mundial aún no cubre al total de la población (67% de penetración), siendo la zona rural el área con menor penetración y un área cada vez con mayor necesidad de acceso a servicios de conectividad que podrían ser cubiertos por una red VSAT LEO de bajo costo.

- **Diferencias entre red GEO y LEO**

- Banda de frecuencia: Los satélites GEO operan en distintas bandas, incluso en el mismo satélite. Los satélites LEO también pueden operar en varias bandas, pero los desarrollos que se están realizando son principalmente en banda Ka.
- Cobertura: Los satélites GEO tienen beams de cobertura amplia (widebeam) y sport beam mientras que los satélites LEO solo usan spot beams, cuya área de cobertura es de pocos cientos de kilómetros (hasta 3 000 km).

- Periodo de rotación: Los satélites LEO tienen un periodo de rotación de 90m y 110m mientras que un satélite GEO tiene el mismo periodo de rotación igual al de la tierra.
- Pérdidas en el enlace: La pérdida de la señal en espacio libre en una red VSAT GEO es 206.47 dB y en una red VSAT LEO es 183.57 dB.
- Tiempo de propagación: El máximo tiempo de propagación de la señal en una red VSAT GEO es 557.17 ms y en una red VSAT LEO es 54.6 ms
- Resultado del dimensionamiento
 - MODCOD: El máximo MODCOD de la red VSAT GEO es 16APSK5/6 y de la red VSAT LEO es 256APSK32/45
 - Eficiencia: La eficiencia promedio obtenida para la red VSAT GEO analizada es 2.78 bps/Hz mientras que la red VSAT LEO propuesta tiene una eficiencia promedio de 4.26bps/Hz.
 - BW: El ancho de banda que usa la red VSAT LEO es 78.94MHz menor que el ancho de banda que usaría la red VSAT GEO.
- Análisis económico

El costo mensual del servicio en una red VSAT GEO va desde \$131.2 a \$312.2 mientras que en la red VSAT LEO el costo mensual del servicio va de \$61.6 a \$97.9, este costo es por plan de servicio.
- Análisis de rentabilidad del proyecto.
 - VAN red VSAT GEO: \$1,364,880.64
 - VAN red VSAT LEO: \$1,780,774.72
- Análisis de sensibilidad del proyecto
 - La solución propuesta permite que el costo del terminal se incremente hasta \$1,992.00
 - El costo de la capacidad satelital permite un incremento hasta US\$556/Mbps/mes

CONCLUSIONES

1. Las nuevas constelaciones de satélites LEO que están en proceso de despliegue permitirán reducir la brecha digital a nivel mundial, gracias a que el usuario final pagará menos por el servicio. Además, el menor retardo, más capacidad y menores pérdidas de la señal permitirá el despliegue de forma masiva de IoT, M2M y 5G.
2. La señal en una red VSAT LEO sufre menos pérdidas en su recorrido entre el satélite y la superficie terrestre, a nivel de pérdida en espacio libre la señal perderá potencia 22.9 dB menos en una red VSAT LEO que en una red VSAT GEO. Además, la lluvia y las condiciones atmosféricas afectan menos a la señal en una red VSAT LEO, teniendo 7.79dB de atenuación total en la red VSAT GEO analizada y 3.96 dB en la red VSAT LEO propuesta. Esto considerando que la red VSAT GEO opera en banda Ku y la red VSAT LEO propuesta opera en banda Ka.
3. Los cálculos de enlace realizado muestran que la eficiencia de una red VSAT LEO es mucho mayor, pudiendo alcanzar MODCOD de hasta 256APSK 32/45, esto implica que la cantidad de bits por segundo por hertz puede llegar hasta 5.16, mientras que en una red VSAT GEO solo alcanza 2.78 bps/Hz.
4. Del dimensionamiento de la red realizado se concluye que una red VSAT LEO requiere menos ancho de banda para pasar el mismo volumen de tráfico. Este menor uso de ancho de banda es debido a la que la señal sufre menos pérdidas en su recorrido entre la superficie terrestre (antena) y el satélite, lo cual a su vez permite usar MODCODs más eficientes.

5. El costo del servicio es menor en una red VSAT LEO, esto como resultado, principalmente, de un menor costo del terminal remoto, menor uso de ancho de banda, uso de satélites HTS y un menor costo de la fabricación y puesta en operación del satélite.
6. La solución propuesta permite disminuir el costo del servicio para el usuario final y además es más rentable para el proveedor de servicio. En análisis de rentabilidad realizado para un costo de financiación del 20% nos da una rentabilidad mayor a la esperada (VAN = \$1,780,774.72), un TIR de 28.991% y un retorno de inversión menor a los 4 años (34 meses aprox.). Adicionalmente, PI del proyecto (la relación entre los ingresos y egresos) es mayor a 1, es decir que se tiene más ingresos que egresos.
7. El proyecto permite variaciones tal como muestra el análisis de sensibilidad realizado a los parámetros de costo del terminal remoto, costo de la capacidad satelital y costo de financiamiento.
8. El costo inferior del servicio VSAT LEO conlleva a una mayor probabilidad de fidelización de los clientes. Además, las ventajas técnicas que puede ofrecer la red VSAT LEO permitirá dar un servicio de mayor calidad y variedad, lo cual permitirá ser más competitivos en el mercado y aumentar la cantidad de enlaces.
9. El costo del servicio VSAT LEO por plan de servicio puede bajar aún más si la migración se realiza a finales del año 5 en los años posteriores.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Información comercial de Eutelsat - Satélite VHTS

<https://www.eutelsat.com/sites/eutelsat-internet/home/satellites/future-launches.html#kconnect-vhts>

<https://spacenews.com/viasat-starts-viasat-4-development-mulls-hybrid-geo-leo-terrestrial-connections/>

Último acceso: 11/01/2020

[2] Inigo del Portillo (portillo@mit.edu), Bruce G. Cameron, Edward F. Crawley, “A Technical Comparison of Three Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband”, Massachusetts Institute of Technology, página 10, October 1st 2018

[3] Reporte de la penetración de las redes digitales de la web Datareportal.com

<https://datareportal.com/reports/digital-2019-global-digital-overview>

Último acceso: 11/01/2020

[4] Costo del nuevo terminal remoto para satélites LEO publicado por la página SpaceNews

<https://spacenews.com/wyler-claims-breakthrough-in-low-cost-antenna-for-oneweb-other-satellite-systems/>

Último acceso: 11/01/2020

[5] Cantidad de satélites LEO a ser puestos en operación y cantidad de satélites puestos en órbita.

<http://www.mit.edu/~portillo/files/Comparison-LEO-IAC-2018-slides.pdf>

<https://spacenews.com/spacex-submits-paperwork-for-30000-more-starlink-satellites/>

<https://www.pbs.org/newshour/show/spacex-plans-launch-of-12000-satellites-into-earths-orbit>

<https://www.itu.int/en/ITU-R/space/workshops/2019-SatSymp/Presentations/211%20-%20Satellite%20Innovation%20and%20WRC-23-TELESAT%20SPANISH.pdf>

<https://rpp.pe/ciencia/espacio/spacex-lanzo-60-satelites-starlink-y-asi-se-ven-desde-la-tierra-elon-musk-noticia-1229704>

<https://www.efe.com/efe/america/tecnologia/spacex-lanza-otros-60-satelites-al-espacio-para-su-propia-red-de-internet/20000036-4108718>

<https://larepublica.pe/mundo/2019/11/14/starlink-proyecto-space-x-lanzamiento-de-60-satelites-hacia-el-espacio-que-se-ven-como-tren-de-luces-en-el-cielo-fotos-video/>

Último acceso: 11/01/2020

[6] Constelación de satélites LEO de OneWeb

<https://spacenews.com/oneweb-satellites-inaugurates-florida-factory/>

https://www.researchgate.net/publication/308795972_Leveraging_Commercial_Broadband_LEO_Constellations_for_Navigation/figures?lo=1

https://space.skyrocket.de/doc_sdat/oneweb.htm

<https://www.bbc.com/mundo/noticias-47396020>

Último acceso: 11/01/2020

Peter Stubbe, “State Accountability for Space Debris: A Legal Study of Responsibility for Damage Caused by Space Debris”, 2017

[7] Quintus Bezuidenhout. Satellite Communications Strategy selection for optimal LEO satellite communication, Sudáfrica, departamento de ingeniería eléctrica y electrónica de la universidad de Stellenbosch, 2012

[8] Antonio Barragán Barragán, Estudio de los sistemas de backhaul de small cells lte por satélite. proyecto de fin de carrera, Ingeniería técnica de telecomunicaciones, Universidad Carlos III de Madrid, España, 2015

[9] Interagency Operations Advisory Group, Low-Earth Orbit (LEO) 26 GHz K-band Study Group Final Report, IOAG, 2016

[10] Trúchly Peter, Búran Peter, Analysis and Comparison of LEO and MEO Satellite Networks, Department of telecommunications, Faculty of Electrical Engineering and Information Technolog, Slovak University of Technology, Bratislava, Slovakia, 2007

[11] Inigo del Portillo, Bruce G. Cameron, y Edward F. Crawley, A Technical Comparison of Three Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband, 69th International Astronautical Congress, Germany, 2018

[12] Yongtao Su, Yaoqi Liu, Yiqing Zhou, Jinhong Yuan, Huan Cao, and Jinglin Shi, Broadband LEO Satellite Communications: Architectures and Key Technologies, IEEE Wireless Communications, 2019

[13] Tanjila Farah, Performance Analysis of Low Earth Orbit (LEO) Satellite Link in the presence of Elevation Angle, Fading, And Shadowing, Department of Computer Science and Engineering, BRAC University, Bangladesh, 2009

[14] Ubicación de los satélites GPS
<https://www.gps.gov/systems/gps/space/>
Último acceso: 11/01/2020

[15] Periodo de rotación de un satélite GPS
<http://www.relatividad.org/bhole/gps.htm>
<http://www.astronoo.com/es/articulos/gps.html>
Último acceso: 11/01/2020

[16] Figura 1
<https://www.freepng.es/png-i4cy4c/>
Último acceso: 05/01/2020

[17] Evoluación de los satélites artificiales
<http://myscienceschool.org/index.php?/archives/3463-Satellites-and-Space-Travel.html>
http://www.russianspaceweb.com/proton_inmarsat5f1.html
<https://space.stackexchange.com/questions/14198/how-will-ses-9-reach-geostationary-orbit-from-inclined-transfer-orbit-from-f9-2>
<http://www.cgwic.com/LaunchServices/Download/manual/Chapter%204%20Payload%20Fairing.pdf>
<https://www.sciencelearn.org.nz/resources/1905-history-of-satellites-timeline>
<https://www.jpl.nasa.gov/infographics/infographic.view.php?id=11182>
https://en.wikipedia.org/wiki/High-throughput_satellite
https://www.adlittle.com/sites/default/files/viewpoints/ADL_High_Throughput_Satellites-Viewpoint.pdf
Último acceso: 05/01/2020

[18] Satélites meteorológicos

<https://www.physics-and-radio-electronics.com/satellite-communication/typesofsatellitesbasedonpurposeandsize.html>
<https://melbournespace.com.au/8-types-of-satellites-that-make-your-modern-world-work/>
<https://www.n2yo.com/satellites/?c=3>
http://www.softschools.com/facts/weather_instruments/weather_satellites_facts/3125/
<http://cimss.ssec.wisc.edu/SCALE/grade5/satellites.html>
Último acceso: 05/01/2020

[19] Satélites Tether

R. Hoyt, “TETHER SYSTEMS FOR SATELLITE DEPLOYMENT AND DISPOSAL”,
Tethers Unlimited, Inc., Seattle, WA, octubre 2000
<https://www.worldatlas.com/articles/how-many-types-of-satellites-are-there.html>
Último acceso: 05/01/2020

[20] Estación espacial

https://www.esa.int/Our_Activities/Human_and_Robotic_Exploration/International_Space_Station/Where_is_the_International_Space_Station
https://en.wikipedia.org/wiki/International_Space_Station
https://en.wikipedia.org/wiki/Space_station
Último acceso: 05/01/2020

[21] Capacidad de transferencia de datos de la estación espacial

<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2019/data-rate-increase-on-the-international-space-station-supports-future-exploration>
Último acceso: 05/01/2020

[22] Satélites de uso Militar

<https://www.encyclopedia.com/science-and-technology/astronomy-and-space-exploration/space-exploration/military-communications>
<https://www.worldatlas.com/articles/how-many-types-of-satellites-are-there.html>
Último acceso: 05/01/2020

[23] Satélites GPS

<https://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/>
<https://www.gps.gov/technical/ps/#spgps>
Último acceso: 05/01/2020

[24] Telescopio Hubble

<https://astrojem.com/instrumental/telescopiohubble.html>

Último acceso: 05/01/2020

[25] Figura 2:

<https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr201307ra2.html>

Último acceso: 05/01/2020

[26] Tipos de orbita de los satélites artificiales

https://cdn.everythingrf.com/live/medium-earth-orbit-erf-com_636795040327226913.png

Último acceso: 05/01/2020

[27] Distancia entre la superficie terrestre y un satélite Geoestacionario.

<http://misistemasolar.com/satelites-geoestacionarios/>

<https://www.aboutespanol.com/orbitas-alrededor-de-la-tierra-3294574>

Último acceso: 11/01/2020

[28] Periodo de rotación de un satélite Geoestacionario

<http://curioseantes.blogspot.com/2015/10/leo-meo-geo-heo-y-sso.html>

<https://www.aboutespanol.com/orbitas-alrededor-de-la-tierra-3294574>

Último acceso: 11/01/2020

[29] Figura 4:

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/162/A4.pdf?sequence=4>

Último acceso: 11/01/2020

[30] Figura 5

<https://www.freepng.es/png-8xgvmd/>

Último acceso: 05/01/2020

[31] Ubicación de los satélite MEO

<http://curioseantes.blogspot.com/2015/10/leo-meo-geo-heo-y-sso.html>

https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/EMC/trabajos_02_03/RADIOASTRONOMIA/web/Indice/S_art/I_s_art/3_3/Clas.htm

Último acceso: 11/01/2020

[32] Periodo orbital de los satélite O3B

O3B, “O3b – A different approach to Ka-band satellite system design and spectrum sharing”, septiembre 2015.

[33] Figura 6

https://spacenews.com/wp-content/uploads/2016/11/Telesat_Leo_3.jpg

Último acceso: 11/01/2020

[34] Órbita cementerio

<https://www.aboutespanol.com/orbitas-alrededor-de-la-tierra-3294574>

<https://www.nesdis.noaa.gov/content/graveyard-orbits-and-satellite-afterlife>

Último acceso: 11/01/2020

[35] Tipos de satélites por su capacidad y tamaño

<https://www.nanosats.eu/cubesat>

http://www.daviddarling.info/encyclopedia/S/satellite_mass_categories.html

[http://www.psatellite.com/products/sct/cubesat-](http://www.psatellite.com/products/sct/cubesat-toolbox/?gclid=CjwKCAjwtajrBRBVEiwA8w2Q8K1YwpqZgQcfsu1pE-NJE_7ESiSe6FIQjoLL07V5msC0A-QC9J7CURoCRIYQAvD_BwE)

[toolbox/?gclid=CjwKCAjwtajrBRBVEiwA8w2Q8K1YwpqZgQcfsu1pE-](http://www.psatellite.com/products/sct/cubesat-toolbox/?gclid=CjwKCAjwtajrBRBVEiwA8w2Q8K1YwpqZgQcfsu1pE-NJE_7ESiSe6FIQjoLL07V5msC0A-QC9J7CURoCRIYQAvD_BwE)

[NJE_7ESiSe6FIQjoLL07V5msC0A-QC9J7CURoCRIYQAvD_BwE](http://www.psatellite.com/products/sct/cubesat-toolbox/?gclid=CjwKCAjwtajrBRBVEiwA8w2Q8K1YwpqZgQcfsu1pE-NJE_7ESiSe6FIQjoLL07V5msC0A-QC9J7CURoCRIYQAvD_BwE)

<https://alen.space/es/guia-basica-nanosatelites/>

Último acceso: 11/01/2020

[36] Parrilla de planes de Hughesnet

<https://www.hughesnet.com.pe/buscar-planes>

Última visita: 06/22/2020

[37] Figura 8

<http://telco.co.zw/telco2017/wp-content/uploads/2017/07/VSAT-setup4.jpg>

Último acceso: 11/01/2020

[38] Figura 10

Altavista, “Arsat 2 Frequency Plan”

[39] Figura 11

https://www.groundcontrol.com/images/BGAN_Coverage_Map_Inmarsat_03.jpg

Último acceso: 11/01/2020

[40] Figura 12

<http://blog.couple.ovh/figures/kasat.png>

Último acceso: 11/01/2020

[41] Figura 13

<https://satixfy.files.wordpress.com/2017/06/vsat-terminal-elements-e1496754963604.png?w=736>

Último acceso: 11/01/2020

[42] Figura 14

Dpto. de Electr Dpto. de Electrónica 2ºGM –E. , “ImagenTema 8 Orientación de Parábolas”,
página 16

[43] Figura 22, 23, 24

<https://www.youtube.com/watch?v=q63rZaFX-4k>

Último acceso: 11/01/2020

[44] Características de la constelación de satélites SKYBRIDGE

<https://www.itu.int/newsarchive/press/WRC97/SkyBridge.html>

Último acceso: 11/01/2020

JYRKI T. J. PENTTINEN , “The Telecommunications handbook Engineering Guilines for
Fixed. Mobiles and Satellites System”, Jyrkit T.J. Penttinen

[45] Características de la constelación de satélites Teledesic

<https://transition.fcc.gov/Bureaus/International/Orders/1997/da970527.txt>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Teledesic>

<http://personal.ee.surrey.ac.uk/Personal/L.Wood/constellations/fcc-teledesic.pdf>

<https://pdfs.semanticscholar.org/f183/25a776cf818d1e8ad314137d1573d03fd805.pdf>

<http://www.mobilecomms-technology.com/projects/teledesic/>

https://web.archive.org/web/20160306014740/http://www.isoc.org/inet96/proceedings/g1/g1_3.htm

<https://ieeexplore.ieee.org/document/682221>

Último acceso: 15/12/2019

[46] Características de la constelación de satélites Iridium

<https://www.iridiumnext.com/>

<https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/press-release/iridium-next-constellation-66-operational-satellites-will-make>

https://www.groundcontrol.com/Iridium_Coverage_Map.htm

<http://www.iridium.it/en/iridium.htm>

<http://investor.iridium.com/2019-01-11-Iridium-Completes-Historic-Satellite-Launch-Campaign>

http://www.argo.ucsd.edu/sat_comm_AST13.pdf

Último acceso: 11/01/2020

[47] Características de la constelación de satélites OneWeb

<https://www.itu.int/en/ITU-R/space/workshops/SISS-2016/Documents/OneWeb%20.pdf>

https://en.wikipedia.org/wiki/OneWeb_satellite_constellation

<https://www.oneweb.world/media-center/onewebs-progressive-pitch-solution>

<https://www.itu.int/en/ITU-R/space/workshops/2017-Bariloche/Presentations/16%20-%20Mariah%20Shuman%20Oneweb.pdf>

<https://www.satcom.guru/2016/04/oneweb-first-look-at-their-filing.html>

<https://www.airbus.com/space/telecommunications-satellites/oneweb-satellites-connection-for-people-all-over-the-globe.html>

<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/o/oneweb>

<http://www.mit.edu/~portillo/files/Comparison-LEO-IAC-2018-slides.pdf>

<https://www.oneweb.world/assets/news/media/OneWeb-Introduction-May2019.pdf>

https://www.researchgate.net/publication/308795972_Leveraging_Commercial_Broadband_LEO_Constellations_for_Navigation/figures?lo=1

<https://pdfs.semanticscholar.org/5f59/1a49f0d6050e48a4f356fe9dc70eefb33301.pdf>

Último acceso: 11/01/2020

[48] Características de la constelación de satélites SpaceX - StarLink

[https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink_\(satellite_constellation\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink_(satellite_constellation))

<https://spacenews.com/spacex-launches-60-starlink-satellites-begins-constellation-buildout/>

<https://www.youtube.com/watch?v=IpcAINwuooQ>

Último acceso: 25/11/2020

[49] Características de la constelación de satélites SpaceX - Telesat

<http://www.mit.edu/~portillo/files/Comparison-LEO-IAC-2018-slides.pdf>

https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/oth/0a/0E/R0A0E0000B90001PDFE.pdf

Último acceso: 11/01/2020

[50] Características de la constelación de satélites Amazon

<https://spacenews.com/amazon-lays-out-constellation-service-goals-deployment-and-deorbit-plans-to-fcc/>

<https://www.satellitetoday.com/business/2019/08/19/amazons-kuiper-systems-joins-sia/>

Último acceso: 11/01/2020

[51] Características de la constelación de satélites LEOSAT

<http://leosat.com/>

<http://leosat.com/media/1114/leosat-technical-overview.pdf>

<https://www.fcc.gov/>

<https://www.marketwatch.com/>

<https://www.globenewswire.com/Index>

<https://www.globalsat.com/index.php/en/>

<https://youtu.be/9BBHA5onOpM>

Último acceso: 11/01/2020

[52] Estatus del mercado satelital

<https://www.spaceintelreport.com/hughes-reports-2-increase-in-satellite-consumer-broadband-subscribers-thanks-to-central-south-america/>

Último acceso: 11/01/2020

[53] Figura 24

<https://www.nsr.com/research/3855-2/>

<https://www.nsr.com/research/vsat-broadband-satellite-markets-18th-edition/>

Último acceso: 11/01/2020

[54] Reportes sobre la evolución de la conectividad a nivel mundial, figura 25, figura 26 y figura 27

<http://www.satellitemarkets.com/pdf/pdf2019/VSAT-marketbrief-2019.pdf>

http://proceedings.kaconf.org/papers/2017/clq/3_1.pdf

<https://datareportal.com/reports/digital-2019-global-digital-overview>

Último acceso: 11/01/2020

[55] Cobertura de los satélites GEO y LEO

https://thesai.org/Downloads/Volume5No6/Paper_2-

[The_Coverage_Analysis_for_Low_Earth_Orbiting_Satellites_at_Low_Elevation.pdf](https://thesai.org/Downloads/Volume5No6/Paper_2-The_Coverage_Analysis_for_Low_Earth_Orbiting_Satellites_at_Low_Elevation.pdf)

https://www.researchgate.net/publication/304535211_The_Coverage_Belt_for_Low_Earth_Orbiting_Satellites

<https://ral.ucar.edu/~djohnson/satellite/coverage.html>

<https://faculty.nps.edu/awashburn/Files/Notes/EARTHCOV.pdf>

<https://arxiv.org/pdf/1807.02021.pdf>

http://eas.uccs.edu/~aketsdev/MAE%205595_files/Lesson%202.pdf

<https://www.satellite-calculations.com/Satellite/footprintplotter.php>

Último acceso: 11/01/2020

[56] Periodo de rotación

http://www.polaris.iastate.edu/NorthStar/Unit3/unit3_sub1.htm

<https://keisan.casio.com/exec/system/1224665242>

<https://www.satellite-calculations.com/>

Último acceso: 11/01/2020

[57] Sistema de tracking

https://www.dlr.de/kn/en/desktopdefault.aspx/tabid-2203/3256_read-9662/

<https://gdmissionsystems.com/products/satcom-technologies/antennas/medium-fixed-antennas/9-2-meter-ka-band-medium-fixed-antenna>

https://www.viasat.com/sites/default/files/media/5_meter_fixed_antenna_010_web.pdf

Último acceso: 11/01/2020

[58] Ganancia de una antena

http://www.highgain.co.kr/admin/Uploaded_Files/HGA-11FL.pdf

[https://gdmissionsystems.com/-/media/General-Dynamics/Satcom/PDF/Antennas/Medium-Fixed-Antennas/4-8-Meter-Compact-Cassegrain-Antenna-](https://gdmissionsystems.com/-/media/General-Dynamics/Satcom/PDF/Antennas/Medium-Fixed-Antennas/4-8-Meter-Compact-Cassegrain-Antenna-Datasheet.ashx?la=en&hash=B630D5574DF91DD52F6379564B2545DF4E520254)

[Datasheet.ashx?la=en&hash=B630D5574DF91DD52F6379564B2545DF4E520254](https://gdmissionsystems.com/-/media/General-Dynamics/Satcom/PDF/Antennas/Medium-Fixed-Antennas/4-8-Meter-Compact-Cassegrain-Antenna-Datasheet.ashx?la=en&hash=B630D5574DF91DD52F6379564B2545DF4E520254)

[59] Pérdidas en el enlace

<http://www.gr.ssr.upm.es/docencia/grado/csat/material/CSA08-4-BalanceEnlace1.pdf>

<https://core.ac.uk/download/pdf/60529128.pdf>

Último acceso: 11/01/2020

[60] Cálculo del delay

Rohit Goyal, Sastri Kota, Raj Jain, Sonia Fahmy, Bobby Vandalore, Jerry Kallaus, “Analysis and Simulation of Delay and Buffer Requirements of SatelliteATM Networks for TCP/IP Traffic”, página 7

[61] Vida útil de los satélites LEO

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/low-earth-orbit>

Última visita: 06/22/2020

[62] Figura 34: Diagrama de un amplificador de línea

https://www.etlsystems.com/sites/default/files/products/downloads/A-GABL1-3207-3209%20%26amp%3B%203139%20v2.1_3.pdf

Última visita: 05/01/2020

[63] Reporte de la empresa NSR sobre el costo de la capacidad satelital LEO

<https://www.nsr.com/a-leo-race-to-the-bottom/>

Última visita: 23/05/2020



ANEXOS

Anexo 1: Cálculo de enlace GEO

Calculo de enlace Outbound (sin lluvia)

Link Budget Produced using Satmaster Pro Monday 11 January 2021	INTERNET PERU OUTBOUND SITE 1		
Service Name Coverage Uplink earth station Downlink earth station Satellite name	E117WA		
Modcod	DVBS2,normal frame,16-APSK (5/6),no pilots		
Link Input Parameters	Up	Down	Units
Site latitude	12.2876S	12.6952S	degrees
Site longitude	76.847W	69.233W	degrees
Site altitude	0.51	0.297	km
Frequency	14.24	11.94	GHz
Polarization	Horizontal	Vertical	
Rain model	Clear sky	Clear sky	
Rain zone or R0.01% (mm/h)	0	0	
Availability (average year)	N/A	N/A	%
Antenna aperture	9.1	1.2	metres
Antenna efficiency or gain (+ or - prefix)	57.98	65	% or dBi
Coupling loss	1	0.45	dB
Antenna mispoint loss	0.5	0.39	dB
Other path losses (site diversity gain -ve)	1.2	0	dB
LNB noise figure or temp (+ prefix)		0.8	dB or K
Antenna noise		35	K
C/ACI	27		dB
C/ASI	30		dB
C/XPI	30		dB
HPA C/IM	25		dB
C/ACI		25	dB
C/ASI		30	dB

C/XPI		27		dB
Uplink station HPA output back-off	4.75			dB
Uplink power control available	0			dB
Number of carriers / HPA	3			
Required HPA power	MIN			W
Satellite Input Parameters	Value			Units
Satellite longitude	116.8W			degrees
Transponder type	LTWTA			
G/T Reference	8.7			dB/K
SFD Reference	-92.6			dBW/m2
Receive G/T	8.7			dB/K
Flux control attenuator (FCA)	2			dB
Effective SFD	-90.6			dBW/m2
Satellite ALC	0			dB
EIRP (saturation)	53.6			dBW
EIRP (beam peak)	50.3			dBW
Transponder bandwidth	36			MHz
Input back off total	4.9			dB
Output back off total	3.3			dB
C/IM	30			dB
Carriers per transponder	AUTO			
Carrier/Link Input Parameters	Value			Units
Modulation	16-PSK			
Required Es/No	11.61			dB
Symbol rate	34.28			Mbaud
Information rate overhead	10			%
FEC code rate	0.825			
Spreading gain (1 + Roll off factor)	0 1.05			dB
Carrier spacing factor	1.05			
Bandwidth allocation step size	0.001			MHz
Implementation loss	0.5			dB
System margin	1			dB
Calculations at Saturation	Value			Units
Gain 1m ²	44.53			dB/m2
Uplink C/No	102.17			dB-Hz
Downlink C/No	96.36			dB-Hz
Total C/No	95.35			dB-Hz
Uplink EIRP for saturation	73.73			dBW
General Calculations	Up	Down		Units
Elevation	42.07	33.97		degrees
True azimuth	284.25	281.36		degrees
Compass bearing	286.8	290.04		degrees
Path distance to satellite	37625.34	38268.69		km

XPD during rain	0	0		dB
Propagation time delay	0.125504	0.12765		seconds
Antenna efficiency	57.98	65		%
Antenna gain	60.29	41.66		dBi
Availability (average year)	N/A	N/A		%
Link downtime (average year)	N/A	N/A		hours
Availability (worst month)	N/A	N/A		%
Link downtime (worst month)	N/A	N/A		hours
Uplink Calculation	Clear	Rain Up	Rain Dn	Units
Transmit EIRP	67.14	67.14	67.14	dBW
Uplink power control used	0	0	0	dB
Transponder input back-off (total)	4.9	4.9	4.9	dB
Input back-off per carrier	6.6	6.6	6.6	dB
Antenna mispoint	0.5	0.5	0.5	dB
Free space loss	207.03	207.03	207.03	dB
Atmospheric absorption (Ag(1%) cap)	0.13	0.13	0.13	dB
Tropospheric scintillation	0	0	0	dB
Cloud attenuation (Ac(1%) cap)	0	0	0	dB
Rain attenuation	0	0	0	dB
Total attenuation (gas-rain-cloud-scintillation)	0.13	0.13	0.13	dB
Other path losses	1.2	1.2	1.2	dB
C/No (thermal)	95.58	95.58	95.58	dB-Hz
C/N (thermal)	20.23	20.23	20.23	dB
C/ACI	27	27	27	dB
C/ASI	30	30	30	dB
C/XPI	30	30	30	dB
C/IM	25	25	25	dB
C/I (total)	21.45	21.45	21.45	dB
C/(N+I) [Es/(No+Io)]	17.79	17.79	17.79	dB
Eb/(No+Io)	12.6	12.6	12.6	dB
Downlink Calculation	Clear	Rain Up	Rain Dn	Units
Satellite EIRP total	53.6	53.6	53.6	dBW
Transponder output back-off (total)	3.3	3.3	3.3	dB
Output back-off per carrier	5	5	5	dB
Satellite EIRP per carrier	48.6	48.6	48.6	dBW
Antenna mispoint	0.39	0.39	0.39	dB
Free space loss	205.64	205.64	205.64	dB
Atmospheric absorption (Ag(1%) cap)	0.18	0.18	0.18	dB
Tropospheric scintillation	0	0	0	dB
Cloud attenuation (Ac(1%) cap)	0	0	0	dB
Rain attenuation	0	0	0	dB
Total attenuation (gas-rain-cloud-scintillation)	0.18	0.18	0.18	dB
Other path losses	0	0	0	dB

Noise increase due to precipitation	0	0	0	dB
Downlink degradation (DND)	0	0	0	dB
Total system noise	121.19	121.19	121.17	K
Figure of merit (G/T)	20.37	20.37	20.38	dB/K
C/No (thermal)	91.36	91.36	91.36	dB-Hz
C/N (thermal)	16.01	16.01	16.01	dB
C/ACI	25	25	25	dB
C/ASI	30	30	30	dB
C/XPI	27	27	27	dB
C/IM	30	30	30	dB
C/I (total)	21.45	21.45	21.45	dB
C/(N+I) [Es/(No+Io)]	14.92	14.92	14.92	dB
Eb/(No+Io)	9.73	9.73	9.74	dB
Totals per Carrier (End-to-End)	Clear	Rain Up	Rain Dn	Units
C/No (thermal)	89.97	89.97	89.97	dB-Hz
C/N (thermal)	14.62	14.62	14.62	dB
C/ACI	22.88	22.88	22.88	dB
C/ASI	26.99	26.99	26.99	dB
C/XPI	25.24	25.24	25.24	dB
C/IM	23.81	23.81	23.81	dB
C/I (total)	18.44	18.44	18.44	dB
C/(No+Io)	88.46	88.46	88.46	dB-Hz
C/(N+I) [Es/(No+Io)]	13.11	13.11	13.11	dB
Eb/(No+Io)	7.92	7.92	7.93	dB
Implementation loss	0.5	0.5	0.5	dB
System margin	1	1	1	dB
Net Es/(No+Io)	11.61	11.61	11.61	dB
Required Es/(No+Io)	11.61	11.61	11.61	dB
Excess margin	0	0	0	dB
EIRP Density Calculations	Clear	Rain Up	Rain Dn	Units
Flange transmit (up)	-68.5	-68.5	-68.5	dBW/Hz
Satellite (down)	-26.75	-26.75	-26.75	dBW/Hz
Satellite beam peak (down)	-30.05	-30.05	-30.05	dBW/Hz
Flange receive (down)	-191.3	-191.3	-191.3	dBW/Hz
Earth Station Power Requirements	Value			Units
EIRP per carrier	67.14			dBW
Available uplink power control	0			dB
Total EIRP required	67.14			dBW
Antenna gain	60.29			dBi
Antenna feed flange power per carrier	6.85			dBW
HPA output back off	4.75			dB
Waveguide loss	1			dB
Number of HPA carriers	3			

Total HPA power required	17.3668		dBW
Required HPA power	54.5355		W
Space Segment Utilization	Value		Units
Overall availability	N/A		%
Information rate	102.84		Mbps
Information rate (inc overhead)	113.124		Mbps
Transmit rate	137.12		Mbps
Symbol rate	34.28		Mbaud
Noise Bandwidth	75.35		dB-Hz
Occupied bandwidth	35.994		MHz
Minimum allocated bandwidth required	35.994		MHz
Allocated transponder bandwidth	35.994		MHz
Overall Link efficiency	3.143		bps/Hz
Percentage transponder bandwidth used	99.98		%
Used transponder power	48.6		dBW
Percentage transponder power used	67.64		%
Max carriers / transponder	1		
Limited by:	Bandwidth		
Power equivalent bandwidth usage	24.3512		MHz

Anexo 2: Cálculo de enlace LEO – Satmaster.

Para el caso de los satélites LEO se realiza cálculos de enlace para cada segmento del enlace por separado. Además, en el software se debe indicar que la señal se regenera una vez llega al satélite.

Cálculo de enlace Gateway downstream – Uplink – Sin lluvia (LEO)

Uplink Budget Produced using Satmaster Pro Monday 11 January 2021			
Service Name	UPLINK TRAMO A		
Uplink earth station	Gateway Uplink		
Satellite name	LEO SAT		
Modcod	DVBS2,normal frame,256-APSK (32/45) *,no pilots		
Link Input Parameters	Value		Units
Site latitude	12.2857S		degrees
Site longitude	76.846W		degrees
Site altitude	0.516		km

Frequency	28.5	GHz
Polarization	Circular	
Rain model	Clear sky	
Rain zone or R0.01% (mm/h)	0	
Availability (average year)	N/A	%
Antenna aperture	3.6	metres
Antenna efficiency or gain (+ or - prefix)	65	% or dBi
Coupling loss	0.5	dB
Antenna mispoint loss	0.3	dB
Other path losses (site diversity gain - ve)	0.5	dB
C/ACI	27	dB
C/ASI	27	dB
C/XPI	25	dB
C/IM	30	dB
Uplink station HPA output back-off	0	dB
Uplink power control	0	dB
Required HPA power capability	75	W
Satellite Input Parameters	Value	Units
G/T	11.3	dB/K
Bandwidth	250	MHz
Range	1200	km
Elevation	73	degree s
Longitude difference	7.61	degree s
Carrier/Link Input Parameters	Value	Units
Modulation	256-PSK	
Required Es/No	18.59	dB
Symbol rate	238	Mbaud
Information rate overhead	3.2	%
FEC code rate	0.6991	
Spreading gain (1 + Roll off factor)	1.05	
Carrier spacing factor	1.05	
Bandwidth allocation step size	0.001	MHz
Implementation Loss	0.8	dB
System margin	1.5	dB
General Calculations	Value	Units
XPD during rain	0	dB
Propagation time delay	0.004003	second s
Antenna gain	58.76	dBi
Availability (average year)	N/A	%
Link downtime (average year)	N/A	hours

Availability (worst month)	N/A		%
Link downtime (worst month)	N/A		hours
Uplink Calculation	Clear	Rain	Units
Uplink transmit EIRP	77.01	77.01	dBW
Uplink power control used	0	0	dB
Antenna mispoint	0.3	0.3	dB
Free space loss	183.13	183.13	dB
Atmospheric absorption (Ag(1%) cap)	0.31	0.31	dB
Tropospheric scintillation	0	0	dB
Cloud attenuation (Ac(1%) cap)	0	0	dB
Rain attenuation	0	0	dB
Total attenuation (gas-rain-cloud-scintillation)	0.31	0.31	dB
Other path losses	0.5	0.5	dB
Power flux density	-55.57	-	dBW/m ²
C/No (thermal)	132.67	132.67	dB-Hz
C/N (thermal)	48.9	48.9	dB
C/ACI	27	27	dB
C/ASI	27	27	dB
C/XPI	25	25	dB
C/IM	30	30	dB
C/I (total)	20.89	20.89	dB
C/(N+I)	20.88	20.88	dB
Implementation loss	0.8	0.8	dB
System margin	1.5	1.5	dB
Net Es/(No+Io)	18.58	18.58	dB
Required Es/(No+Io)	18.59	18.59	dB
Excess margin	-0.01	-0.01	dB
Earth Station Power Requirements	Value		Units
EIRP per carrier	77.01		dBW
Uplink power control available	0		dB
Total EIRP requirement	77.01		dBW
EIRP density	-65.52		dBW/H ²
HPA power per carrier	18.25		dBW
HPA output back off	0		dB
Waveguide loss	0.5		dB
Total HPA power required	18.7506		dBW
Required HPA power	75		W
Space Segment Utilization	Value		Units
Information rate	1289.8124		Mbps
Information rate (inc overhead)	1331.0864		Mbps
Transmit rate	1904		Mbps

Symbol rate	238	MBaud
Noise Bandwidth	83.77	dB-Hz
Occupied bandwidth	249.9	MHz
Allocated bandwidth	249.9	MHz

Cálculo de enlace Gateway Upstream – Downlink – Sin lluvia (LEO)

Downlink Budget Produced using Satmaster Pro Monday 11 January 2021		
Service Name	INTERNET	
Downlink earth station	GATEWAY DOWN	
Satellite name	LEO SATELLITE	
Modcod	DVBS2,normal frame,64-APSK (7/9) *,no pilots	
Link Input Parameters	Value	Units
Site latitude	12.2857S	degrees
Site longitude	76.846W	degrees
Site altitude	0.516	km
Frequency	19.5	GHz
Polarization	Circular	
Rain model	Clear sky	
Rain zone or R0.01% (mm/h)	0	
Availability (average year)	N/A	%
Antenna aperture	3.6	metres
Antenna efficiency or gain (+ or - prefix)	65	% or dBi
Coupling loss	0.5	dB
Antenna mispoint loss	0.3	dB
Other path losses	0.5	dB
LNB noise figure or temp (+ prefix)	1.5	dB or K
Antenna noise	53.16	K
LNB gain	54	dB
LNB load impedance	75	Ohms
C/ACI	27	dB
C/ASI	25	dB
C/XPI	20	dB
C/IM	30	dB
Satellite Input Parameters	Value	Units
EIRP (saturation)	38	dBW
Bandwidth	250	MHz
Range	1200	km
Elevation	75.5	degrees
Longitude difference	2.58	degrees

Carrier/Link Input Parameters	Value		Units
Modulation	64-PSK		
Required Es/No	15.47		dB
Information rate	1		Mbps
Information rate overhead	3		%
FEC code rate	0.7672		
Spreading gain	0		dB
(1 + Roll off factor)	1.05		
Carrier spacing factor	1.05		
Bandwidth allocation step size	0.001		MHz
Implementation loss	0.8		dB
System margin	1.5		dB
General Calculations	Value		Units
XPD during rain	0		dB
Propagation time delay	0.004003		seconds
Antenna gain	55.46		dBi
EIRP density (satellite)	-15.5		dBW/H z
EIRP density (flange)	-140.98		dBW/H z
Availability (average year)	N/A		%
Link downtime (average year)	N/A		hours
Availability (worst month)	N/A		%
Link downtime (worst month)	N/A		hours
Downlink Calculation	Clear	Rain	Units
Satellite EIRP per carrier	38	38	dBW
Antenna mispoint	0.3	0.3	dB
Free space loss	179.83	179.83	dB
Atmospheric absorption (Ag(1%) cap)	0.32	0.32	dB
Tropospheric scintillation	0	0	dB
Cloud attenuation (Ac(1%) cap)	0	0	dB
Rain attenuation	0	0	dB
Total attenuation (gas-rain-cloud-scintillation)	0.32	0.32	dB
Other path losses	0.5	0.5	dB
Noise increase due to precipitation	0	0	dB
Downlink degradation (DND)	0	0	dB
Total system noise	200.96	200.95	K
Figure of merit (G/T)	31.93	31.93	dB/K
Power flux density	-95.38	-95.38	dBW/m ²
Carrier power at LNB output	-33.67	-33.67	dBW
Carrier power at LNB output	-3.67	-3.67	dBm

Carrier level at LNB output (75 Ohm)	105.08	105.08	dBuV
Carrier level at LNB output (75 Ohm)	45.08	45.08	dBmV
C/No (thermal)	117.58	117.58	dB-Hz
C/N (thermal)	64.08	64.08	dB
C/ACI	27	27	dB
C/ASI	25	25	dB
C/XPI	20	20	dB
C/IM	30	30	dB
C/I (total)	17.92	17.92	dB
C/(N+I)	17.92	17.92	dB
Implementation loss	0.8	0.8	dB
System margin	1.5	1.5	dB
Net Es/(No+Io)	15.62	15.62	dB
Required Es/(No+Io)	15.47	15.47	dB
Excess margin	0.15	0.15	dB
Space Segment Utilization	Value		Units
Information rate	1		Mbps
Information rate (inc overhead)	1.03		Mbps
Coded bitrate	1.3425		Mbps
Symbol rate	0.2238		MBaud
Noise Bandwidth	53.5		dB-Hz
Occupied bandwidth	0.2349		MHz
Allocated bandwidth	0.235		MHz

Cálculo de enlace remota upstream – uplink – Sin lluvia (LEO)

Uplink Budget Produced using Satmaster Pro Monday 11 January 2021			
Service Name	INTERNET		
Uplink earth station	SITE 1		
Satellite name	LEO SAT		
Modcod	DVBS2,normal frame,256-APSK (31/45-L) *,no pilots		
Link Input Parameters	Value		Units
Site latitude	12.6952S		degree s
Site longitude	69.233W		degree s
Site altitude	0.297		km
Frequency	14.5		GHz
Polarization	Horizontal		
Rain model	Clear sky		
Rain zone or R0.01% (mm/h)	0		

Availability (average year)	N/A	%
Antenna aperture	0.74	metres
Antenna efficiency or gain (+ or - prefix)	65	% or dBi
Coupling loss	0.5	dB
Antenna mispoint loss	0.8	dB
Other path losses (site diversity gain - ve)	0.5	dB
C/ACI	27	dB
C/ASI	27	dB
C/XPI	25	dB
C/IM	30	dB
Uplink station HPA output back-off	0	dB
Uplink power control	0	dB
Required HPA power capability	1	W
Satellite Input Parameters		
	Value	Units
G/T	-1	dB/K
Bandwidth	250	MHz
Range	1200	km
Elevation	73	degree s
Longitude difference	5.03	degree s
Carrier/Link Input Parameters		
	Value	Units
Modulation	256-PSK	
Required Es/No	18.1	dB
Information rate	1	Mbps
Information rate overhead	3	%
FEC code rate	0.6772	
Spreading gain (1 + Roll off factor)	0	dB
Carrier spacing factor	1.05	
Bandwidth allocation step size	0.001	MHz
Implementation Loss	0.8	dB
System margin	1.6	dB
General Calculations		
	Value	Units
XPD during rain	0	dB
Propagation time delay	0.004003	second s
Antenna gain	39.15	dBi
Availability (average year)	N/A	%
Link downtime (average year)	N/A	hours
Availability (worst month)	N/A	%
Link downtime (worst month)	N/A	hours
Uplink Calculation	Clear	Rain Units

Uplink transmit EIRP	38.65	38.65	dBW
Uplink power control used	0	0	dB
Antenna mispoint	0.8	0.8	dB
Free space loss	177.26	177.26	dB
Atmospheric absorption (Ag(1%) cap)	0.16	0.16	dB
Tropospheric scintillation	0	0	dB
Cloud attenuation (Ac(1%) cap)	0	0	dB
Rain attenuation	0	0	dB
Total attenuation (gas-rain-cloud-scintillation)	0.16	0.16	dB
Other path losses	0.5	0.5	dB
Power flux density	-93.93	-	dBW/m ²
C/No (thermal)	87.53	87.53	dB-Hz
C/N (thermal)	34.74	34.74	dB
C/ACI	27	27	dB
C/ASI	27	27	dB
C/XPI	25	25	dB
C/IM	30	30	dB
C/I (total)	20.89	20.89	dB
C/(N+I)	20.71	20.71	dB
Implementation loss	0.8	0.8	dB
System margin	1.6	1.6	dB
Net Es/(No+Io)	18.31	18.31	dB
Required Es/(No+Io)	18.1	18.1	dB
Excess margin	0.21	0.21	dB
Earth Station Power Requirements	Value		Units
EIRP per carrier	38.65		dBW
Uplink power control available	0		dB
Total EIRP requirement	38.65		dBW
EIRP density	-53.29		dBW/H ²
HPA power per carrier	-0.5		dBW
HPA output back off	0		dB
Waveguide loss	0.5		dB
Total HPA power required	0		dBW
Required HPA power	1		W
Space Segment Utilization	Value		Units
Information rate	1		Mbps
Information rate (inc overhead)	1.03		Mbps
Transmit rate	1.521		Mbps
Symbol rate	0.1901		MBaud
Noise Bandwidth	52.79		dB-Hz
Occupied bandwidth	0.1996		MHz
Allocated bandwidth	0.2		MHz

Cálculo de enlace remota downstream – downlink – Sin lluvia (LEO)

Downlink Budget Produced using Satmaster Pro Monday 11 January 2021			
Service Name	INTERNET		
Downlink earth station	SITE_1		
Satellite name	LEO SATELLITE		
Modcod	DVBS2,normal frame,32-APSK (11/15) *,no pilots		
Link Input Parameters	Value		Units
Site latitude	12.6952S		degree s
Site longitude	69.233W		degree s
Site altitude	0.297		km
Frequency	13.5		GHz
Polarization	Circular		
Rain model	Clear sky		
Rain zone or R0.01% (mm/h)	0		
Availability (average year)	N/A		%
Antenna aperture	0.75		metres
Antenna efficiency or gain (+ or - prefix)	65		% or dBi
Coupling loss	0.5		dB
Antenna mispoint loss	0.8		dB
Other path losses	0.5		dB
LNB noise figure or temp (+ prefix)	0.8		dB or K
Antenna noise	42.62		K
LNB gain	48		dB
LNB load impedance	75		Ohms
C/ACI	27		dB
C/ASI	25		dB
C/XPI	20		dB
C/IM	30		dB
Satellite Input Parameters	Value		Units
EIRP (saturation)	34.6		dBW
Bandwidth	250		MHz
Range	1200		km

Elevation	73		degrees
Longitude difference	5.03		degrees
Carrier/Link Input Parameters	Value		Units
Modulation	32-PSK		
Required Es/No	12.17		dB
Symbol rate	238		Mbaud
Information rate overhead	3		%
FEC code rate	0.7241		
Spreading gain (1 + Roll off factor)	0		dB
Carrier spacing factor	1.05		
Bandwidth allocation step size	0.001		MHz
Implementation loss	0.8		dB
System margin	1.6		dB
General Calculations	Value		Units
XPD during rain	0		dB
Propagation time delay	0.004003		seconds
Antenna gain	38.64		dBi
EIRP density (satellite)	-49.17		dBW/Hz
EIRP density (flange)	-188.59		dBW/Hz
Availability (average year)	N/A		%
Link downtime (average year)	N/A		hours
Availability (worst month)	N/A		%
Link downtime (worst month)	N/A		hours
Downlink Calculation	Clear	Rain	Units
Satellite EIRP per carrier	34.6	34.6	dBW
Antenna mispoint	0.8	0.8	dB
Free space loss	176.64	176.64	dB
Atmospheric absorption (Ag(1%) cap)	0.13	0.13	dB
Tropospheric scintillation	0	0	dB
Cloud attenuation (Ac(1%) cap)	0	0	dB
Rain attenuation	0	0	dB
Total attenuation (gas-rain-cloud-scintillation)	0.13	0.13	dB
Other path losses	0.5	0.5	dB
Noise increase due to precipitation	0	0	dB
Downlink degradation (DND)	0	0	dB
Total system noise	130.58	130.57	K
Figure of merit (G/T)	16.98	16.99	dB/K

Power flux density	-99.28	-	dBW/m
		99.28	2
Carrier power at LNB output	-57.19	-	dBW
		57.19	
Carrier power at LNB output	-27.19	-	dBm
		27.19	
Carrier level at LNB output (75 Ohm)	81.56	81.56	dBuV
Carrier level at LNB output (75 Ohm)	21.56	21.56	dBmV
		102.1	
C/No (thermal)	102.11	1	dB-Hz
C/N (thermal)	18.35	18.35	dB
C/ACI	27	27	dB
C/ASI	25	25	dB
C/XPI	20	20	dB
C/IM	30	30	dB
C/I (total)	17.92	17.92	dB
C/(N+I)	15.12	15.12	dB
Implementation loss	0.8	0.8	dB
System margin	1.6	1.6	dB
Net Es/(No+Io)	12.72	12.72	dB
Required Es/(No+Io)	12.17	12.17	dB
Excess margin	0.55	0.55	dB
Space Segment Utilization	Value		Units
Information rate	836.5816		Mbps
Information rate (inc overhead)	861.679		Mbps
Coded bitrate	1190		Mbps
Symbol rate	238		MBaud
Noise Bandwidth	83.77		dB-Hz
Occupied bandwidth	249.9		MHz
Allocated bandwidth	249.9		MHz

Cálculo de enlace upstream – uplink en condiciones de lluvia

Uplink Budget Produced using Satmaster Pro Monday 11 January 2021			
Service Name	INTERNET		
Uplink earth station	SITE 1		
Satellite name	LEO SAT		
Modcod	DVBS2,normal frame,32-APSK (8/9),no pilots		
Link Input Parameters	Value		Units
Site latitude	12.6952S		degrees
Site longitude	69.233W		degrees

Site altitude	0.297	km
Frequency	14.5	GHz
Polarization	Horizontal	
Rain model	ITU-R	
Rain zone or R0.01% (mm/h)	92.449	
Availability (average year)	99.5	%
Antenna aperture	0.74	metres
Antenna efficiency or gain (+ or - prefix)	65	% or dBi
Coupling loss	0.5	dB
Antenna mispoint loss	0.8	dB
Other path losses (site diversity gain -ve)	0.5	dB
C/ACI	27	dB
C/ASI	27	dB
C/XPI	25	dB
C/IM	30	dB
Uplink station HPA output back-off	0	dB
Uplink power control	0	dB
Required HPA power capability	1	W
Satellite Input Parameters	Value	Units
G/T	-1	dB/K
Bandwidth	250	MHz
Range	1200	km
Elevation	73	degrees
Longitude difference	5.03	degrees
Carrier/Link Input Parameters	Value	Units
Modulation	32-PSK	
Required Es/No	15.69	dB
Symbol rate	0.1901	Mbaud
Information rate overhead	3	%
FEC code rate	0.8796	
Spreading gain	0	dB
(1 + Roll off factor)	1.05	
Carrier spacing factor	1.05	
Bandwidth allocation step size	0.001	MHz
Implementation Loss	0.8	dB
System margin	1.6	dB
General Calculations	Value	Units
XPD during rain	41.09	dB
Propagation time delay	0.004003	seconds
Antenna gain	39.15	dBi
Availability (average year)	99.5	%
Link downtime (average year)	43.83	hours
Availability (worst month)	98.4404	%
Link downtime (worst month)	11.392	hours

Uplink Calculation	Clear	Rain	Units
Uplink transmit EIRP	38.65	38.65	dBW
Uplink power control used	0	0	dB
Antenna mispoint	0.8	0.8	dB
Free space loss	177.26	177.26	dB
Atmospheric absorption (Ag(1%) cap)	0.16	0.19	dB
Tropospheric scintillation	0	0.27	dB
Cloud attenuation (Ac(1%) cap)	0	0.47	dB
Rain attenuation	0	3.43	dB
Total attenuation (gas-rain-cloud-scintillation)	0.16	4.11	dB
Other path losses	0.5	0.5	dB
Power flux density	-93.93	-	dBW/m
C/No (thermal)	87.53	97.87	2
C/N (thermal)	34.74	83.58	dB-Hz
C/ACI	27	30.79	dB
C/ASI	27	23.05	dB
C/XPI	25	23.05	dB
C/IM	30	24.89	dB
C/I (total)	20.89	30	dB
C/(N+I)	20.71	18.5	dB
Implementation loss	0.8	18.25	dB
System margin	1.6	0.8	dB
Net Es/(No+Io)	18.31	1.6	dB
Required Es/(No+Io)	15.69	15.85	dB
Excess margin	2.62	15.69	dB
Excess margin	2.62	0.16	dB
Earth Station Power Requirements	Value		Units
EIRP per carrier	38.65		dBW
Uplink power control available	0		dB
Total EIRP requirement	38.65		dBW
EIRP density	-53.29		dBW/H
HPA power per carrier	-0.5		z
HPA output back off	0		dBW
Waveguide loss	0.5		dB
Total HPA power required	0		dBW
Required HPA power	1		W
Space Segment Utilization	Value		Units
Information rate	0.8117		Mbps
Information rate (inc overhead)	0.8361		Mbps
Transmit rate	0.9505		Mbps
Symbol rate	0.1901		MBaud
Noise Bandwidth	52.79		dB-Hz
Occupied bandwidth	0.1996		MHz

Allocated bandwidth	0.2		MHz
---------------------	-----	--	-----

Anexo 3: Planta existente en la red VSAT GEO

La información de este anexo se incluye en un documento aparte (Anexo 3: Planta existente)

