



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CÁLCULOS DE ENLACE Y
ATENUACIÓN POR LLUVIA
PARA COMUNICACIONES
POR SATÉLITE EN LA
BANDA Ka PARA MÉXICO**

acompañado de un CD Rom.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

P R E S E N T A N :

HUGO CRUZ SÁNCHEZ

HORACIO HERNÁNDEZ BAUTISTA

DIRECTOR DE TESIS: DR. SALVADOR LANDEROS AYALA

CIUDAD UNIVERSITARIA

2001



2013-10



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A nuestros profesores,
Al Dr. Salvador Landeros Ayala,

A nuestra Universidad.

A mis padres, a mi familia, a Aída.

A todas aquellas personas que con su trabajo hacen posible que viva nuestra Universidad.

Gracias.

Hugo Cruz Sánchez.

A mis padres el C. Lic. Euracio Hernández Velasco y la Sra. Aída Bautista Contreras por ese gran apoyo que me brindaron a lo largo de todos mis años de estudio, y de quienes obtuve las fuerzas suficientes para siempre seguir adelante.

A mis hermanos, Gerardo Hernández Bautista y Paúl Rodrigo Hernández Bautista por su apoyo moral.

A mi compañero de tesis, Hugo Cruz Sánchez, por la gran dedicación que mostró en la realización de esta tesis y por su paciencia.

Horacio Hernández Bautista.

Indice

Capítulo 1. Introducción	1
Capítulo 2. Sistemas de comunicación en Banda Ka	7
Satélites en Banda Ka	8
Ventajas de la operación en Banda Ka	9
Requerimientos para el diseño de sistemas	11
Sistema Hughes Spaceway	13
Sistema Teledesic	13
Sistema EuroSkyWay	17
Sistema Italsat	17
Sistema Astrolink	19
Sistema WildBlue	20
Sistema Hot Bird 6	20
Sistema S2COM	21
Sistema Anik F2	22
Sistema Celestri/Millennium	23
Sistema Cyberstar	24
Sistema Morning Star	24
Capítulo 3. Estaciones Terrenas para Banda Ka	26
Características generales de una Estación Terrena	26
Evolución de las Estaciones Terrenas para banda Ka	27
Otras Estaciones Terrenas	38
Capítulo 4. Propagación en Banda Ka	41
Propagación a través de la atmósfera	42
Otros efectos ambientales y atmosféricos	48
Atenuación por absorción de gases	49
Atenuación por lluvia	53
Modelos de atenuación por lluvia	55
Modelo DAH	58
Márgenes de lluvia para México en banda Ka	61
Capítulo 5. Cálculos de enlace	71
Antecedentes	71
Ejemplo de cálculo de enlace para banda Ka	86
Cálculos para diferentes ciudades de México	93
Capítulo 6. Perspectivas para la Banda Ka	105
Capítulo 7. Conclusiones	110

Capítulo 1.

Introducción.

Una era de enormes mejoras a las comunicaciones globales fue iniciada hace justamente más de 30 años, en 1965, cuando la NASA colocó el primer satélite de comunicaciones comercial en el mundo: "Early Bird" (después renombrado INTELSAT 1) en una órbita geoestacionaria sobre el océano Atlántico, proporcionando 240 circuitos de voz entre los Estados Unidos y Europa. Este sencillo satélite tenía una capacidad casi igual a la de todos los cables coaxiales de RF que habían sido colocados bajo el Océano Atlántico en ese tiempo. Además, este satélite transmitió señales de televisión, mismas que los cables de ese entonces no podían hacer.

El concepto de establecer un único sistema de satélites de comunicación global para el beneficio de toda la humanidad, a través de la cooperación internacional, fue introducido dentro de la ley de los Estados Unidos con la entrada del Acta de Comunicaciones Satelitales de 1962, bajo la administración del entonces presidente Kennedy. El acta permitió la incorporación de COMSAT en 1963, y la creación de INTELSAT (*International Telecommunications Satellite Organization*) al año siguiente.

Desde entonces, ha habido un gran desarrollo tanto de los servicios que se ofrecen por satélite como de la tecnología que se emplea en ellos. Así como también una serie de regulaciones en cuanto a los servicios fijos y móviles que se prestan, la cobertura de estos, los rangos de frecuencia asignados a esos servicios, etc.

Las comunicaciones por satélite actualmente son un gran negocio, teniendo sectores cuyo crecimiento va del 10% al 30% anualmente. Actualmente más de 200 naciones y territorios están involucrados en las comunicaciones satelitales. Existen más de 30 sistemas regionales, nacionales e internacionales en operación empleando más de 200 satélites en órbita geoestacionaria. Miles de estaciones terrenas con antenas de gran tamaño que van desde los tres metros hasta los 30 metros, 200,000 terminales VSAT (1 a 3 metros), y millones de receptores de radiodifusión en servicios de televisión y radio (menores a 1 metro), llevan y reciben voz, video y datos a ciudades internacionales grandes y pequeñas, a pequeñas comunidades rurales, a embarcaciones en ríos y océanos, así como a aviones y transbordadores espaciales, además de ofrecer en la actualidad servicios personales de comunicación PCS (*Personal Communication System*) en todo el mundo.

El gran crecimiento de las telecomunicaciones alrededor del mundo está provocando una demanda de velocidades de transmisión cada vez más altas que, como consecuencia requiere un mayor ancho de banda. Muchas empresas están actualmente suscritas a servicios de ISDN (45 Mbps) y las redes corporativas emplean E1 o T1. Los centros de investigación emplean T3, además, las troncales de las grandes redes mundiales emplean OC-3 (155 Mbps). Los experimentos de tecnología avanzada están llegando a emplear velocidades tan grandes como 100 Gbps.

Se espera un rápido crecimiento en los nuevos servicios satelitales que incorporan VSAT y USAT durante los próximos años. Además de los servicios que se proyectan implementar en un futuro, los servicios actuales se pueden beneficiar con el empleo

de terminales más pequeñas incluyendo el acceso a Internet, aplicaciones multimedia, e interconexiones de LAN's.

Los servicios fijos por satélite fueron inicialmente ofrecidos por INTELSAT usando para ello la banda C, con frecuencias alrededor de 6 GHz en la dirección tierra – satélite y 4 GHz en la dirección satélite – tierra. Las estaciones terrenas empleadas por el sistema INTELSAT fueron inicialmente grandes, pero han ido decreciendo en tamaño debido al lanzamiento de satélites más potentes. La ausencia de un apropiado manejo de las ranuras orbitales en banda C, así como el auge en la necesidad de mayor ancho de banda, condujo a los constructores de satélites a diseñar e implementar satélites que operen en la banda Ku, empleando 14 GHz para los enlaces ascendentes y 12 GHz para los enlaces descendentes. Los últimos satélites que conforman al sistema INTELSAT fueron construidos con transpondedores que operan tanto en la banda C como en la banda Ku, mientras que los satélites dedicados a la transmisión de señal de TV fueron diseñados en su mayoría para operar solo en la banda Ku.

Debido a la congestión que presentan recientemente las bandas de frecuencia bajas como son la Banda C y la Banda Ku, la mayoría de los servicios que se ofrecen en dichas bandas se ofrecerán en la Banda Ka (20 GHz /30 GHz).

Uno de los problemas que trae consigo el uso de la banda Ka es el incremento de los fenómenos de atenuación de las ondas electromagnéticas con respecto a otras frecuencias menores. Fenómenos como la atenuación por la lluvia, hacen que el diseño de un enlace en Banda Ka sea mas cuidadoso. Por ello que se hace necesario el cálculo y la predicción, lo más preciso posible, de los fenómenos de propagación, principalmente en sistemas de bajo margen, con la finalidad de hacerlos más eficientes en funcionamiento y costo.

De los tres servicios satelitales que existen actualmente (servicio fijo, servicio móvil y radiodifusión), solo el primero puede ser considerado realmente como un servicio maduro. Dentro de los servicios fijos, la telefonía esta decreciendo, la distribución de televisión se incrementa lentamente y los servicios ofrecidos por medio de las VSAT se están incrementando rápidamente.

El servicio móvil y la radiodifusión vía satélite están creciendo rápidamente (ambos en más del 20% anualmente). El futuro de la distribución de televisión por satélite se ve muy prometedor. Dentro del servicio móvil, el concepto de las comunicaciones personales por satélite (usuarios empleando teléfonos portátiles que puedan ofrecer una gran diversidad de servicios multimedia) ha atrapado la atención de muchos. La competencia en el mercado de los servicios personales mediante sistemas de satélites en orbitas geoestacionaria, medias y bajas es enorme.

Es de notar que las tres servicios mencionados con anterioridad tienen sus respectivos competidores terrestres. Estos son mostrados en la tabla 1, además se muestran las ventajas que ofrecen los satélites para cada uno de los servicios mencionados.

Servicio	Competidor	Ventajas del satélite
Fijo	Fibras ópticas	Redes multi-nodo
Radiodifusión	Distribución por cable	Mayor área de cobertura
Móvil	Celular	Mayor área de cobertura

Tabla 1. Servicios satelitales.

Se puede anticipar que los satélites que operarán en banda Ka jugarán un papel muy importante en el contexto de los servicios multimedia interactivos. Los sistemas satelitales anunciados recientemente son una respuesta de la comunidad involucrada en comunicaciones satelitales a la creciente demanda de los usuarios con el propósito de poderles brindar toda una variedad de servicios sobre bases globales.

El concepto de Infraestructura de Información Global (*Global Information Infrastructure GII*) como una red de redes, creará un mercado de información global. Es en este concepto y en los futuros proyectos de implementación, donde los satélites juegan un papel fundamental. Los sistemas globales de satélites propuestos cumplen en gran medida los requisitos que permitirán la implementación de la GII.

Los requisitos que la GII demanda son:

- Globalidad
- Banda ancha
- Flexibilidad
- Bajo costo.

Para poder satisfacer esta demanda, las características de los sistemas satelitales futuros son:

Operación en Banda Ka, permitirá el uso de pequeñas terminales y como consecuencia, la posibilidad de expandir el mercado potencial sirviendo directamente a usuarios finales tanto del tipo comercial y como del tipo residencial. En adición, se resolverá de cierta forma el problema de la congestión que están experimentando las frecuencias bajas actualmente.

Cobertura multi-punto, lo que permitirá mejorar la calidad del enlace.

Regeneración a bordo y enrutamiento, lo que permitirá el enlace y el intercambio de información entre usuarios que se encuentran en diferente haces además de garantizar una calidad completa en la transmisión de la información.

Asignación de frecuencias por demanda, permitirá el uso eficiente del ancho de banda asignado a cada usuario en cuanto a tiempo y frecuencia.

Enlaces Inter-satelitales, en caso de implementaciones de cobertura global.

Las soluciones para las grandes redes mundiales del futuro, así como para los diferentes servicios, serán en gran medida los satélites de comunicaciones en Banda Ka, debido a las grandes ventajas con las que contarán.

Entre esas ventajas podemos mencionar:

1. Cobertura total, conectividad con quien sea, en donde sea y en cualquier momento.
2. Redes multipunto de altas velocidades y de áreas extensas.
3. Costos independientes de la distancia.
4. Movilidad de los usuarios.
5. Inmunidad a desastres naturales.
6. Distribución simultánea de información a diferentes usuarios.
7. Rápido desarrollo e Inter-conectividad global con redes de comunicaciones a bajo costo.
8. Servicios de comunicación aeronáutica y marítima multimedia.

Estos sistemas satelitales como elementos clave en la GII permitirán nuevos servicios como son:

- Aplicaciones en medicina remota.
- Comunicaciones personales globales.
- Transmisión de voz, video y datos en tiempo real.
- Redes comerciales avanzadas inalámbricas fijas.
- Acceso a redes de educación a distancia en áreas remotas.
- Interconexión a altas velocidades a redes mundiales desde localidades remotas.
- Intercomunicación entre supercomputadoras.

Muchos sistemas ya han sido propuestos y aunque son sistemas avanzados y con propuestas extensas en cuanto a los servicios que pueden ofrecer, estos son apenas el inicio de una gran camino por recorrer.

La idea de usar la banda Ka para servicios fijos por satélite comerciales fue seriamente discutido en la mitad de los años 80's, aproximadamente en ese mismo tiempo, la banda Ku estaba siendo implementada para servicios comerciales. El satélite Olympus de la Agencia Espacial Europea era construido y lanzado, principalmente para estudiar los efectos de propagación e investigar el uso de procesadores a bordo del satélite.

Un número de programas experimentales y pre-operacionales en los Estados Unidos, Japón, Italia y Alemania fueron contribuciones sustanciales para concretar el conocimiento acerca de la banda Ka.

En Alemania, el satélite DFS-Kopernikus transportaba una carga útil destinada a trabajar en banda Ka, mientras que los satélites Italsat tienen un arreglo operacional en banda Ka, el cual está siendo usado.

En los Estados Unidos el satélite ACTS (*Advanced Communication Technology Satellite*) lanzado en 1993, introdujo muchas nuevas tecnologías entre las que se incluía una antena de haces múltiples operando en Banda Ka. Esta antena producía tres haces fijos y 47 haces rápidamente re-configurables con aproximadamente 0.3 grados de ancho de haz y ganancias de aproximadamente 50 dBi.

Fue gracias al satélite ACTS, que se pudo lograr que diversos grupos de trabajo experimentaran con nuevas tecnologías (como por ejemplo el procesador de conmutación a bordo), así como la implementación de diversos servicios y un estudio más detallado sobre la propagación en Banda Ka. Este satélite fue uno de los más importantes, ya que fue el pionero en manejar una propuesta comercial para el uso de la banda Ka en los satélites.

Un estudio conducido por COMSYS para una empresa manufacturadora de naves espaciales en 1986, encontró que la única razón para que los usuarios y operadores de los segmentos espaciales emigrarán a la banda Ka, debería ser que la capacidad de los satélites que operan a bajas frecuencias no fuera suficiente. El uso de técnicas de procesamiento a bordo es visto como un requerimiento para cuando se tenga que emigrar a la banda Ka

Cerca de los años 90's, empezaron a emerger los primeros planes comerciales para sistemas en banda Ka, seguidos por aplicaciones de un gran número de compañías americanas, así como también de un gran número de filiales de la ITU de muchos países del mundo.

En aquellos tiempos la principal aplicación que se predecía para las sistemas en banda Ka era el servicio de telefonía básica en las áreas de bajo servicio, videoconferencia y ancho de banda sobre demanda para aplicaciones de medicina y acceso a servicios en línea.

La Internet comenzó a recibir particular consideración en algunas de las aplicaciones enviadas a la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC), las cuales fueron analizadas en su reunión de Noviembre de 1995. Desde entonces un gran número de cláusulas para los satélites en banda Ka han sido discutidos ampliamente.

El presente trabajo tiene como finalidad dar una visión general de las comunicaciones por satélite en banda Ka además de dar a conocer las dimensiones de la atenuación por lluvia y las características de las estaciones terrenas que se utilizarían en los futuros sistemas para varias localidades de México.

En el capítulo de Sistemas de Comunicación en Banda Ka, se describen algunas de las características más relevantes de estos nuevos sistemas, así como los problemas que deben de superarse para poder ofrecer la calidad requerida en los diversos servicios fijos o móviles que se tiene contemplado, prestarán estos nuevos sistemas. Una descripción breve de algunos de los sistemas en banda Ka más prometedores que comenzarán a dar servicio en los próximos años, así como también de los sistemas en los que se llevaron a cabo los experimentos que sirvieron de base para el diseño de la nueva generación de satélites de comunicación que operarán en la banda Ka es incluida en este capítulo.

En el capítulo de Estaciones Terrenas se hace una descripción de las características generales que posee una estación terrena operando en banda Ka de acuerdo a ciertos estándares establecidos, con el fin de poder aprovechar mejor dicha banda. Además se hace una descripción de algunas de las terminales (USAT, VSAT, Pico terminales, etc) que se emplearán para las comunicaciones en banda Ka.

En el capítulo de Propagación se describen los fenómenos que causan deterioros sobre las señales a lo largo de un enlace de comunicaciones. Se hace un análisis en el efecto que tiene la atenuación por lluvia sobre las comunicaciones en banda Ka y se describen algunos de los modelos que se han desarrollado para analizar el efecto de atenuación por lluvia, con base a datos experimentales obtenidos a lo largo de 6 años de mediciones con ayuda del satélite ACTS.

En el capítulo de Cálculos de Enlace se busca dar las características generales en cuanto a las características físicas de las antenas para las estaciones terrenas en diferentes zonas de la República Mexicana, tomando como referencia las características del satélite Anik F2, próximo a ser lanzado en el 2002. Cabe destacar que éste será el primer satélite de comunicaciones comercial en banda Ka para América del Norte. Es importante mencionar que dentro de los cálculos de enlace, en la parte correspondiente al cálculo de atenuación por lluvia, se hace el análisis empleando el modelo DAH debido a que es considerado como el mejor modelo para el análisis de atenuación por lluvia en la banda Ka.

En el capítulo de Perspectivas se analiza el futuro mercado de las comunicaciones globales por satélite. Se describen los servicios que serán demandados por los usuarios de la siguiente generación, y con ello el papel que juega el acceso de alta velocidad a Internet y las aplicaciones multimedia como las directrices principales en el diseño de los nuevos sistemas globales y regionales de comunicación por satélite que están siendo desarrollados.

Capítulo 2.

Sistemas de comunicación en Banda Ka.

Una gran variedad de organizaciones han expresado en los últimos años su gran interés por proveer servicios comerciales a través de sistemas satelitales en banda Ka. Tanto servicios móviles como servicios fijos han sido propuestos usando sistemas de satélites en orbitas geoestacionarias (GSO) o en orbitas no geoestacionarias (NGSO) además de otros sistemas no comerciales¹. La siguiente generación de rastreo y transmisión de datos satelitales (*Tracking and Data Relay Satellites TDRS*) usará enlaces en banda Ka, estos serán sustentados por los experimentos que se han llevado a cabo en los últimos años, principalmente a los experimentos realizados con el ACTS² (*Advanced Communications Technology Satellite*).

La tabla siguiente muestra las frecuencias actuales para enlaces de bajada (*downlink* [D]) y para enlaces de subida (*up-link* [U]) asignados a servicios de satélites fijos (*Fixed Satellite Service* [FSS]) y a servicios de transmisión por satélite (*Broadcast-satellite Service* [BSS]) por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) para la región 2 (América y Groenlandia).

Banda	Ancho de Banda (MHz)	Rango de Frecuencias (MHz)	Tipo de Enlace	Servicio
C	800	3400-4200	D	FSS
	800	5925-6725	U	FSS
X	500	7250-7750	D	FSS
	500	7900-8400	U	FSS
Ku	250	10950-11200	D	FSS
	250	11450-11700	D	FSS
	500	11700-12200	D	FSS
	500	12200-12700	D	BSS
	750	13750-14500	U	FSS
Ka	500	17300-17800	D/U	BSS ¹
	3500	17700-21200	D	FSS
	4000	27000-31000	U	FSS

Tabla 1. Frecuencias Espacio – Tierra asignadas por la ITU para la Región 2.

La banda Ka es una porción del espectro de frecuencia que ofrece tres ventajas sobre las frecuencias bajas:

1. Disponibilidad del espectro.
2. Reduce el potencial de interferencia.
3. Pequeños tamaños de equipo.

¹ Esta asignación deberá entrar en efecto el 1 de Abril del 2007.

Sin embargo, esas ventajas vienen con un costo en la operación, el cual radica en que los enlaces en banda Ka son más susceptibles a sufrir deterioros durante su propagación a través de la tropósfera que los enlaces a bajas frecuencias³.

Ajustar estos deterioros resulta ser más difícil en las frecuencias elevadas y requiere un buen entendimiento del fenómeno, así como de su correspondiente impacto sobre el desempeño y la disponibilidad de los sistemas. Una eficiente utilización de estas frecuencias, demanda que las limitaciones sobre la trayectoria sean comprendidas y ajustadas para la planeación, diseño e implementación de un sistema. Cualquier sistema de satélites tiene que sus recursos para servir a sus clientes y esos recursos deben de ser asignados acertadamente para encontrar las especificaciones de desempeño y ofrecer un servicio viable y rentable.

Debido a que la degradación durante la propagación puede ser severa en banda Ka, varias técnicas adaptivas de mitigación de deterioro han estado bajo desarrollo para mejorar la disponibilidad de los enlaces tanto para terminales pequeñas como para terminales grandes, incluyendo la diversidad de sitios, control de potencia de transmisión, varias formas de corrección de errores digitales, y compartición de recursos, como por ejemplo: Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA), como fue demostrado con el Satélite ACTS (*Advanced Communications Technology Satellite*).

Satélites en Banda Ka.

La historia de los satélites de comunicación en la banda Ka comenzó con la medición de señales durante los 70's con el fin de caracterizar los efectos de propagación, particularmente los causados por la lluvia. Esas mediciones comenzaron con los satélites de aplicaciones tecnológicas: el ATS-5 y el ATS-6 de la NASA; así como también con los satélites: COMSTAR (USA), ETS-11 (Japón), SIRIO (Italia) y el CS (Japón). Fueron introducidos enlaces operacional en banda Ka por primera vez en Japón, a bordo del satélite CS (Comet S), seguido por el desarrollo de los satélites OLYMPUS (ESA, 1989), ITALSAT (Italia, 1990) y más recientemente por el ACTS, lanzado por la NASA en septiembre de 1993. Principalmente, sobre este último se realizaron varias pruebas, las cuales servirán de base para la siguiente generación de satélites que emplearán las nuevas tecnologías en Banda Ka.

Existe una serie de sistemas de comunicación basados en satélites así como aplicaciones que se encuentran en fase pre-operacional o en algún programa de trabajo cuyo propósito es planear la modernización de estos con el propósito de que operen en banda Ka. Muchos de esos sistemas capitalizan el amplio ancho de banda disponible para proveer de un ancho de banda sobre demanda con gran capacidad las terminales fijas o móviles de los usuarios. Algunos de esos sistemas proponen usar banda Ka en los enlaces del proveedor, mientras que otros planean usar banda Ka en los enlaces del usuario.

Sistemas GSO/FSS

Los sistemas GSO/FSS involucran la extensión de sistemas FFS internacionales y locales utilizando el servicio de VSAT's para satélites en la órbita geoestacionaria. Los sistemas de banda Ka ofrecen el potencial para velocidades

de datos relativamente altas (velocidades de un T1, es decir 1.544 Mbps, o mayores), además de prometer a los consumidores el uso de terminales terrestres muy pequeñas (diámetros de antenas del orden de 60 cm.). En los E.U.A., la Comisión Federal de Comunicaciones, empezó a hacer comentarios acerca de la posibilidad de los servicios en banda Ka⁴ y en septiembre de 1995 varias organizaciones empezaron a registrar aplicaciones en banda Ka para servicios de satélites fijos en la órbita geoestacionaria, estos sistemas fueron los siguientes: AT&T (VoiceSpanⁱⁱ), Comm, Inc., una división de Motorola (Millenium), EchoStar Satellite Corporation (EchoStar), GE Americom (GE*Star), Hughes Communication Corporation (Galaxy-Spaceway), KaStar Communication Corporation (KaStar), Lockheed-Martin (Astrolink), Loral (CyberStar), Morning Star Sattellite Co. (NetSat28), Norris Communications (NorStar), Orion Network Systems (Orion), Panamsat Corp. (PAS-10ⁱⁱⁱ,11)) y VisionStar, INC. (VisionStar). El número total de satélites de órbita geoestacionaria propuestos para servicios fijos por satélite en banda Ka por las compañías antes mencionadas excedían los 72 satélites en ese año.

Sistemas NGSO/FSS

Un mejor desarrollo en sistemas de comunicación basados en satélites es el objetivo de los sistemas NGSO, los cuales esperan demostrar esto antes del final de la década. Uno de esos sistemas es el Teledesic, el cual planea operar servicios fijos por satélite con servicio de enlaces en la banda Ka, usando una constelación de 288 satélites operacionales en orbitas circulares bajas (LEO). Otro sistema prometedor en esta categoría es el sistema S2COM

Ventajas de la operación en Banda Ka.

Los satélites de comunicación en banda Ka ofrecen varias ventajas sobre los sistemas que operan en bandas de frecuencia baja.

A. Incremento del ancho de banda y de la capacidad de manejo de datos.

La operación en banda Ka, ofrece ancho de banda adicional, así como una mayor capacidad sobre el manejo de datos para aplicaciones tanto en tierra como en el espacio. Cada vez más componentes de radiofrecuencia (RF) operan sobre un ancho de banda específico, el cual puede ser relacionado con un porcentaje de la frecuencia portadora. Construir componentes de radiofrecuencia que operen sobre un rango de frecuencia con un exceso de más del 10% de la frecuencia portadora es difícil y costoso. Las frecuencias de la banda Ka son aproximadamente un factor de 2 veces mayor que las frecuencias que componen a la banda Ku y aproximadamente un factor de 5 veces mayor que las frecuencias para la banda C. Por lo tanto, para amplificadores y otros dispositivos con un rango de operación de alrededor del 10%, la banda Ka ofrece 2000-3000 MHz de ancho de banda de información contra un ancho de banda de 1200-1400 MHz en banda Ku y un ancho de banda de 400-600 MHz en banda C.

ⁱⁱ El sistema VoiceSpan fue retirado en Abril de 1997

ⁱⁱⁱ El Pas-10 fue lanzado en mayo del 2001, sin embargo solo dará servicio en banda C y en banda Ku.

En resumen, la introducción de servicios en banda Ka ofrece una solución a la escasez de espectro que actualmente se ve en las bandas de frecuencias bajas. Nuevos e innovadores servicios fijos y móviles, que requerirán de elevadas velocidades de datos, pueden usar el gran espectro disponible en banda Ka. Televisión de alta definición y aplicaciones multimedia requerirán de un ancho de banda mayor al que actualmente ofrecen los servicios de video, y el uso del espectro asignado para servicios en el espacio en banda Ka es sin lugar a dudas el siguiente paso lógico en la evolución de estos sistemas de comunicación.

B. Reducción del tamaño de los componentes.

Otro de los beneficios que se tiene por el uso de frecuencias elevadas en la banda Ka es la reducción del tamaño de los componentes pasivos de radiofrecuencia. Las longitudes de onda pequeñas de la banda Ka permiten el uso de antenas pequeñas, filtros y estructuras de guías de ondas que alcanzan desempeños comparables con los componentes para banda C y banda Ku, éstas últimas de mucho mayor tamaño. Las antenas VSAT (*Very Small Aperture Terminal*) para banda Ka, del orden de 0.60 metros, pueden proveer la misma calidad de servicio que las antenas de 1.2 metros para los sistemas de banda Ku y de las antenas de 3.2 metros para los sistemas en banda C. Esta reducción en el tamaño de las antenas resulta ser una promesa de que aumentará el nivel de consumidores, ya que se cree que el tamaño de las antenas de estos sistemas, será un factor en determinar el éxito de los sistemas de telecomunicaciones satelitales para la casa y la oficina.

Las antenas pequeñas para banda Ka alcanzan la misma ganancia que en las antenas grandes para banda C y Ku, ya que la ganancia se incrementa con la frecuencia f ($20\log(f)$), pero esta ventaja es compensada por un incremento idéntico en las pérdidas en el espacio libre. El incremento de las pérdidas en el espacio pueden ser compensadas manteniendo el tamaño de las antenas del satélite, pero la huella satelital de la antena decrece en proporción inversa con respecto a la frecuencia. Por lo tanto, para servir a la misma área de cobertura sobre la superficie de la tierra, las antenas de los satélites y la configuración del alimentador pueden llegar a ser más complejos en banda Ka. Sin embargo, las huellas satelitales pequeñas pueden, frecuentemente, ser una ventaja.

C. Pequeñas Huellas Satelitales.

Los mismos factores que permiten que el tamaño de los componentes sean pequeños en banda Ka, también permiten proporcionar una alta ganancia en las antenas del satélite con un razonable ajuste del tamaño de las antenas reflectoras, teniendo, en consecuencia, un incremento en la Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (PIRE) y por consiguiente una reducción de las dimensiones del ancho de haz (huella satelital) de las antenas del satélite sobre la superficie de la tierra.

Los sistemas en banda Ka pueden utilizar una arquitectura de multi-haces que permiten el re-uso de frecuencia, ofreciendo una gran eficiencia sobre el uso del espectro de frecuencias asignado. La cobertura del haz para estos sistemas puede ser tan pequeña como el área de una gran metrópoli.

La gran capacidad del PIRE será compensada bajo algunas condiciones debido al gran incremento de deterioros en la propagación en banda Ka con respecto a aquellas que se realizan a frecuencias más bajas. En el caso de atenuación por lluvia, el nivel de deterioro para una trayectoria dada y el porcentaje de tiempo de esta, incrementa aproximadamente al cuadrado de la frecuencia para el rango de frecuencias comprendido entre 10-30 GHz⁵.

Requerimientos para el diseño de sistemas.

Son tres los intereses generales relacionados con la propagación, mismos que son considerados para el diseño de un enlace de comunicación⁶:

1. *Indisponibilidad del enlace*, relacionado a los intervalos de tiempo cuando insuficiente potencia de la señal en el receptor no puede soportar la comunicación.
2. *Degradación del Desempeño*, relacionado al intervalo cuando la señal es detectable pero, la calidad del servicio está por debajo de un nivel de desempeño especificado.
3. *Interferencia de señal no deseada* de otros sistemas que comparten la misma banda o por interferencia de polarización cruzada (ínter sistema o intra sistema) causada por despolarización en la trayectoria. lo que causa deterioros en el desempeño y en la disponibilidad.

Información detallada de los elementos que generan deterioros en la señal, como son el promedio de duración de estos en un nivel específico o la velocidad del cambio de un nivel de deterioro, pueden requerirse, especialmente en el diseño de sistemas adaptados para disminuir el efecto de estos deterioros sobre la señal, así como también en el diseño de las terminales de usuario y en la evaluación de los métodos de compartición de recursos en el satélite.

La importancia de un elemento de degradación dado, depende de los parámetros de un sistema. Por ejemplo: la frecuencia de operación (la cual influye sobre el impacto de la atenuación por lluvia); detalles de configuración, como el plan de re-uso de frecuencias por doble polarización, (el cual establece la importancia de la despolarización sobre la trayectoria como un elemento de deterioro); la geometría sobre la trayectoria de propagación, como es el ángulo de elevación (el cual determina la relativa importancia de los desvanecimientos por centelleo).

Información para el diseño de un sistema satelital.

Los efectos de la atmósfera terrestre sobre los enlaces de comunicación por satélite son una continua preocupación en el diseño y desempeño de los sistemas de comunicación en el espacio. Los factores de propagación que más afectan los enlaces tierra-espacio en la banda Ka son: atenuación por gases; incremento de ruido; atenuación causada por hidrometeoros (lluvia, nieve, granizo, etc); despolarización y variaciones rápidas en el nivel de la señal (centelleo). Estos factores actúan solos o combinados sobre la trayectoria de una señal, causando una degradación en la calidad de las transmisiones analógicas e incrementando el *bit error rate* (BER) en las comunicaciones digitales.

A continuación se mencionan algunos elementos de deterioro en términos de su correspondiente parámetro de sistema que determina el desempeño de estos.

A. Nivel de la señal de recepción.

Para la mayoría de los enlaces de transmisión, el factor más importante en un enlace es el nivel de recepción de la señal ya que determina el desempeño logrado, la disponibilidad del enlace y la resistencia a las interferencias.

B. Aislamiento por Polarización cruzada.

Muchos sistemas de comunicación satelital usan transmisiones con polarización doble ortogonal, esto con el fin de conseguir re-uso de frecuencias y para incrementar el aislamiento entre haces adjuntos en zonas de multi-haces o entre satélites colocados muy cerca uno del otro que estén usando las mismas frecuencias. Las configuraciones de doble polarización son más susceptibles a la despolarización de la señal debido a hidrometeoros.

C. Efectos Refractivos.

Los mecanismos refractivos pueden también causar otras degradaciones al satélite de comunicación. En trayectorias con un ángulo de elevación bajo, puede ser necesario la corrección a cambios de trayectoria debido a efectos refractivos en la tropósfera. Cambios en la trayectoria causan que el satélite parezca estar más arriba al horizonte que su posición verdadera. En trayectorias con un ángulo de elevación abajo de 10 grados, el error del ángulo de elevación puede ser de varias décimas de grado, por lo que es necesario una compensación antes de intentar detectar una señal del satélite. El centelleo refractivo puede también causar dificultades para el auto-apuntamiento de las antenas, ya que si la tasa de fluctuación de la señal excede el inverso del tiempo constante del sistemas de rastreo, el sistema estará inhabilitado a concluir la búsqueda de un pico de señal de nivel estable.

D. Efectos de Interferencia.

La interferencia entre los sistemas de telecomunicaciones usando las mismas frecuencias, puede ocurrir a través de varios modos de propagación que involucran tanto condiciones de cielo despejado como la presencia de precipitación, y pueden ocurrir entre satélites, entre estaciones terrenas o entre el satélite y la estación terrena. Como los satélites pueden usar la misma banda de frecuencias, estos son posicionados con una separación angular de 2 grados sobre la órbita geoestacionaria, además el nivel del lóbulo lateral de la antena de la estación terrena y el PIRE de trasmisión son restringidos para limitar el potencial de interferencia entre estos. Varios mecanismos de interferencia a cielo despejado (difracción, dispersión en la tropósfera, etc) determinan los niveles de interferencia de una señal de larga duración. Y algunos efectos llamados anómalos (reflexión y refracción causado por las capas elevadas, propagación con multi-trayectorias, dispersión por precipitación) ocurren para porcentajes de tiempo pequeños y determinan los niveles de interferencia de una señal de corta duración.

A continuación se hace un informe de los sistemas en la banda Ka más representativos.

Sistema Hughes Spaceway⁷

Para el 2002, Spaceway proveerá de satélites de comunicación con ancho de banda sobre demanda de alta velocidad, con el fin de proveer alta velocidad de acceso a Internet, para compartir *intranets*, para redes privadas virtuales y para una gran velocidad de descarga de datos.

Usando un sistema de satélites con despliegue global, en conjunción con una infraestructura basada en tierra, los usuarios transmitirán y recibirán video, audio, multimedia y otros datos digitales cientos de veces más rápido que sobre las líneas telefónicas convencionales. En el enlace de subida se tendrán velocidades entre 16 Kbps y 16 Mbps. El acceso al sistema será sencillo, casi instantáneo y a un bajo costo, además incluirá terminales fácilmente instalables (antenas del orden de 66 cm). El sistema operará en la banda Ka del espectro de radio frecuencia.

El sistema Spaceway consistirá de sistemas satelitales regionales interconectados, los cuales proveerán de servicio a toda la población alrededor del mundo. El primer sistema regional (Norte América), empezará a ofrecer servicios en el 2002.

La constelación inicial de Norte América consistirá de 2 satélites geoestacionarios HS-702 construidos por *Boeing Satellite Systems*. El sistema empleará tarjetas de procesamiento digital, paquetes de conmutación y una tecnología de haces que podrán ofrecer servicios de comunicación punto a punto, el cual será directo sin la necesidad de pasar a través de un *Hub*.

Las ranuras sobre la órbita geoestacionaria asignadas para Norte América son: 101° Oeste y 99° Oeste; mientras que las ranuras internacionales asignadas son: 49° Oeste, 25° Este, 54° Este, 101° Este, 101° Este, 111° Este y 164° Este.

En el sistema Spaceway, los enlaces de subida soportarán aplicaciones que requieren ancho de banda de 16 Mbps.

La tabla 2 es una tabla comparativa de lo que se tendrá con el sistema Spaceway.

Aplicación	Contenido de información	Línea telefónica 28.8 Kbps	Spaceway 384 Kbps	Spaceway 1.5 Mbps
Foto digitalizada	1 Megabit	34 seg	2.6 seg	0.7 seg
CAD/CAM	2 Megabits	70 seg.	5.2 seg.	1.4 seg.
Librería Digital	Washington Post Sunday Edition	90 min.	41.6 seg.	10.4 seg.

Tabla 2. Tabla comparativa del sistema *Spaceway*

Sistema Teledesic.⁸

Por medio de un amplio y cooperativo esfuerzo, Teledesic hará llegar a aquellas partes del mundo que no pueden ser comunicados de una manera económica a través de medios terrestres, acceso a servicios de telecomunicaciones semejantes a los provistos a través de fibras ópticas.

Hoy en día, la avanzada infraestructura de telecomunicaciones está limitada a las áreas urbanas desarrolladas del mundo. Esto deja a la mayoría de la población mundial sin acceso, ni siquiera, a los servicios de telecomunicaciones básicos. Aún aquellas áreas con servicio telefónico básico, obtienen acceso por medio de una tecnología de hace 100 años - redes analógicas de cobre - que en muchos casos no serán mejoradas para soportar servicios digitales de banda ancha.

Teledesic está construyendo un "Internet-en-el-Cielo" con cobertura mundial, de banda ancha. Usando una constelación de satélites de órbita baja, Teledesic y sus socios crearán la primera red del mundo que brindará acceso económico a servicios de telecomunicaciones, semejantes a los provistos a través de fibras ópticas, los cuales incluyen acceso de banda ancha al Internet, videoconferencias, comunicaciones de voz de alta calidad y otras necesidades de transmisión digital de información. A partir del primer día de servicio, Teledesic habilitará el acceso a telecomunicaciones de banda ancha a empresas, escuelas e individuos en todo el mundo.

Los principales inversionistas de Teledesic son: el presidente del consejo directivo de Microsoft, Bill Gates, Motorola, el Príncipe de Arabia Saudita Alwaleed Bin Talal, Abu Dhabi Investment Company y la compañía Boeing. Las compañías Boeing y Matra Marconi Space completan el equipo industrial de compañías fundadoras de Teledesic. El servicio está programado para comenzar operaciones en el año 2005. Fundada en 1990, Teledesic es una compañía privada con sede corporativa en Kirkland, Washington, un suburbio de la ciudad de Seattle.

Teledesic ha recibido de igual manera el apoyo del mundo desarrollado y de los países en vía de desarrollo, resultando en designaciones internacionales y nacionales de servicios por satélites en las frecuencias que la Red de Teledesic necesita para operar. En marzo de 1997, la Comisión Federal de Telecomunicaciones de los Estados Unidos le otorgó una licencia a Teledesic para construir, lanzar y operar la Red de Teledesic. Teledesic eliminó su último obstáculo reglamentario significativo cuando en 1997 la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Comunicaciones finalizó la designación del espectro internacional radioeléctrico para ser usado por los servicios fijos por satélites no geoestacionarios como los que serán provistos por Teledesic.

La Red de Teledesic

Las intenciones de Teledesic no son las de comercializar los servicios directamente a los usuarios finales. Más bien, proveerá una red abierta para la entrega de tales servicios por parte de terceros. La Red de Teledesic habilitará a los proveedores de servicios en los países a ampliar sus redes, desde el punto de vista geográfico como también en los tipos de servicios que pueden ser ofrecidos. Las estaciones de acceso situadas en la Tierra le permitirán a los proveedores de servicios ofrecer enlaces transparentes a otras redes alámbricas e inalámbricas, tales como el Internet.

La Red de Teledesic constará de 288 satélites operacionales, divididos en 12 planos, cada uno de los cuales contará con 24 satélites. Para lograr un uso

eficiente del espectro de radiofrecuencias, se atribuirán las frecuencias de manera dinámica, volviendo a utilizarlas muchas veces dentro de la zona de un haz de cada satélite. Dentro de cualquier área circular con un radio de 100 Km, la Red de Teledesic podrá soportar más de 500 megabits por segundo (Mbps) de datos hacia y desde los terminales de los usuarios. La Red de Teledesic soportará ancho de Banda por Demanda, haciendo que un usuario solicite y libere capacidad según sea necesario. Esto permitirá a los usuarios pagar exclusivamente por la capacidad que en realidad usan, logrando al mismo tiempo que la Red pueda soportar una cantidad mucho mayor de usuarios.

Teledesic operará en una porción de la banda Ka de alta frecuencia (de 28,6 a 29,1 GHz en el enlace ascendente, y de 18,8 a 19,3 GHz en el enlace descendente). La baja órbita de la Red de Teledesic elimina la demora de la señal que sucede en el caso de las comunicaciones por medio de satélites geoestacionarios tradicionales y permite el uso de terminales y antenas pequeñas de baja potencia. Las terminales, del tamaño de una computadora portátil, serán instaladas en el techo y se conectarán a una red de computadoras o a una computadora personal ubicada dentro del edificio.

La Red de Teledesic está diseñada para soportar millones de usuarios simultáneos. La mayoría de los usuarios contará con conexiones bidireccionales que proporcionan un máximo de 64 Mbps en el enlace descendente y un máximo de 2 Mbps en el enlace ascendente. Las terminales de banda ancha ofrecerán 64 Mbps de capacidad bidireccional. Esto representa velocidades de acceso de hasta 2.000 veces superiores a los módems analógicos estándares de la actualidad. Por ejemplo, la transmisión de un grupo de radiografías puede demorar cuatro horas utilizando alguno de los módems estándares de la actualidad. Las mismas imágenes podrán enviarse por medio de la Red de Teledesic en siete segundos.

Compatibilidad transparente con redes terrestres

Sin conocer con toda seguridad todas las aplicaciones y protocolos de datos que una red de banda ancha tendrá que soportar en el Siglo 21, es razonable asumir que esas aplicaciones serán desarrolladas en las áreas urbanas avanzadas del mundo desarrollado, donde las fibras ópticas determinan la norma. Los sistemas de satélites ofrecen la capacidad de proveer acceso conmutado de banda ancha, independientemente de la ubicación física, extendiendo el alcance de las redes y aplicaciones a cualquier lugar del mundo. Pero para asegurar una compatibilidad transparente con esas redes se debe crear un sistema de satélites con las mismas características de redes de fibra óptica: canales de banda ancha, bajas tasas de errores y poco retardo.

Existen dos tipos generales de sistemas de satélites: los de órbita de satélite geoestacionario (GEO) y satélite no geoestacionario, principalmente de órbita terrestre baja (LEO). Los satélites geoestacionarios giran a una altitud de 36,000 kilómetros (Km) sobre el ecuador, siendo la única órbita que permite que el satélite mantenga una posición fija con relación a la Tierra. A esta altura, las comunicaciones a través de un GEO mantienen un mínimo de tiempo de transmisión - un retardo de extremo a extremo - de por lo menos medio segundo.

Esto significa que los satélites geoestacionarios nunca podrán proveer demoras similares a las fibras ópticas.

Este retraso de los satélites geoestacionarios es la fuente de la demora fastidiosa en muchas de las llamadas telefónicas intercontinentales, impidiendo que se pueda entender la conversación y que deforma el matiz personal de la voz. Lo que puede ser una incomodidad en una transmisión telefónica, sin embargo, podría ser insostenible para aplicaciones en tiempo real, tales como videoconferencias, como también para muchos protocolos estándares de datos - aún para los protocolos subyacentes del Internet. Por otro lado, los satélites de órbita baja de Teledesic estarán en órbita a una distancia de 1.375 km, o 25 veces más cerca a la Tierra que los satélites geoestacionarios.

Uno de los principios fundamentales de la Internet es la noción de que todas las aplicaciones pasan a ejecutarse en una plataforma común de red; es decir, el concepto de una red abierta basada en normas y protocolos comunes. La idea de redes autónomas separadas o de redes específicas para una aplicación, está desapareciendo. Todas las aplicaciones se ejecutarán en las mismas redes, utilizando los mismos protocolos. En estas redes con conmutación de paquetes, en las cuales voz, vídeo, y datos son solamente paquetes de bits digitalizados, no es factible separar las aplicaciones que pueden tolerar demora de aquellas en las que los retrasos resultan inaceptables. Como resultado de ello, la red debe ser diseñada para la aplicación más exigente. La Red de Teledesic está diseñada para brindar una Calidad de Servicio de extremo a extremo que permite la conexión de redes empresariales en todo el mundo, satisfaciendo las exigencias del Internet del futuro.

Ángulo de elevación

La Red de Teledesic está diseñada de modo que siempre pueda verse un satélite de Teledesic prácticamente en línea recta, desde cualquier lugar de la Tierra. Esto se asegura por medio de un ángulo de elevación de 40 grados o mayor en todo momento y en todos los lugares. El ángulo de elevación de 40° de Teledesic permite a los usuarios colocar terminales en la mayoría de las oficinas, escuelas y hogares con una visión sin obstrucciones del cielo en todas las direcciones. Un ángulo de elevación más bajo aumenta de manera dramática la posibilidad de obstrucción por la cercanía de edificios, árboles o imperfecciones del terreno, impidiendo el servicio. En muchas áreas, un ángulo de elevación bajo puede hacer que cualquier tipo de servicio resulte poco práctico o sencillamente imposible.

Asimismo, las señales a altas frecuencias pueden ser bloqueadas por la lluvia, especialmente cuando se envían a un ángulo de elevación menor. El ángulo de elevación de 40° de Teledesic resulta esencial para cumplir con las metas de la compañía de brindar una alta calidad de servicio con una disponibilidad comparable a aquella de las redes terrestres. También reduce el tamaño y el costo de la terminal del usuario, mejorando al mismo tiempo la facilidad de coordinar el uso de radiofrecuencias con otros sistemas y servicios.

Sistema EuroSkyWay.⁹

El sistema EuroSkyWay será la primer red satelital europea para proporcionar un servicio comunicaciones con un gran ancho de banda a usuarios equipados con simples terminales con antenas pequeñas.

EuroSkyWay ofrecerá ancho de banda por demanda para proveer servicios como, por ejemplo, operaciones de telecomunicaciones, transmisión de señal de TV y además proveerá acceso a Internet.

Con el EuroSkyWay, serán posibles conexiones a Internet de alta velocidad, video conferencias con la oficina e incluso compras a través de enlaces de comunicación que serán 10 veces menos caras que las redes actuales y a velocidades 100 veces mayores. En adición a las aplicaciones fijas, se producirán terminales móviles del EuroSkyWay para su uso en automóviles y aviones.

EuroSkyWay será operacional a partir del 2003, usando una constelación de 5 satélites geoestacionarios que operarán en la banda Ka (20/30 GHz). La red será diseñada, construida y operada por EuroSkyWay una compañía administrada por Alenia Spazio.

Alenia Spazio tiene una gran experiencia con las tecnologías que se usarán en la red EuroSkyWay. Los enlaces de datos en banda Ka y las técnicas de procesamiento a bordo para el EuroSkyWay han sido demostradas desde 1991 en los dos satélites Italsat (los cuales fueron diseñados y construidos por Alenia Spazio). Debido al uso de banda Ka, las terminales terrestre de los usuarios y las antenas son más pequeñas que las tradicionales VSAT para sistemas en banda Ku.

El EuroSkyWay ha obtenido la licencia como operador de multimedia en Italia, además de poseer las suficientes ranuras orbitales para proveer de cobertura sobre los principales mercados europeos.

El primer satélite del EuroSkyWay será lanzado en el 2003, seguido de un segundo lanzamiento un año más tarde. Esos dos satélites darán cobertura a Europa y al Mediterráneo. El área de cobertura subsecuentemente se expandirá a África, a la Europa Oriental y Asia con el lanzamiento de los otros 3 satélites que conforman la red del EuroSkyWay.

Sistema Italsat¹⁰

Los actuales mercados de multimedia son la principal directriz para el desarrollo de nuevas tecnologías satelitales en telecomunicaciones. Servicios como telemedicina, educación a distancia y un rápido acceso a Internet poseen una gran necesidad de interactividad, que puede ser lograda solo por el uso de bandas de frecuencias elevadas.

Esto ha sido la base para la evolución de tecnologías en la banda Ka (20/30 GHz), e Italia, a través de Alenia Spazio, ha sido un pionero en este campo desde los años 80's, produciendo varias tecnologías para los programas European Olympus, OBP y Artemis, pero principalmente para el sistema satelital italiano Italsat.

Italsat es un avanzado programa de telecomunicaciones de la Agencia Espacial Italiana (ASI), el cual se encuentra operando a altas frecuencias (20/30 GHz) usando tecnología digital.

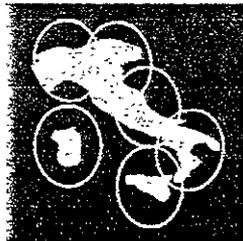
El sistema está integrado a la red telefónica nacional con el propósito de mejorar la flexibilidad de ésta, gracias a las capacidades de conmutación del satélite que hace posible el asignar canales de acuerdo a la demanda.

El sistema consta de 2 satélites: el F1 lanzado en 1991 y que continua operando, el F2 lanzado en 1996 y sus respectivas estaciones terrenas.

	Italsat F1	Italsat F2
Estabilización	Por 3 ejes	Por 3 ejes
Suministro de potencia [W]	1630 (solsticio) 1.152 (eclipse)	1990 (solsticio) 1.409 (eclipse)
Bandas de frecuencia [GHz]	20-30 40-50	20-30 1.5-1.6 12-14
Tiempo estimado de vida	5-8 años	8 años.

Tabla 3 . Características de los satélites Italsat F1 y F2.

Los servicios pueden proveer de enlaces punto a punto y enlaces punto a multipunto. La carga útil de las multi-haces consiste de 6 transpondedores regenerativos con capacidad de 12,000 circuitos telefónicos con una tasa de 147 Mbps y 2 antenas de aproximadamente 2 metros.



Para las telecomunicaciones Nacionales, usa tres transpondedores transparentes para videoconferencia, transmisión de datos, televisión analógica y telefonía.

La carga útil global consiste de tres transpondedores que usan canales de 36 MHz a 20/30 GHz y una antena elíptica para cobertura nacional.



Además, como se puede observar entre las características del satélite Italsat F1 (Tabla 3), este realiza experimentos de propagación sobre Europa en el rango de

frecuencias de 40-50 GHz, necesarias para futuros satélites operacionales que usen esas bandas de frecuencias.

Sistema Astrolink¹¹

Astrolink combinará dos ventajas tecnológicas: los satélites en sí y conmutación de paquetes, esta es una poderosa red que servirá como una ruta de comunicación de gran velocidad a través de los mercados internacionales. Con su propia red de banda ancha, los consumidores de Astrolink serán capaces de obtener todos los beneficios y ventajas de la siguiente generación de servicios de comunicación inalámbrica fija de banda ancha:

Gran penetración en los mercados

Tiempos de mercado más rápidos con nuevos productos y servicios

Aumento de renovaciones

Bajos costo de operación

Mejoras en la productividad

La habilidad para dar servicios superiores a los consumidores

El sistema Astrolink será capaz de proveer:

- Servicios de datos, video y voz que soporten aplicaciones comerciales.
- Conexiones interactivas de gran velocidad.
- Servicios punto a punto, así como también servicios de distribución.

Usando el protocolo de modo de transferencia asíncrona (ATM), la red Astrolink será capaz de ajustar múltiples tipos de tráfico de datos, video y voz. Las habilidades del ATM garantizarán niveles de calidad de servicio, por ello, se están empezando a adoptar extensivamente por la industria de las telecomunicaciones. En suma, el ATM hace posible facturar a los consumidores por el uso de la red si ellos lo desean, pagando sólo el ancho de banda que ellos usan, cuando ellos lo usan, permitiendo a los consumidores de Astrolink lograrán disminuir costos.

El segmento espacial de Astrolink, localizado aproximadamente a 36,000 km., arriba del ecuador de la tierra, consistirá de 9 satélites geoestacionarios distribuidos en medio de 5 posiciones orbitales:

97° Oeste- América

21.5° Oeste- Europa, América y África.

130° Este - Este de Asia y Australia

2° Este - Europa África y Oeste de Asia.

175° Este - Oceanía.

Astrolink inicialmente comenzará a dar servicio con 4 satélites y después se expondrá de acuerdo a la demanda. Operando en la banda Ka (20/30 GHz), cada satélite tendrá una poderosa tarjeta de conmutación con capacidad de más de 6 GHz. Cada satélite también ofrecerá 44 haces, cada uno de los cuales será capaz de entregar servicio a una gran área definida sobre la superficie de la tierra. Juntos, esos haces cubrirán el 92 % del mercado de las telecomunicaciones en el mundo.

Sistema WildBlue¹²

WildBlue es una compañía que planea dar un servicio económico de acceso a Internet de alta velocidad por satélite a los hogares y a las pequeñas oficinas sin tomar en cuenta sus ubicaciones en los Estados Unidos y Canadá para principios del 2002.

WildBlue fue fundada como *KaSTAR Satellite Communications* en Colorado en abril de 1995. En mayo de 1997, la FCC (*Federal Communications Commission*) asignó a WildBlue la licencia para servicios fijos por satélite en la banda Ka en las siguientes posiciones orbitales: longitud 73° Oeste y longitud 109.2° Oeste, ambos en la órbita geoestacionaria. WildBlue también posee la concesión del 90% de la capacidad comercial en banda Ka sobre el satélite TeleSat ANIK F2 en la longitud 111.1° Oeste. La primera fase del sistema de WildBlue, incluirá el despliegue de un satélite para cada una de esas ranuras asignadas, las cuales darán cobertura a todo el norte, centro y sur de América.

WildBlue ha seleccionado Loral Space System como el principal contratista satelital para la construcción del primer satélite, que ha sido llamado WildBlue-1, el cual será un avanzado satélite con haces en banda Ka, los cuales inicialmente, darán cobertura a Norte América.

Los satélites del sistema WildBlue se enlazarán con las PC's para dar acceso a Internet de alta velocidad, por lo que sólo bastará colocar el equipo del WildBlue para que velocidad de la conexión del hogar o de la oficina sea 50 veces más rápida que a través del acceso de un MODEM de 56K. Para dar un acceso a Internet de alta velocidad sin ningún problema en donde quiera que uno viva o trabaje, WildBlue utilizará un gran número de huellas satelitales en lugar de una simple huella satelital de cobertura continental.

Sistema Hot Bird 6¹³

En octubre de 1999, EUTELSAT ordenó a Alcatel Space la construcción del último y más poderoso satélite de la serie HOT BIRD: el HOT BIRD 6. El satélite HOT BIRD 6 tendrá un total de 32 transpondedores activos. Veintiocho de esos transpondedores operarán en la banda Ku. Los restantes cuatro transpondedores operarán en la banda Ka.

Los tres objetivos principales del HOT BIRD 6 son:

- Proveer un respaldo completo de la capacidad del HOT BIRD 5.
- El proveer cuatro canales adicionales (115, 116, 117 y 118) en la banda de 10.70 - 10.95 GHz. Las frecuencias de esos canales son las

correspondientes frecuencias de los canales del HOT BIRD 4 para el enlace de bajada, mientras que el enlace de subida es en la banda de 13.75 – 14.00 GHz. Esos cuatro canales pueden ser usados para dos propósitos: Como un respaldo de la capacidad de los canales del HOT BIRD 4 sobre la cobertura Europea; o como una capacidad extra.

- Proveer cuatro nuevos canales en banda Ka, teniendo para el enlace de subida la banda correspondiente a 29.50 - 30.00 GHz y la banda de 19.70 - 20.20 GHz para el enlace de bajada. Esos canales pueden ser operados tanto en modo transparente o conectados a una unidad *Skyplex*. En modo transparente esos canales ofrecen un ancho de banda de 72 MHz, mientras que cuando se opera con una unidad *Skyplex* el ancho de banda en la bajada es de 33 MHz.

La cobertura de recepción en banda Ka está formada por un grupo de cuatro haces elípticos, cada uno de ellos conectado a uno de los cuatro canales en banda Ka en el enlace de subida. Por otro lado, los cuatro canales son conectados a una cobertura común para el enlace de bajada.

El HOT BIRD 6 es construido por el consorcio internacional Alcatel Space de Francia, quién es el principal contratista e incluye a DASA de Alemania y Alenia Aerospazio de Italia como los principales sub-contratistas. Alcatel Space proveerá varias plataformas de subsistemas, así como también de la integración del satélite, las pruebas y supervisión de las actividades en el sitio de lanzamiento. DASA manufacturará el arreglo solar, además de los subsistemas de control y propulsión. Alenia Aerospazio manufacturará la porción de RF del subsistema TCR y las unidades *sKyplex*. Loral Space System proveerá el repetidor de comunicaciones. El satélite es basado en una estabilización por tres ejes, plataforma: SPACEBUS 3000.

Sistema S2COM¹⁴

S2COM está diseñando la red satelital LEO IP Global NextGen para brindar datos a bajo costo, e-mail, fax, correo de voz, voz y video de bajo ancho de banda a usuarios móviles a lo largo de todo el mundo, especialmente en las economías emergentes. S2COM, utilizando la siguiente generación de tecnología satelital, traerá los beneficios de la tecnología IP de sistemas basados en el espacio a usuarios de todo el planeta a un costo mucho menor que los sistemas actuales u otros sistemas de comunicación satelital planeados y que están por ser lanzados.

Los satélites que conformarán este sistema ofrecerán bajos costos, mejor funcionalidad, mayor desempeño y ancho de banda que cualquier sistema terrestre o celular, especialmente en las zonas donde hay una baja densidad de población.

El mercado principal para este sistema serán los hombres de negocios y usuarios de los países emergentes que necesiten de servicios de e-mail, voz y datos a un bajo costo. También para comunicaciones móviles personales a través de computadoras portátiles. Así como ofrecer una posibilidad de comunicación en comunidades remotas donde no pueden solventar los elevados costos de implementar una infraestructura de comunicación. Con ello las expectativas que se

tienen para el sistema prevén una captación de 1 billón de usuarios en todo el mundo.

El sistema S2COM ha provisto el uso de la banda Ka y de la banda V. La capacidad para los enlaces de subida y de bajada por cada satélite será de aproximadamente 2 Gbps, mientras que los enlaces entre satélites serán de 6 a 10 Gbps.

El sistema S2COM ofrecerá los siguientes servicios globales:

1. Mensajes de texto *e-chat* y *e-mail* de cualquier lugar del planeta a cualquier otro punto de este.
2. Voz sobre IP
3. Servicios remotos de datos IP portátiles.
4. Video sobre IP, usando avanzados algoritmos para un ancho de banda bajo.
5. Una mayor definición del GPS.
6. Comunicaciones portátiles a través de *Palmtop*.

Por lo tanto las ventajas de este sistema son:

- I. Uso del protocolo de red IPv6 para datos, voz, video, e-mail y fax.
- II. Conexiones idénticas a las de fibra óptica en términos de velocidad y corrección de errores.
- III. Inalteración del sistema por las barreras geográficas y por problemas en la infraestructura de instalaciones eléctricas
- IV. Inalteración por la mayoría de los desastres naturales.
- V. Reducción de los costos de operación

Sistema ANIK F2

El único rol para los satélites de comunicación que están emergiendo es el extender el alcance del Internet a áreas sin este servicio y a áreas que ya cuentan con el acceso a Internet pero a través de redes terrestres. En este sentido, el sistema ANIK F2 en Banda Ka ofrecerá conexiones digitales de alta velocidad, en las dos direcciones (*uplink* y *downlink*) a usuarios a lo largo de Norte América. El sistema Anik F2 proveerá servicios a un gran número de usuarios con un bajo costo en las terminales pequeñas así como también bajos de conexión.

Siguiendo los avances tecnológicos por un lado y la demanda pública por accesos rápidos y de bajo costo a información multimedia por otro lado, los proveedores de servicio de telecomunicaciones, incluyendo las compañías de telefonía, cable, y de satélites están haciendo esfuerzos por ayudar a crear el camino para la construcción de la súper carretera de la información. La última meta de esta revolución de la información es el asegurar que todo el mundo tendrá acceso de alta velocidad a Internet, en cualquier tiempo, en cualquier lugar, a costos razonables. Con ese fin, los satélites están singularmente calificados para

asegurar acceso universal a los hogares, negocios, clínicas, centros comunitarios, librerías y escuelas en áreas donde los costos de redes terrestres digitales de banda ancha resultan muy elevados.

Se planea lanzar el Anik F2 a finales del año 2002 en la posición 111.1° latitud oeste de la órbita geoestacionaria. Este satélite contará con un equipo capaz de trabajar con las bandas, C, Ku y Ka. Y su principal función será el de proporcionar acceso a Internet y servicios multimedia, con una gran calidad de servicio, así como una conexión de alta velocidad.

Sistema Celestri/Millennium¹⁵

Motorola originalmente registro un sistema al cuál llamo Millennium, con la ayuda de un subsidio de parte de Comm, Inc. Este sistema fue diseñado para servir a los Estados Unidos, Centro y Sur América por medio de cuatro satélites geoestacionarios. Posteriormente Motorola, registró un nuevo sistema conocido como M-Star, el cual operaría arriba de la banda Ka y emplearía 72 satélites de órbita baja. Este nuevo sistema, podría usar enlaces de subida en la banda comprendida entre los 47.2 GHz a 50.2 GHz, y enlaces de bajada en la banda comprendida de 37.5 GHz a 40.5 GHz.

Como un tercer proyecto, Motorola ha propuesto un sistema, el cual ha sido conocido como Celestri, que representa una combinación de los dos anteriores proyectos. El sistema Celestri empleará 63 satélites de órbita baja (LEO), así como también 4 satélites geoestacionarios.

La carga útil de los 63 satélites de órbita baja estará conformada por transpondedores para banda Ka, así como también, para banda V. El sistema Celestri está diseñado para ofrecer a su subscriptores acceso con una tasa de transmisión elevada (de 64 Kbps. a 55 Mbps). Este sistemas es visto como el gran competidor del sistema Teledesic. La tabla 4 muestra un resumen de los elementos que conforman al sistema Celestri.

El sistema Celestri estará conformado por 9 satélites de órbita baja igualmente espaciados en cada uno de los siete planos orbitales inclinados a 48° del Ecuador. Con esta arquitectura, un satélite es visible arriba de los 16° de elevación el 100 % del tiempo en todas las latitudes por arriba de los 60°. Cada satélite tendrá 432 haces para los enlaces de bajada y 260 haces para los enlaces de subida, ambos en banda Ka. Este gran número de haces es gracias al re-uso de frecuencias. Los enlaces entre satélites serán ópticos y dirigidos mecánicamente, lo que permitirá conexiones con los 6 satélites más cercanos. Cada satélite tendrá la capacidad de soportar 1.83 Gbps. Se ha contemplado que el sistema ofrecerá para los enlaces de subida, tasas de 2.048 Mbps, 51.84 Mbps y 155.52 Mbps, mientras que en los enlaces de bajada se tendrán tasas de 16.384 Mbps, 51.84 Mbps y 155.52 Mbps, usando canales asignados por demanda.

Elemento	Celestri Multimedia LEO	Celestri GEO (Millennium)	Celestri Trunking LEO (M-Star)
Área de Servicio	Global	Regional	Global
Servicios Primarios	Servicios de banda ancha fijos para consumidores en el rango de grandes compañías a hogares.	Distribución Multicast para compañías y hogares	Servicios de banda ancha fijos para líneas principales, de respaldo y accesos de alta velocidad para líneas privadas.
Frecuencias	18.8-19.3, 19.7-20.2 GHz. 28.6-29.1, 29.5-30.0 GHz.	19.7-20.2 GHz. 29.5-30.0 GHz.	37.5-40.5 GHz. 47.3-50.2 GHz.
Constelación	63 Satélites a 1400 Km de altitud, en siete planos orbitales.	4 satélites Geoestacionarios a 75° Oeste, 77° Oeste, 87° Oeste y 91° Oeste.	Serán incorporados en los 63 satélites LEO's del sistema Celestri.

Tabla 4. Elementos que forman al sistema *Celestri*

Cyberstar¹⁵

En contraste con los sistemas Celestri y Teledesic, el sistema Ciberstar propuesto por Loral representa un sistema de bajo costo y menos arriesgado, dirigido hacia el mismo mercado. Loral propone lanzar tres satélites geoestacionarios para dar cobertura a los grandes centros de población en el mundo, para lo cual se le han asignado las siguientes ranuras para la órbita geoestacionaria: 28° este, 105.5° este y 115° Oeste. Loral originalmente propuso que los satélites emplearan 27 haces interconectados por un procesador a bordo, sin embargo, estos planes podrían haber cambiado y ahora se cree que los satélites contarán con más de 27 haces operando a gran potencia. La capacidad total de esos satélites se espera que sea del orden de los 9 Gbps.

A pesar de que Loral ha puesto un gran interés en el diseño de este sistema, puede que se retase debido a que ha adquirido compromisos con algunas compañías (Orion y AT&T) para el diseño y construcción de satélites.

Morning Star¹⁵

La compañía Satelital Morning Star de Washington, D.C., ha propuesto un sistema de cuatro satélites geoestacionarios diseñados para dar servicio a Norte América, Europa y Asia. El sistema Morning Star ocupará las ranuras orbitales 147° oeste, 62° oeste, 30° este y 107.5° este.

Este sistema ha propuesto usar satélites híbridos en banda Ku y Ka. Se ha propuesto que cada satélite debe de emplear arriba de 10 haces receptores operando a 30 GHz y combinar su tráfico dentro de un simple haz de 20 GHz a la entrada de la estación terrena. Esta estación a su vez debe de enviar una señal de 30 GHz para el enlace de subida, la cual debe ser separada y transmitida por medio de haces a 12 GHz (banda Ku).

El sistema Morning Star emplea simples transpondedores sin un procesador a bordo. Esto, junto con la ausencia de reuso de frecuencia, limita su capacidad del sistema a 0.7 Gbps.

Referencias.

1. Davarian "Ka band propagation research using ACTS". *Satellite Commun.* Vol. 14, pp. 267-282, 1996.
2. R. Bauer. "Ka band propagation Measurements: an Opportunity with the Advanced Communications Technology Satellite". *IEEE Proc.* Vol. 85, pp. 853-862, 1997.
3. L. J. Hipólito Jr. "Radiowave Propagation in Satellite Communications". New York: Van Nostrand, 1986.
4. Federal Communications Comisión, SPB-20, DA 95-1689, released July 28, 1995.
5. D C. Cox and H. W. Arnold, "Results from the 19 and 28 GHz COMSTAR Satellite propagation experiments at Crawford Hill", *Proc. IEEE*, Vol. 70, pp. 458-488, 1992.
6. D. V. Rogers, L.J. Ippolito, Jr and F. Davarian, "System requirements for ka-band Earth-Satellite propagation Data", *Proc. IEEE*, Vol. 85, pp. 810-820, 1997.
7. Características del sistema Spaceway. www.spaceway.com.
8. Características del sistema Teledesic. www.teledesic.com
9. Características del sistema Euroskyway. www.alespazio.it/program/euroskyway
10. Características del sistema Italsat. www.alespazio.it/program/italsat
11. Características del sistema Astrolink. www.astrolink.com
12. Características del sistema Wildblue. www.wildblue.com
13. Características del sistema Eutelsat. www.eutelsat.com
14. Características del sistema S2com. www.s2com.com
15. John V. Evans "Proposed US Global Satellite Systems Operating at Ka band" *Com. IEEE* pp 525-535.

Capítulo 3.

Estaciones Terrenas para Banda Ka.

Características generales de una estación Terrena

Una estación terrena es un equipo que cumple con las características necesarias para establecer un enlace de comunicaciones con un satélite. Cuenta, entre otros sistemas, con una antena o un conjunto de equipos con antenas, que pueden tener un extremo de entrada y salida de señales de comunicación en banda base o en frecuencia intermedia y otro extremo de transmisión y de recepción desde o hacia un satélite. En cada una se realiza una parte importante del proceso de dichas señales para hacer posible y eficiente su transmisión, así como el proceso inverso para convertir las radiaciones recibidas en una reproducción fiel en cuanto a la forma que tenían antes de que fueran procesadas y transmitidas por otra u otras estaciones terrenas. Algunos tipos de estaciones terrenas solo tienen la capacidad para transmitir o recibir señales y pueden ser el punto de origen o el punto destino de estas. Las estaciones terrenas pueden ser fijas o móviles. Siendo clasificados como móviles aquellas que se encuentran en movimiento dentro de un vehículo en la tierra, en el mar o en el aire así como las estaciones portátiles personales.

Una estación terrena de gran capacidad se compone generalmente de un sistema de antena, transmisores, receptores, moduladores, demoduladores, procesadores en banda base, interfaces con redes terrenales, sistema de energía, sistemas de seguimiento, control y comunicación del servicio. Un diagrama funcional de una estación terrena se presenta en la figura 1.

Dependiendo de la aplicación en que se está utilizando una estación terrena puede tener o no tener todos los sistemas listados anteriormente. Por ejemplo, una estación dedicada a la recepción de TV o una estación dedicada a voz y datos

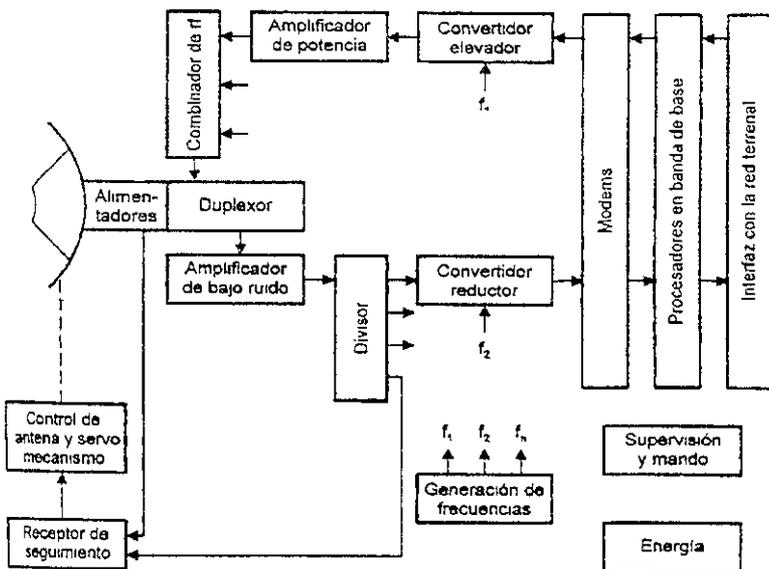
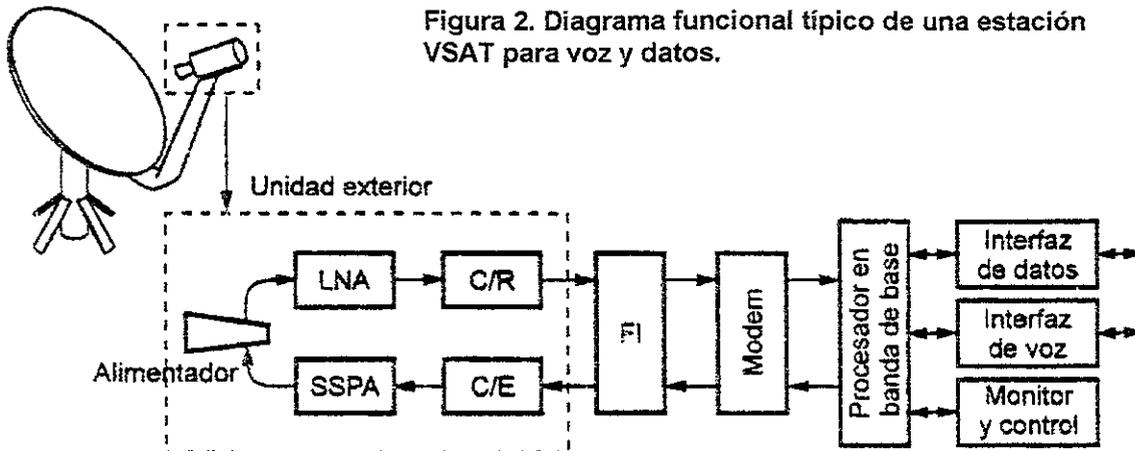


Figura 1. Diagrama funcional de una estación terrena de gran capacidad

contiene solamente los sistemas necesarios para recibir la señal, convertirla a una frecuencia intermedia, procesarla y acondicionarla para entregarla finalmente al

equipo terminal; de igual forma, solo contendrá los elementos necesarios para la transmisión de la información.



LNA = Amplificador de bajo ruido, SSPA = amplificador de potencia de estado sólido, C/R = convertidor reductor, C/E = convertidor elevador.

Las primeras estaciones terrenas eran de proporciones asombrosas comparadas con las actuales; por ejemplo, las del sistema INTELSAT que fueron instaladas con una antena del tipo A que tenían un reflector de 33 metros de diámetro, en las actuales se utilizan reflectores entre 1.8 metros y 2.4 metros en las redes conocidas como VSAT (*Very Small Aperture Terminal*, por sus siglas en inglés), que trabajan en Banda Ku con capacidad de transmisión y recepción de uno o varios canales. También cabe mencionar que las antenas que se utilizan para la recepción directa de televisión pueden tener un reflector de 0.5 metros de diámetro si están ubicadas en zonas favorables de la zona de cobertura de los satélites; sin embargo el tamaño de dichos reflectores no varía significativamente en zonas menos favorables. Además, el equipo que acompaña a dichas antenas y que complementan la estación terrena cumpliendo con la parte de procesamiento y acondicionamiento de las señales transmitidas o recibidas es en realidad muy pequeño. Las antenas con reflectores grandes son utilizadas en estaciones terrenas que tiene gran capacidad de tráfico en sistemas de satélites geoestacionarios de cobertura global.

Evolución de las estaciones terrenas para Banda Ka.

Actualmente la comunidad involucrada en las Telecomunicaciones está poniendo un gran esfuerzo en satisfacer la gran demanda de servicios de banda ancha y de tipo multimedia que cuenten con coberturas globales. A la par de esto se está poniendo un esfuerzo significativo en el desarrollo de la infraestructura necesaria básica para cumplir con este objetivo.

En este contexto los satélites son un factor clave para el despliegue, sobre bases globales, de las futuras redes de banda ancha con aplicaciones multimedia y del desarrollo de otras áreas relacionadas al campo de las telecomunicaciones como son los fabricantes, los prestadores de servicios, operadores de redes, etc.

En este panorama, los diversos sistemas satelitales multimedia anunciados prevén la utilización de las frecuencias de la banda Ka con sistemas de antenas mustiasas, asignación de recursos satelitales en demanda, enlaces inter-satelitales, regeneración a bordo de la señal en banda base y conmutación (en la mayoría de los casos basada en técnicas *ATM asynchronous transfer mode*). Estos factores son claves para permitir el uso de terminales de bajo costo y de tamaño pequeño, el uso eficiente de los recursos del satélite y la compatibilidad con diferentes tipos de redes y servicios. En otras palabras, esto permite al satélite proveer un amplio rango de servicios, desde la telefonía típica hasta servicios multimedia sobre bases globales.

Cada vez hay estaciones terrenas más pequeñas, más sofisticadas y más accesibles como parte de sistemas que proveen accesos a servicios y aplicaciones interactivas para una población de usuarios en constante crecimiento. Durante la última década, han sido realizados avances significativos en Europa y Norteamérica en cuanto a la investigación, desarrollo y evaluación de sistemas en Banda Ka usando satélites experimentales como el OLYMPUS (Agencia Espacial Europea - ESA), Kopernikus (ITALSAT) y ACTS (*Advanced Communications Technology Satellite*). Varios sistemas comerciales de gran escala que consideran el uso de la Banda Ka y satélites híbridos han sido propuestos, desarrollados y han comenzado a emerger en el mercado actual.

Hay estaciones experimentales que son tan pequeñas como un portafolio con antenas de 35 a 50 cm y han sido utilizadas para transmitir y recibir arriba de los 2 Mbps utilizando el ACTS.

El trabajo relacionado con propósitos comerciales en la Banda Ka lleva más de dos décadas y comenzó con algunos fabricantes que empezaron ofreciendo sistemas de microondas terrestres a 18 y 23 GHz. Con la relativa inmadurez del FET en ese tiempo, estos fueron en un inicio, radios relativamente simples que usaban diodos directamente modulados en sus osciladores sin una amplificación posterior. Mientras los desarrollos en esta área fueron relativamente rápidos, la utilización de la Banda Ka para satélites de comunicación fue concebida recientemente y ha tomado relativa importancia en los últimos años.

Mucho del primer trabajo práctico para propósitos de comunicaciones fue hecho en Japón. Los sistemas de comunicación por satélite que emplean la banda Ka con fines comerciales domésticos fueron implementados en Japón inmediatamente después del lanzamiento del CS-2 en febrero de 1983. Sin embargo, al igual que en Europa y en Norte América más tarde, las dificultades debidas a los problemas de propagación encontrados a 30 GHz, en adición a los problemas con los semiconductores apropiados, dio origen a una cierta pausa en cuanto a la posible utilización de la banda Ka, la cual terminó hasta el lanzamiento del programa satelital OLYMPUS. Entre otras actividades, éste programa estimuló sistemas de estaciones terrenas pioneros como la terminal de portafolio del CRC y más tarde la primera picoterminal desarrollada por *Joanneum Research*, Austria, en cooperación con *MPR Teltech/IMT ComSys*, ahora NORSAT. El trabajo de la Picoterminal inició a finales de 1992 con el programa OLYMPUS en mente, pero después de su desaparición, el diseño de la terminal de bolsillo fue reorientado

para su utilización en el Kopernikus e Italsat. Italia ha impulsado las comunicaciones satelitales domesticas de manera comercial en Banda Ka con el lanzamiento del ITALSAT-F2 en agosto de 1996. Se presenta a continuación una revisión de las estaciones terrenas pequeñas que se han utilizado en diferentes proyectos relacionados con la Banda Ka. Se muestran cuatro perspectivas diferentes en cuanto a la evolución de las terminales multimedia a emplearse en los servicios satelitales en Banda Ka considerando el diseño, el funcionamiento, componentes, tecnología, aplicaciones y servicios potenciales, los elementos de mayor importancia de los sistemas prototipo que han sido evaluados hasta la fecha con multimedia, Internet, control de supervisión y adquisición de datos, así como otras aplicaciones y la futura presentación comercial que tendrán las estaciones. Se muestra además un pequeño ejemplo de una implementación típica para usos comerciales y domésticos. Además, se da una pequeña muestra en forma de tablas de otras estaciones en Banda Ka para mostrar la diversidad de las terminales en términos de tamaño, diseño, desempeño, tecnologías y aplicaciones.

USAT (Ultra Small Aperture Terminal)

El diseño original y las aplicaciones de las USAT (Ultra Small Aperture Terminal, Figura 3) estuvieron limitados por la tecnología existente y permisible de principios de los años 90. Estas USAT utilizaban un reflector pequeño de 35cm de diámetro con un amplificador de estado sólido de 0.25 Watts.¹ Este amplificador fue empaquetado en un dispositivo pequeño para minimizar el tamaño del alimentador de la antena. El objetivo inicial era transmitir a velocidades de 4.8 kbps, sin embargo se llegaron a obtener velocidades de 19.2 kbps. Los

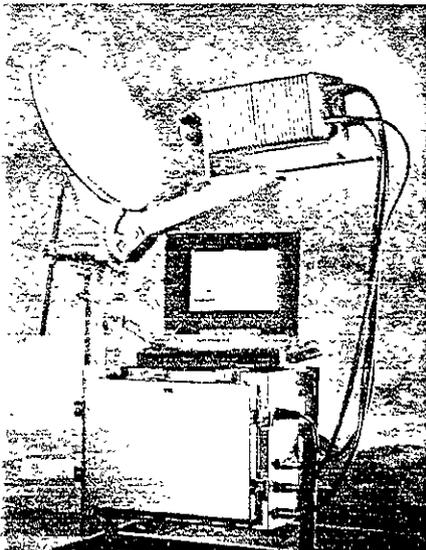


Figura 3. USAT totalmente ensamblada, desarrollada por el Glenn Research Center de la NASA

convertidores de bajo ruido (LNBs) (convertidores de bajada combinados con Amplificadores de bajo ruido) fueron más accesibles que los pequeños amplificadores de bajo ruido en ese entonces; sin embargo, solo pudieron obtener figuras de ruido de 4dB. Los enlaces que se realizaron con estas terminales mantuvieron la potencia y márgenes mínimos para mantener funciones de

monitoreo y adquisición de datos remotos pero no fue considerada para aplicaciones más generales.

USAT de 0.6 metros

Al mismo tiempo, en las aplicaciones conducidas sobre las tradicionales VSAT (*Very Small Aperture Terminal*), se comenzó a manejar la variación de la apertura deseada en las antenas experimentalmente. Típicamente en las aplicaciones como telemedicina, la videoconferencia y aplicaciones relativas a las transacciones e intercambio de datos se utilizaban antenas de 1.2 o 1.4 m de diámetro. Los fabricantes y diseñadores estaban interesados en mantener una gran capacidad y una gran portabilidad de las terminales. Fue por eso que no estuvieron interesados, para las aplicaciones antes mencionadas, en las antenas más pequeñas existentes en esos momentos. En la mayoría de las aplicaciones de la VSAT, como la telemedicina y la videoconferencia, que operan a velocidades de 1.5 y 2 Mbps (T1/E1) se consideran aceptables en calidad para conducir experimentos. Se buscó, entonces el mejorar en tamaño las antenas conservando las ventajas y aplicaciones que se tenían con los estándares de las VSAT. Los requerimientos en velocidades de transmisión, combinados con los nuevos amplificadores de estado sólido para banda Ka, resultaron en el tamaño optimizado de 0.6 m para una antena pequeña. La antena de 0.6 m fue una sugerencia aceptable (en sustitución de la antena de 1.2 m) para lograr las velocidades requeridas de un T1 o un E1. Esta nueva tecnología de los amplificadores de estado sólido para Banda Ka con el nuevo tamaño de la antena sentaron las bases para la fase II del programa USAT del *NASA-Glenn Research Centre*.

La segunda generación de USAT trajo consigo los dos requerimientos mencionados anteriormente. El sistema USAT fase 2 fue diseñado con un reflector de 0.6 m y un amplificador de potencia de 1 o 2 W, robusto, fácilmente transportable y siendo además una terminal altamente versátil para un gran número de aplicaciones. Los avances en la tecnología de estado sólido DFC hicieron a los amplificadores de potencia más robustos sobre la temperatura, mientras, los avances en los LNB's resultaron en figuras de ruido de 2 o 2.5 dB. Estos avances de tecnología que se lograron a finales de los 90, condujeron a convertir las redes de tipo estrella a sistemas Full Dúplex, eliminando la necesidad de contar con un *hub* altamente costoso y utilizado en los primeros sistemas de pequeñas terminales. Los experimentos utilizados rutinariamente en el ACTS y que utilizaban tasa de transmisión de un E1 o un T1, fueron realizados con estas USAT de 0.6m de diámetro. Ya que el sistema no era considerado operacional, los márgenes de dispersión por lluvia podían ser mantenidos algo bajos, aún cuando se realizaran experimentos. Típicamente los márgenes de enlace eran de 6 a 8 dB. Esto producía una adecuada estabilidad en el enlace debido a los eventos en el satélite o en la atmósfera.

Las videoconferencias y las demostraciones multimedia utilizando estas terminales han llegado a ser comunes. Además existen aplicaciones en puerta que consideran la transmisión de datos a velocidades T1 o E1, así como aplicaciones comerciales de transmisión de video o emisión de televisión directa.

Estaciones portátiles del Communication Research Centre

En 1990 se concibió el concepto de la terminal satelital portátil CRC en banda Ka, proporcionando comunicaciones multimedia y redes con la utilización del satélite OLYMPUS. Los cálculos fueron hechos para un enlace con cielo despejado de 256 kbps con una relación $E_b/N_o = 6$ dB usando una terminal de portafolio (*SST Suitcase Satellite Terminal*) que contiene un arreglo planar de microcinta, un SSPA de 1W y un LNA con figura de ruido de 2.6 dB. El comportamiento del arreglo planar resulto ser más bajo que el planeado, sin embargo en 1993 fue mostrado un enlace de voz a 19.2 kbps.

Después de que el programa OLYMPUS quedó fuera de servicio, el programa fue expandido y la SST fue modificada para operar con el ACTS adaptándole un reflector parabólico tipo offset fuera del maletín y usando el SSPA (*Solid State Power Amplifier*) OLYMPUS de 1W (0.5 W a la frecuencia de transmisión para el ACTS) y un LNA de 3 dB de figura de ruido (Figura 4). El aspecto de red tipo Ethernet para la SST fue realizada solamente con un ruteador, una LAN inalámbrica de 2Mbps desde la SST a la terminal de usuario y la computadora interna. La nueva versión de la SST fue utilizada con la antena de haz dirigible del ACTS (*Steerable beam antena*) y con el *hub* de 4.2m del CRC para demostración de videoconferencia en una de las exhibiciones del CRC para la conferencia IMSC de 1995. En octubre de 1995 el haz de más alta ganancia del sector Este del ACTS (ES-4) fue utilizado en AFRL para mostrar una videoconferencia con la SST operando a velocidades de transmisión muy altas sobre diferentes plataformas de computadoras así como en recepción ATM de 45 Mbps. Los márgenes para este enlace se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Margenes de enlace de la SST

Fecha-transpondedor Enlace con cielo despejado	Velocidad de transmisión (Mbps)	Margen (dB)
Junio 1995 – ACTS SBA		
SST a Hub	0.512	1.8
Hub a SST	1.544	10.1
Octubre 1995 – ACTS ES-4		
SST a Hub	2.048	4
Hub a SST	45	10

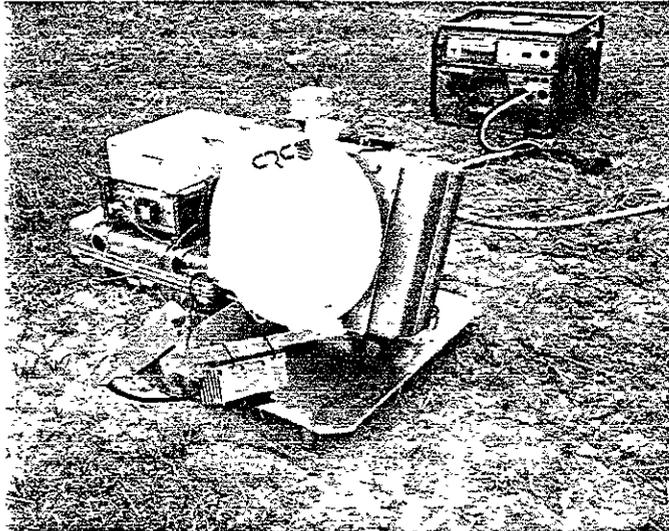
Los márgenes de enlace que se muestran en la tabla 1 fueron calculados con $E_b/N_o=4.4$ dB y con un comportamiento típico de MODEM con $BER = 10^{-9}$.

Una segunda terminal de portafolio fue construida para soportar una demostración de telemedicina de 1.544 Mbps y fue usada para videoconferencia y acceso a Internet en la práctica *USAF Global Yankee 96*. El SSPA fue actualizado a una unidad de 2W. La red fue configurada con una SST en un hospital de campo, la comunicación con doble salto fue llevada a cabo por medio del hub del CRC de 4.2m y el SBA del ACTS hacia otra SST de una red militar. Inmediatamente los expertos pudieron consultar interactivamente vía Internet los detalles relacionados con la condición de los pacientes.

La SST fue utilizada en el ejercicio *USAF Global Apache* en agosto de 1997 para proporcionar un video del campo de batalla en tiempo real desde el campo

de batalla hacia el centro de operaciones. La SST utilizada con un plato de 1.2m, estaba montada sobre un vehículo Hummer .

Figura 4. SST del CRC usada en la campaña USAF Global Yankee 1996



Los resultados de estas operaciones derivaron a finales de los 90's en equipos más eficientes y avanzados, originando la BST (Briefcase Satellite Terminal, Figura 5).

Figura 5. BST del CRC



En 1998 una SST fue utilizada para proporcionar un enlace entre el Directorate Information en AFRL en Rome NY y la base Eglin de la USAF en Florida. El Puerto del MODEM RS 499 de portafolio fue utilizado como interfaz en un multiplexor, un equipo de encriptado, un teléfono táctico, estaciones de trabajo UNIX y un ruteador para una variedad de servicios de datos, voz y video. La BST fue utilizada para evaluar un equipo de antenas Cassegrain, modulación directa QPSK en banda Ka, amplificadores SSPA de 4W y para proporcionar un videoconferencia de 512 kbps.

Durante el mes de julio de 1999, una SST fue utilizada en el alto ártico canadiense como soporte para el proyecto Houghton-Mars con un enlace de 512 kbps para un gran conglomerado de servicios de comunicación científicos, técnicos, médicos y experimentales. A finales de julio de 1999 la BST fue utilizada en modo móvil, usando para ello una Van, un generador muy pequeño y una computadora portátil para evaluar una antena con reflector de plato extendido y un SSPA de 10 W.²

Picoterminal

En el esquema del "Utilization Program 20/30 GHz payload" del satélite OLYMPUS de la Agencia Espacial Europea (ESA), un proyecto llamado CODE (Cooperative OLYMPUS Data Experiment) fue puesto en marcha para desarrollar un sistema avanzado de VSAT para explotar las ventajas de las banda Ka. En 1992, la experimentación fue extendida para empezar con el desarrollo de una terminal portátil que pudiera ser incluida en una red de comunicaciones.

Entre los objetivos de diseño se buscaba que la terminal portátil cupiera en un estuche a bordo de un avión. MPR Teltech (ahora NORSTAT) desarrolló la terminación frontal de RF. Fue seleccionada una antena de 35 cm de alto rendimiento con GTx de 38 dB y GRx de 35.2 dB. La alimentación frontal tiene un convertidor de subida de Banda L (FI) a 29 - 29.5 GHz y uno de bajada de 19.2 - 19.7 GHz o 19.7-19.2 GHz. Se logró un PIRE de 35.6 dBW y una relación G/T de 10.2 dB/K, soportando topologías de estrella y de malla. El diseño del sistema fue hecho de tal forma que la terminal podía operar con el satélite OLYMPUS así como sobre los satélites europeos de 20/30 GHz DFS-KOPERNIKUS, de Deutsche Telekom e ITALSAT.

Las investigaciones realizadas por Joanneum Research, así como los avances relativos al desarrollo de estaciones para Banda Ka fueron mostrados a través de la descripción de la picoterminal (Figura 6) durante la 2ª conferencia de la Utilización de la Banda Ka.³

La antena fue diseñada para que cupiera en un maletín, con un peso menor a 7.5 kg y especificaciones encontradas para ganancia (Tx>38.5 dBi, Rx>35.2 dBi).

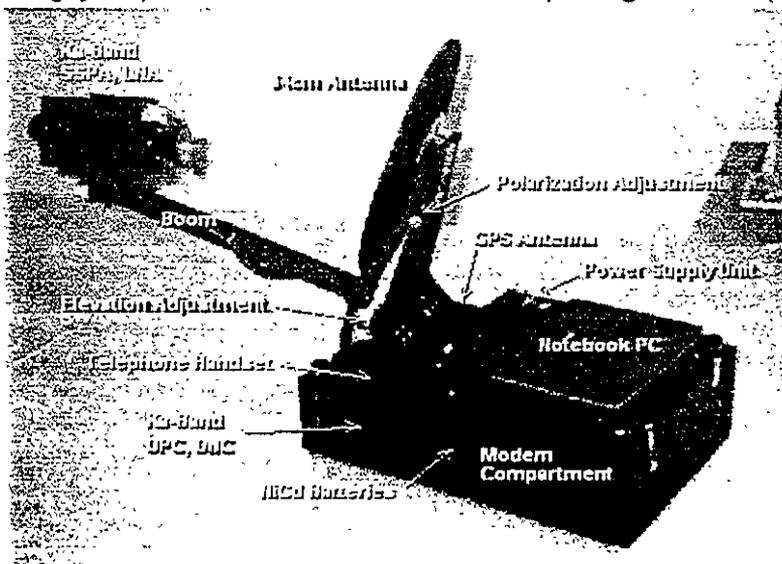


Figura 6. Picoterminal desarrollada por Joanneum Research - Institute for Applied Systems Technology

El diseño mecánico proporciona ajustes finos que permiten apuntar la antena con 0.5 grados en el azimut y en la elevación. La polarización fue determinada rotando la antena completa, manteniendo una rigurosa especificación de polarización cruzada.

Para los enlaces de *inbound*, fue desarrollado un esquema novedoso de transmisión basado en códigos de baja velocidad para esparcir la velocidad de datos de usuario de 4.8 kbps a 128 kbps. Una nueva clase de códigos de bloque no lineales, los también llamados códigos TCH (*Tolminson-Cercas-Hughes*) fueron utilizados. La concatenación con un código de bloque Reed-Solomon proporcionó muy buenos comportamientos en relaciones Señal-Ruido bajas. Un receptor con correlación no coherente fue implementado, el cual proporciono confiabilidad de operación. Un esquema de acceso FDMA de asignación dinámica fue escogido para los enlaces de *inbound*. Un canal de acceso ALOHA permitió solicitar un canal de tráfico o dos canales de tráfico (en el caso del modo de red) desde la estación del hub central. El protocolo de acceso satelital fue diseñado por Telefónica Sistemas de Satélites y SIRE en España.

Para el enlace de *outbound*, fue implementado un esquema de transmisión estándar basado en BPSK con codificación convolucional y decodificación Viterbi y un código exterior Reed Solomon. La estación del hub en Graz, Austria, que fue originalmente construida para el satélite OLYMPUS y después modificada para DFS-KOPERNIKUS, fue utilizada para transmitir la portadora a 128 kbps de la señal portadora de salida con una antena de 2.4 m y un amplificador de potencia de Estado Sólido de 5W. Los cálculos estimados fueron hechos con una disponibilidad de 99.8 %. Un esquema TDM fue adoptado para este enlace.

En términos de aplicaciones de datos, el sistema fue optimizado para soportar el grupo de protocolos TCP/IP. Transferencia de archivos, correo electrónico y accesos a equipos remotos fueron las aplicaciones principales. Un codificador de voz (vocoder) de 4.8 kbps fue utilizado para las comunicaciones por voz. La terminal podía operar en modo de voz o en modo de datos.

La antena, y la terminación frontal de RF⁴ (Amplificador de potencia de Estado Sólido, Amplificador de Bajo ruido, Convertidores de subida y de bajada, alimentador de potencia y una batería de NiCd), el módem, la computadora portátil, y el receptor GPS fueron integrados todos en una robusta caja a bordo hecha de aleación de fibra y carbón. El receptor GPS y un programa de configuración eran usados para alinear el plato fácilmente con el satélite. Se hicieron adaptaciones para la alineación automática del plato. El sistema fue completado en 1998 y exitosamente puesto en marcha con el DFS-KOPERNIKUS con el generoso respaldo de la Deutsche Telekom.

ODUs (Out Door Units) de NORSAT

A pesar de los avances y progresos tan remarcados que ha logrado la industria por medio de diversas programas satelitales en el desarrollo, la experimentación y la demostración relacionados con la tecnología de las estaciones terrenas, no es evidente que una estación terrena verdaderamente económica esté disponible. Nos referimos al tipo de equipo disponible particularmente para las terminales de

usuario localizadas en casas y pequeños negocios opuesto a las grandes estaciones terrenas. Aquéllas terminales están encaminadas a proporcionar servicios digitales interactivos. Las bandas de frecuencias a ser consideradas aquí son mayoritariamente las bandas satelitales de 12/30 GHz y de 20/30 GHz.

En Norteamérica, el éxito de los experimentos a través del ACTS en la banda de 20/30 GHz fomentó propuestas y sistemas satelitales orientados, pero fuera de eso ha habido una relativa escasez de equipo de RF de bajo costo. Una iniciativa que alienta al respecto en el mundo es el sistema ASTRA de 12/30 GHz de Europa que está siendo desarrollado en altos volúmenes, con bajo costo en el mercado para el consumidor de los servicios interactivos planeados. Entre otros, NORSAT está participando en esta actividad con el desarrollo de diversas clases OutDoor Units (ODUs). El objetivo en el desarrollo de estas unidades ha sido el lograr el comportamiento requerido para que sean capaces de conducir ensayos en campos extensos, con un gran número de unidades. Es claro para todos los participantes el esfuerzo sustancial que se necesita para comenzar con el desarrollo y la producción de equipos innovadores y de costo accesible que pudiera estimular la demanda del mercado. NORSAT está envuelto actualmente en el rediseño de las ODU con este objetivo en mente.

Los especialistas en ODU de Banda Ka y Banda Ka/Ku de NORSAT han participado en diversos proyectos con la ESA y recientemente, con ASTRA. El equipo de las ODU desarrollado como parte de esos proyectos se describe a continuación.

- *ODU VSAT de 20/30 GHz*

En 1994, la ESA estimuló las actividades enfocadas al desarrollo de terminales en Banda Ka con terminación frontal en estaciones tipo VSAT; esto, con la finalidad de que la terminación frontal fuera diseñada con una tarjeta de costo adecuado para cada aplicación. Esta ODU fue desarrollada por IMT ComSys, ahora NORSAT,⁵ en cooperación con Grounding Microwave Technology and Precision Antennas (UK). La parte externa de la ODU utiliza conversión de bloque entre 29.5-30GHz/19.7-20.2GHz y el estándar "low" Banda L (950-1450MHz), y puede, por lo tanto, tener una interfaz con los módems estándar QPSK a 70 o 140 MHz disponibles comercialmente por medio de la Unidades Convertidoras en Banda L (LCU), proporcionando un ajuste fino de frecuencias. El PIRE de la estación (53dBW), la G/T (24 dB/K), la pureza espectral y el ancho de banda instantáneo son bastante altos para permitir la comunicación dúplex con suficiente margen, usando el Kopernikus e Italsat, para velocidades de transmisión en un canal sencillo de 9.6 Kbps a 2 Mbps con el ancho de banda de la recepción restringido solo por la LCU. Los prototipos instalados en 1998 en ESTEC, Holanda y en IAZ en Graz, Austria; se encuentran actualmente en operación.

La tecnología usada en la realización de los circuitos de RF de todas las unidades son en su mayoría componentes discretos y ensamblados sobre tarjetas. La técnica SMT es rutinariamente usada por varios fabricantes de LNBS de banda Ku. NORSAT ha extendido esta técnica incluso en los convertidores de subida de 1-30GHz. En los amplificadores de potencia de estado sólido (SSPA), la

clásica aproximación "chip and wire" es usada sobre sustratos de Aluminio y circuitos integrados de semiconductores. La tarjeta como opción alterna es todavía difícil de realizar, principalmente por los problemas de integración con los semiconductores.

ODUs Residenciales Comerciales.

El precio de las futuras terminales multimedia residenciales en Banda Ka, como las que se muestran en la Tabla 2, será un problema dominante. Mientras los costos de producción serán reducidos por la aplicación de la economía de escala (grandes volúmenes), los requerimientos técnicos serán todavía difíciles de conciliar con la visión actual del precio aceptable (menor a 1000 dólares). Esto llega a ser claro cuando se considera que la topología de transmisión básica de las VSATs todavía se aplicaría, aunque con ligeras modificaciones, y que la potencia de transmisión será de 1-2 W, particularmente desde una antena pequeña de aproximadamente 70 a 95 cm de diámetro, la cual será requerida para instalaciones residenciales prácticas.

Tabla 2. Sistemas multimedia de banda Ka para producción en gran escala propuestos

Sistema	Velocidad de datos Tx (kbps)	Diámetro de antena	G/T (dB/°K)	PIRE máximo (dBW)
ASTRA	144 a 2048	0.6 a 1.2 m	15 – 20	40 a 50
Astrolink	13-384	65 cm	17	47
	2048	75-85 cm	18 – 19	48.3 – 49.3
Cyberstar	16-384	70 cm a 1.5 m	18 – 24	44.6 – 51.2
	1544	1.5 a 3 m	24 – 30	51.2 – 57.3
KaStar-iStar	>= 384	66 cm a 2 m	17 – 26	47.0 – 56.7
Galaxy/Spaceway	16	66 cm	17	Más de 47.0
	1544	Más de 1.8 m	Más de 26	Más de 55.8
Millenium	384/786	Cm	>17	47.6
GE Star	384/1544	75 cm	18	45.3
Euroskyway	160/512	66 cm	18.2	43.7/48.7
	2048	120 cm	23	56.5

NORSAT ha desarrollado una clase de unidades externas (ODUs) derivadas de un diseño básico de terminal como parte de un programa de la ESA para terminales de usuario. Estas, serán usadas para comunicaciones interactivas de datos así como en la recepción de TV en los nuevos satélites de 12/30 GHz, recientemente lanzados y en los futuros satélites con parámetros similares. Las ODU's utilizan un bloque de conversión de la banda S (2.5-3 GHz) en el transmisor y uno de banda L estándar (0.95-2.15 GHz) en el receptor, así como una interfaz con una unidad interna (IDU) con el correspondiente MODEM banda S/L. Su PIRE, su G/T y su pureza espectral son suficientemente altas para permitir la transmisión a velocidades máximas de 144 kbps a 2Mbps, usando los satélites actuales y los propuestos, con margen suficiente y recepción de señales con altas velocidades de transmisión (semejante a 40 Mbps o aún más alta). Tres ODU's con diferentes niveles de potencia y tamaños de antenas han sido diseñados para cubrir los rangos altos de las tasas de transmisión. Estas ODU's satisficieron, en

general, los requerimientos del programa ARCS de ASTRA (Tabla 3). Muchas ODU de este tipo han sido manufacturadas por NORSAT y sometidas a extensas pruebas (Figura 7). Estas pruebas continúan en progreso.

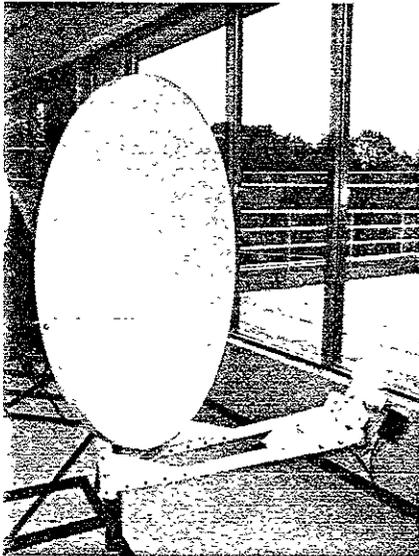


Figura 7. ODU desarrollada por NORSAT

Tabla 3. Especificaciones básicas para las ODU del programa ARCS de ASTRA

Parámetro	ODU 1	ODU 2	ODU 3
Rango de frecuencias Tx	29.5 – 30 GHz	29.5 – 30 GHz	29.5 – 30 GHz
Rango de frecuencias Rx	10.7- 12.75 GHz	10.7- 12.75 GHz	10.7- 12.75 GHz
Polarización Tx	Lineal, V o H, configurada en la instalación		
Polarización Rx	Lineal, V o H, conmutada remotamente desde la IDU		
PIRE nominal	40 dBW	45 dBW	50 dBW
Diámetro máximo de la antena	75 cm	90 cm	120 cm
Min G/T (solamente equipo)	15 dB/°K	15 dB/°K	15 dB/°K
Figura de ruido Rx 1dB max			
Figura de ruido Rx	1 dB max	1 dB max	1 dB max
Ganancia de la antena Tx	44 dBi	46 dBi	48 dBi
Potencia Tx	26 dBm min	29 dBm min	32 dBm min.

Comunicaciones multimedia vía 20/30 GHz.

En el esquema de trabajo del programa ASTP-IV de la ESA, un novedoso sistema de comunicaciones fue desarrollado para soportar interconexiones simultáneas de ISDN y LAN, así como servicios síncronos como video conferencias.

El sistema, llamado Interconexión de Redes Locales por medio de Sistemas Satelitales (*Local Network Interconnection via Satellite Systems*) ha sido ajustado específicamente para optimizar aplicaciones en la parte alta del protocolo TCP/IP. Accesos a Internet de alta velocidad por medio de satélites y novedosas aplicaciones *multicast* pueden ser proporcionados eficientemente. Un esquema de acceso TDMA de asignación dinámica ha sido desarrollado para este sistema,

haciendo que la utilización del ancho de banda disponible sea eficiente. El sistema ha sido puesto en marcha exitosamente para aplicaciones de negocios distribuidos (videoconferencias multipunto, comparación de aplicaciones), así como en pruebas en telemedicina.

En 1999 este sistema de comunicación multimedia fue combinado con una nueva estación de banda Ka construida por NORSAT bajo un contrato con la ESA. Esta estación utiliza una antena de 1.5 m y tiene más potencia de salida que la picoterminal de terminación frontal. Con sus Amplificadores de potencia de estado sólido de 2 W fueron hechos enlaces confiables entre IAS/Graz y ESTEC por medio del DFS-KOPERNIKUS. Video conferencias, lectura de páginas WEB, compartición de programas y aplicaciones y telefonía con ISDN fueron mostradas.

Otras estaciones terrenas.

Nuevas arquitecturas para estaciones terrenas más cercanas a ser comerciales fueron presentadas en la 5ª Conferencia sobre la utilización de la Banda Ka. Dos estaciones prototipo, cada una con una antena de 1m, un SSPA de 5 W y un receptor con una figura de ruido de 3 dB, fueron usadas en el ACTS para demostraciones de telefonía, ISDN, video conferencia, comunicaciones con TCP/IP y de datos con tasas de transmisión de 1.544 Mbps.

El *Communications Research Laboratory* de Japón, ha mostrado comunicaciones multimedia móviles con tasas arriba de 1.544 Mbps usando el satélite COMETS. Algunas comunicaciones satelitales aeronáuticas y experimentos de propagación fueron realizados con la utilización de arreglos activos de fase en un aeroplano.

El Laboratorio de Investigaciones Navales de Estados Unidos (NRL) ha mostrado algunas terminales y aplicaciones utilizando en satélite ACTS. La terminal móvil del ACTS fue utilizada para comunicaciones *full dúplex* en la USS Princeton (1.544 Mbps).⁶

Una serie de ensayos para servicios y experimentos satelitales de banda ancha utilizando enlaces de bandas K/Ka y Ku/Ka en terminales fijas, móviles y aeronáuticas de bajo costo han sido completados en su mayoría, sin embargo se siguen realizando en programas europeos como ISIS, SECOMS y ABATE. Un resumen de las terminales satelitales en banda Ka se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Resumen de las terminales pequeñas para Banda Ka

Organización	Sistema	Antena (cm)	PIRE (dBW)	G/T (dB/K)	Velocidades de transmisión	Aplicaciones
NASA-GRC	USAT Fase I	35	31	6.9	4.8 / 9.6 kbps	SCADA
NASA-GRC	USAT Fase II	60	41 / 44	13.1	Tx 3 Mbps Rx 45 Mbps	Video conferencia, web browsing, telemedicina, transmisión de archivos, protocolos IP y ATM
NASA-GRC	Active scanning phased array Tx	6.4 x 3.2 32 Elem.	23.4	NA	Tx 9.6 kbps	Voz y datos terrestres y aéreos móviles
NASA-GRC	Active scanning phased array Rx	< 9 cm 23 Elem. 91 Elem.	NA	-16.6 -4.5	Rx 256 kbps	Voz y datos terrestres y aéreos móviles
NASA-JPL EMS Tech.	Aero	17 x 70	45.2	0	1.544 Mbps	Video, audio, tele ciencia, control remoto, telemedicina
Gobierno de Canadá - CRC	Suitcase Fase I	40 Planar	32.2	7.1	19.2 kbps	Data, voice
Gobierno de Canadá - CRC	Suitcase Fase II	50 Offset	47.8	13	Tx 2 Mbps Rx 45 Mbps	Video conferencia, Internet, telemedicina, Varias demostraciones de campo.
Gobierno de Canadá - CRC	Briefcase	44 Plato parabólico	46.5	11	1 Mbps	Video conferencia, Internet, Investigación y desarrollo de nueva tecnología.
Johanneum Research, ESA, MPR Teltech	Pico Terminal	35	35.6	10.0	User 4 8 kbps	Datos, voz, TCP/IP; Tasas por canal: Rx 128 kbps TDM, Espectro esparcido de Tx a 128 kbps FDMA
US NRL	Marine	100	68.5	19.6	Tx/Rx 45 Mbps	Experimento SHAKE, TWTA 120W, LNA 3 dB y eficiencia de la antena de 60%
US NRL con la Terminal móvil ACTS	Marine	40.6 x 11.4	48	0	Tx/Rx 1.544 Mbps	USS Princeton, Internet, telemedicina, otros
Pre-producción Raytheon	Servicio Fijo	100 Offset	54.7	19.6	Tx/Rx 1.544 Mbps	SSPA 5W, LNA 3 dB, Eficiencia de la antena de 60%
Pre-producción NORSAT	Servicio Fijo	75 90 120	40 45 50	15 16.6 19.1	144 kbps 384 kbps 2.048 Mbps	ASTRA Return Channel System. Multimedia, Internet, etc
CRL-Japón	Servicio Móvil	168	NA	-6.8	4 to 64 kbps 96.5 to 1544 kbps	CDMA SCPC-TDM Usando el satélite COMETS.
CRL-Japón	Servicio Aéreo.	168	NA	-6.8	4.8, 24 kbps	Arreglo de fase activa, Comunicaciones satelitales y experimentos de propagación.

Referencias

1. Richard C. Reinhart, "System Design and Applications of the Ultra Small Aperture Terminal with the Advanced Communications Technology Satellite", Third Ka-band Utilization Conference, 15-18 Sept 1997, Sorrento, Italy, pp. 393-400
2. Corey Pike, Pierre Tardif, Dan Drolet, Will Janssen, "Ka-Band (29/19 GHz) Briefcase Satellite Terminal", Fifth Ka-band Utilization Conference, 18-20 Oct 1999, Taormina, Italy, pp. 461-466. Consultado en <http://acts.grc.nasa.gov/library/>
3. T. Lentsh, C. Netzberg and O. Koudelka, "Picoterminal – A Portable Ka-Band System", Second Ka-Band Utilization Conference, Florence, Italy, Sept, 1996, pp 121-127
4. J. Fikart, "RF Front End for a 20/30 GHz Briefcase Terminal", Second Ka-Band Utilization Conference, Florence, Italy, Sept, 1996, pp 141-148
5. J. Fikart, "Versatile RF Front End for Small Ka-band Ground Terminals", Third Ka-band Utilization Conference, Sorrento, Italy, Sept. 1997, pp. 385-392
6. Michael A. Rugar, David R. Beering, David E. Brooks, Douglas J. Hoder, " A Ka-band High Data Rate Shipboard Satellite Terminal ", Fifth Ka-band Utilization Conference, 18-20 Oct 1999, Taormina, Italy, pp. 95-109. Consultado en <http://acts.grc.nasa.gov/library/>

Capítulo 4.

Propagación en Banda Ka.

Actualmente existe una creciente demanda por el espectro de radio frecuencia en las naciones industrializadas del mundo. Esto es debido al auge que ha tenido el intercambio de información en nuestra sociedad, resultando en un incremento acelerado en la conectividad de las telecomunicaciones

El rango de frecuencias más deseable para satisfacer esas necesidades es la banda comprendida entre 1 y 10 GHz, esta banda es conocida como la "ventana de ruido", donde el ruido galáctico y el ruido generado por el hombre son mínimos. Además la absorción atmosférica generalmente puede ser omitida en esta región.

La congestión en la región comprendida entre 1 GHz y 10 GHz nos ha forzado a buscar frecuencias operacionales arriba de 10 GHz. Diversos estudios han encontrado que arriba de 10 GHz podemos obtener desempeños equivalentes o desempeños aproximadamente equivalentes a los encontrados en las frecuencias menores a 10 GHz.

Generalmente abajo de 10 GHz, en el diseño de radio enlaces, nosotros podemos despreciar los excesos de atenuación debido a la precipitación y a la absorción atmosférica. Para frecuencias arriba de 10 GHz, los excesos de atenuación debido a la precipitación y absorción atmosférica poseen una gran importancia que debe de ser considerada en el diseño de los enlaces. De hecho, se ha observado que ciertas bandas de frecuencias poseen una gran absorción por gases, lo que hace que estas frecuencias no sean disponibles para muchas aplicaciones.

La propagación de las ondas de radio arriba de 10 GHz a través de la atmósfera envuelve no solo a las pérdidas en el espacio libre, sino a muchos otros factores importantes. Estos factores son los siguientes:

A) La contribución de gases de la atmósfera homogénea debido a mecanismos de polarización resonante y no resonante.

B) La contribución de las no homogeneidades en la atmósfera.

C) La particular contribución debida a la lluvia, las nubes, la niebla, y partículas sólidas suspendidas en el aire (arena, polvo y humo)¹

En general, la atenuación de las ondas de radio de longitudes de onda milimétricas en una atmósfera despejada cerca del nivel de tierra es despreciable para la mayoría de los propósitos, exceptuando alrededor de las frecuencias donde la línea de absorción del vapor agua y oxígeno estas situados. De esta manera, en la banda de frecuencia de las ondas milimétricas, la atenuación será mayor alrededor de los 60, 119 y 183 GHz, los cuales corresponden a la absorción de la primera y segunda resonante de la molécula de oxígeno y a la absorción debido al vapor de agua respectivamente (Figura 1).

Otros gases despliegan líneas resonantes también, como son, N_2O , SO_2 , O_3 , NO_2 y NH_3 , pero debido a su baja intensidad en la atmósfera han sido despreciados sus efectos sobre la propagación.

Además de la absorción molecular debido a gases en la atmósfera y el vapor de agua, la atenuación debida a otros factores ambientales como son lluvia, nieve o granizo resultan ser más severos. La atenuación, sin embargo, no es el único efecto: la influencia de los hidrometeoros sobre la polarización y los efectos de la variación del índice refractivo deben ser tomadas en cuenta, al igual que se deben considerar los efectos que se generan cuando se esta trabajando con ángulos de elevación muy pequeños (menores a 5°).

El éxito en el diseño y desarrollo de cualquier sistema de ondas milimétricas requiere de un buen conocimiento de las características de propagación de las ondas milimétricas en el espacio libre bajo varias condiciones ambientales.

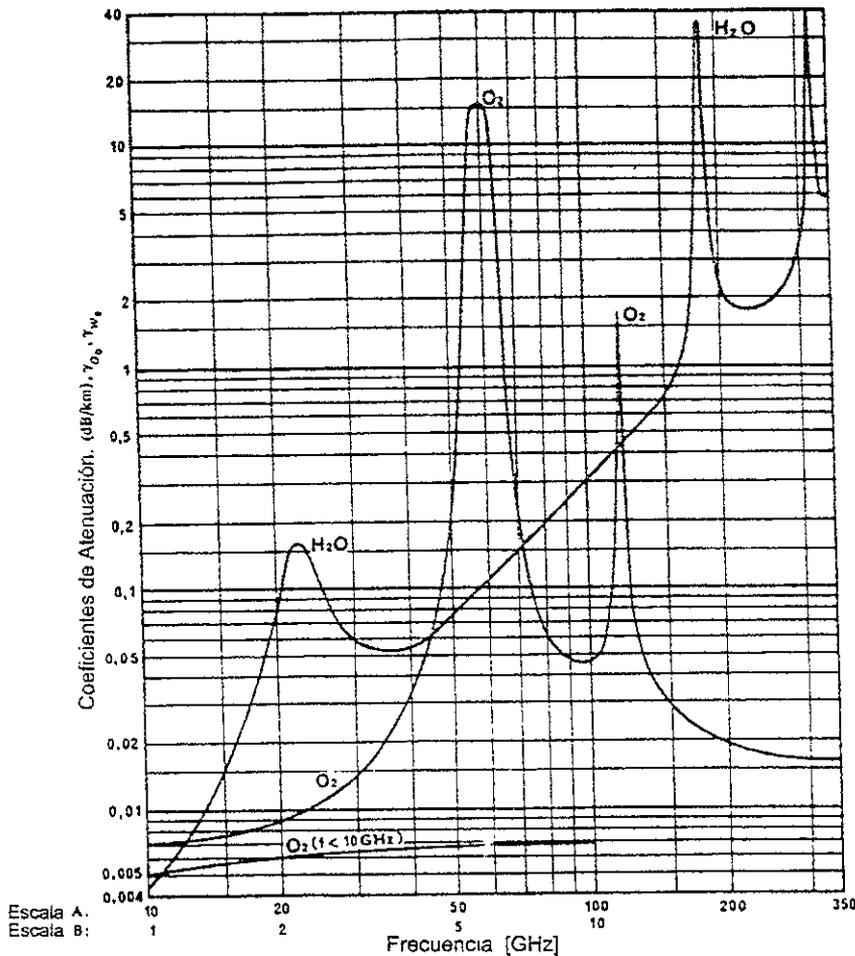


Figura 1. Atenuación atmosférica por oxígeno y vapor de agua. Usar la escala B para la absorción de oxígeno abajo de 10 GHz.
 Condiciones: Presión = 1 atmósfera; temperatura = 20°C
 Densidad de vapor de agua = 7.5 g/m³
 Rep 719 " Recommendations and Reports of the CCIR". Cortesía de ITU-CCIR, Genova, 1978

Propagación a través de la atmósfera.

Durante la propagación de las ondas electromagnéticas en un enlace tierra-espacio, estas cruzan por cuatro distintas regiones básicas: la troposfera, dentro del espacio libre, la ionosfera y fuera del espacio libre.

El espacio libre tiene menos pérdidas y un índice refractivo igual a uno, mientras que la troposfera y la ionosfera poseen índices de refracción respectivamente más grande y más pequeño que la unidad. Aquí, los fenómenos de la refracción y la absorción se elevan. En suma, la ionosfera, un medio magnético induce Rotación de Faraday*. Todos esos fenómenos afectan a los sistemas de comunicación tierra-espacio.

Centelleo en la Ionosfera.

Pronunciadas variaciones de corta duración (entre 1 y 15 segundos) de la amplitud, de la fase, del ángulo de polarización y del ángulo de llegada de las ondas electromagnéticas que alcanza la tierra desde el espacio en el rango de frecuencias de microondas son conocidos bajo el nombre general de centelleo ionosférico. El centelleo es atribuible a fluctuaciones en la densidad de los electrones en la esporádica capa E y en la capa F de la Ionósfera (figura 2). La localización de la estación terrena, la estación del año, el tiempo local y la cantidad de actividad solar influyen en la magnitud y la ocurrencia del centelleo ionosférico; la latitud geomagnética, la actividad solar y el tiempo local son los factores de mayor importancia.

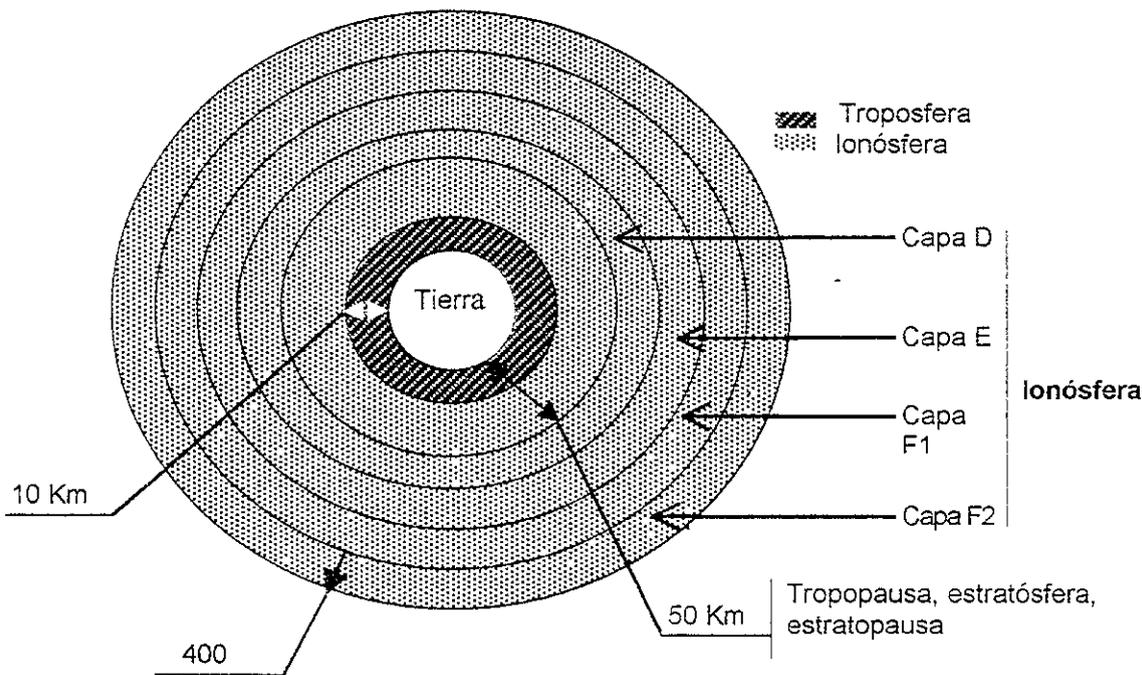


Figura 2. Capas atmosféricas

Dentro de los límites $\pm 20^\circ$ del Ecuador geomagnético, un centelleo de gran intensidad puede ocurrir por unas cuantas horas justamente después de la puesta de sol en la ionosfera sobre un enlace tierra-satélite con una magnitud

* Rotación de Faraday. Una onda polarizada linealmente puede ser considerada como la suma de dos ondas polarizadas circularmente, donde el sentido del giro es contrario una con respecto a la otra. A causa de la velocidad de fase de las dos ondas resultan ser diferentes en un medio magnético, el plano de polarización empieza a rotar. Sin embargo el efecto de la rotación de Faraday es despreciable arriba de los 10 GHz.

proporcional al número de manchas solares, teniendo su máximo durante el equinoccio. El centelleo llega a ser menos intenso en latitudes intermedias, pero se incrementa en latitudes elevadas que están más allá del límite de la región auroral.

Efectos adicionales de la ionosfera son variaciones en el ángulo de llegada y absorción. Ambos fenómenos siguen una ley f^{-2} , por lo que el impacto de estos sobre los sistemas de comunicación que operan en frecuencias de GHz es insignificante.

Efectos de la Troposfera.

Desviación del haz, centelleo, atenuación y un incremento de la temperatura de ruido en el cielo son los mejores efectos que se tienen en esta capa. La desviación troposférica es opuesta a la desviación ionosférica, estas son independientes de la frecuencia. Sin embargo todos esos fenómenos antes mencionados no son significantes en el diseño de sistemas de comunicación por satélite, excepto para aquellos que operan con un ángulo de elevación muy pequeño. En climas tropicales, en principal valor de desviación del haz oscila entre los $0.5^\circ - 0.6^\circ$, el cual ha sido observado para ángulos de elevación entre 1° y 2° . El centelleo es inducido por turbulencias en la atmósfera con dependencia del tiempo, el cual resulta afectarle diez veces más que en el centelleo ionosférico. este fenómeno es fuertemente dependiente del ángulo de elevación, incrementándose cuando el ángulo de elevación disminuye, y puede ser despreciado arriba de los 15° .²

Cálculo del centelleo.

El modelo de la ITU para el cálculo del centelleo ha sido recomendado para su uso en el rango de frecuencias de 4 GHz a 20 GHz, sin embargo, las mediciones que se realizaron recientemente con el ACTS y con el Olympus han demostrado que este procedimiento es preciso en la predicción de los efectos de centelleo hasta los 30 GHz.⁶ Los datos que se requieren para el cálculo del centelleo son: frecuencia, ángulo de elevación, diámetro de la antena, temperatura promedio, y promedio de la humedad relativa. Este es un método semi empírico que se ha encontrado con muy buen comportamiento en ángulos de elevación mayores a 4° .¹³

La desviación estándar de la amplitud del centelleo está dada por:

$$\sigma_z = \sigma_{xref} f^{7/12} \frac{g(x)}{(\text{seno}(\theta))^{1.2}} \quad \text{(dB)} \quad \text{C.1}$$

donde

f = frecuencia (GHz); $4 \text{ GHz} \leq f \leq 20 \text{ GHz}$

θ = ángulo de elevación

$$\sigma_{xref} = 3.6 \times 10^{-3} + 1.0 \times 10^{-4} N_{wet} \quad \text{C.2}$$

$$N_{wet} = 3730U \frac{e_s}{(T + 273)^2} \quad \text{C.3}$$

U = humedad relativa promedio;

e_s = Presión del vapor de agua en saturación (mbar);

T = Temperatura (°C)

$$g(x) = \sqrt{3.86(x^2 + 1)^{1/2} \text{seno} \left[1/6 \tan^{-1} \left(\frac{1}{x} \right) \right] - 7.08x^{5/6}} \quad \text{C.4}$$

$$x = 1.22hD^2 \left(\frac{f}{L} \right) \quad \text{C.5}$$

D = Diámetro de la antena (m);

L = eficiencia de apertura de la antena

$$L = \frac{2h}{\sqrt{\text{seno}^2(\theta) + 2.35 \times 10^{-4} + \text{seno}(\theta)}} \quad \text{C.6}$$

h = 1000 m altura de la capa turbulenta

El nivel de dispersión A_p (dB), excedido para p % del tiempo, esta dado por:

$$A_p = \sigma_x \left(-0.061(\log_{10} p)^3 + 0.072(\log_{10} p)^2 - 1.71\log_{10} p + 3 \right) \quad \text{C.7}$$

para $0.01\% \leq p \leq 50\%$

Atenuación por la capa de descongelamiento

La capa de descongelamiento o fusión es la región que se encuentra alrededor de la isoterma de 0 ° donde las partículas de hielo y nieve se fusionan para formar gotas de lluvia. El espesor de la capa de fusión es del orden de 500 m. La atenuación producida por las partículas de hielo fusionándose pueden alcanzar niveles significantes, sobre todo para los enlaces con un ángulo de elevación pequeño. La atenuación específica en la capa de fusión, sin embargo, no siempre es significativamente más grande que en la región de lluvia debajo ella. El modelado de atenuación por lluvia, siendo principalmente semi-empírico, normalmente cuenta los efectos de esta capa para tasas de lluvia moderadas y altas. Este efecto debe considerarse por separado solamente para tasas de lluvia bajas. Existen varios modelos para predecir estos efectos. Aquí se muestra uno que es sencillo en su aplicación y que fue seleccionado para el modelo DAH. Usando este modelo³, la relación siguiente entre la proporción de lluvia, R , y la atenuación específica en la capa de la fusión es:

$$\alpha_m = aR^b \quad (\text{dB}) \quad \text{D.1}$$

donde:

$$a = e^{1.58} \ln(f) - 6.23$$

$$b = e^{0.029} \ln(f) + 0.031$$

R -la tasa de lluvia en mm/h

f – frecuencia (GHz)

El grosor de la capa de descongelamiento se toma de 0.5 km y la longitud de la trayectoria a través de esta capa, L_m , es $L_m = 0.5 / \text{seno}(\theta)$, donde θ es el ángulo de elevación. La longitud de la trayectoria a través de esta capa está limitada a 10 km.

Así, la atenuación debida a la capa de descongelamiento es:

$$A_m = \alpha_m L_m \text{ (dB) para } L_m \leq 10 \text{ km} \quad \text{D.2}$$

Efectos de la niebla y de las nubes.

La niebla es la condensación de vapor de agua atmosférico en gotas de agua que se mantienen suspendidas en el aire. Cuando la nube resultante, gotas de agua o cristales de hielo, envuelven a un observador y su visibilidad horizontal es restringida a menos de 1 Km., entonces decimos que tenemos niebla. La niebla es producida de dos formas diferentes: formada sobre el agua por el resultado del movimiento horizontal de una masa de aire caliente por encima de una masa de aire frío y formada debido al aire que ha estado sobre la tierra durante las horas de luz solar, precediendo en la noche a la formación de esta.

La atenuación debida a la niebla es menos seria que la debida a la lluvia ya que el contenido de agua es menor, típicamente es del orden de 0.25 g/m^3 o menos. La figura 3 muestra el coeficiente de atenuación debido a la niebla para diferentes contenidos de agua en el rango de 0 a 40°C en el rango de frecuencias de 10 a 180 GHz.³

Las nubes también generan atenuación es por ello que también deben de ser consideradas por los sistemas de comunicación tierra – espacio, así como en los sistemas de radar.

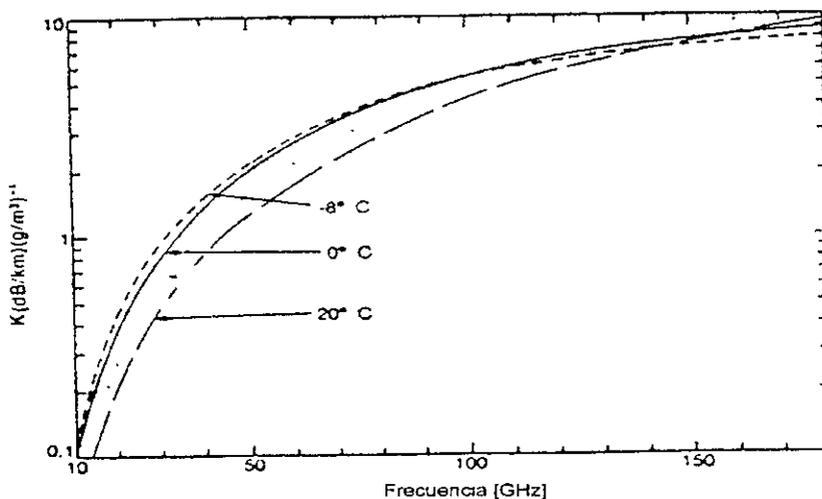


Figura 3. Coeficientes específicos de atenuación para niebla como una función de la frecuencia y contenido de agua, para diferentes temperaturas.

Efectos de la nieve y el granizo.

Aunque la atenuación por lluvia es el factor que más afecta la propagación de las ondas electromagnéticas, se deben considerar los efectos debidos a otros hidrometeoros como son la nieve, el granizo o la niebla. La atenuación debida a la nieve y al granizo es mucho menor que la producida por la lluvia ya que la constante dieléctrica del hielo es menor que la constante dieléctrica del agua. El efecto de dispersión que se genera cuando la onda electromagnética cruza secciones de copos de nieve, agujas de hielo y piedras de granizo es considerablemente bajo en comparación con la dispersión generada por gotas de agua del mismo tamaño. Además, las partículas de hielo absorben mucho menos potencia que una gota del mismo tamaño, por ello la atenuación debido a la nieve y al granizo es mucho menor que la atenuación debida a la lluvia. La atenuación debido a la nieve húmeda será mayor que para el hielo, particularmente en la capa de descongelamiento (fusión), donde los copos de nieve cubiertos de agua producen entre 10 y 15 dB más que la atenuación por lluvia. En la parte baja de las ondas milimétricas del espectro radioeléctrico, la nieve seca tiene poco efecto en la atenuación. Por otro lado las mediciones han mostrado que esta puede ser importante para frecuencias altas.⁴

La absorción y el esparcimiento debido al granizo en la lluvia son mayores que a la provocada por la lluvia sola y depende del tamaño y la forma del granizo y de la presencia y grosor de la capa de agua que las pudiese cubrir.

Se ha confirmado experimentalmente que la nieve y las partículas de nieve pueden causar despolarización debido a la naturaleza no esférica de las partículas de hielo.

Influencia de los hidrometeoros sobre la Polarización.

Los efectos de polarización resultan de la naturaleza no esférica de los hidrometeoros y de la conducta de propagación en diferentes polarizaciones. El efecto de polarización cruzada puede ser significativo en aplicaciones de comunicaciones donde ambas líneas de polarización son usadas, cada una con una modulación diferente, resultando en una modulación cruzada. Esos efectos son de gran importancia en los sistemas de radar.

Para los hidrometeoros, el grado de cambio sobre la polarización es dependiente del tipo de polarización incidente como también del tamaño, la forma y la orientación de las gotas de agua.

A una altitud elevada las partículas de hielo también pueden causar despolarización de las ondas electromagnéticas, la característica importante aquí es que la despolarización ocurre sin una relación de señal de atenuación como normalmente es experimentada durante la lluvia. Las nubes también causan despolarización, ya que estas contienen gotas de agua o partículas de hielo. Significativamente anómalos eventos de despolarización han sido vistos a través de las nubes durante una tormenta, así como en cualquier otro tipo de nube que tenga una gran concentración de partículas de hielo. Igualmente el granizo también genera efectos de despolarización.

Otros efectos ambientales y atmosféricos.

Además de la atenuación y la despolarización de las ondas milimétricas debido a la absorción y los desvanecimientos por gases atmosféricos, nieve, granizo, nubes, etc., muchos otros fenómenos son de interés. Esos incluyen efectos del cielo despejado como son los conductos de evaporación, efectos debidos a la variación del índice de refracción, reflexión de la lluvia y de las nubes y ruido térmico en la atmósfera. Aún cuando tomemos el efecto de la isolación, este no puede ser relativamente significativo como otros efectos relacionados con la atenuación debido a la lluvia, sin embargo es necesario tener conocimiento de esos efectos para propósitos de diseño de sistemas.

Efectos del cielo despejado.

Las propiedades de la atmósfera son descritas por las modificaciones del índice de refracción. Para una atmósfera seca, el índice de refracción es casi constante sobre el espectro radioeléctrico completo. Sin embargo, con vapor de agua, el momento del dipolo de las moléculas tienden a seguir los cambios del campo eléctrico, causando un incremento en el índice de refracción. Los efectos refractivos de esta manera varían considerablemente con las condiciones meteorológicas y por algunas causas anormales la curvatura de las ondas gradualmente tienden hacia abajo (super-refracción), o tienden hacia arriba (sub-refracción). La pérdida de señal debido a la refracción debería de ser distinguible de la pérdida debida a la atenuación, ya que la onda es rotada, causando con ello un cambio en el ángulo de llegada. Variaciones en la refractividad atmosférica pueden producir multitrayectorias que difieren en rango por media longitud de onda causando graves desvanecimientos. Fluctuaciones irregulares de escala pequeña en el índice de refracción pueden producir grandes cambios en la fase y la amplitud de las señales, resultando en efectos de centelleo, los cuales reducen significativamente el ancho de banda disponible. El centelleo también puede ser causado debido a nubes y al vapor de agua pasando a través del haz principal. Esos efectos tienden a incrementarse con el incremento de la frecuencia.

Ruido Térmico en la Atmósfera.

Los gases atmosféricos y las precipitaciones producen ruido de tipo térmico que es frecuentemente referido como ruido de cielo (*sky noise*). Este es expresado tanto en términos de una temperatura de antena (*antenna temperature*) como en una temperatura de cielo (*sky temperature*). El ruido térmico en la atmósfera resulta ser pequeño y finito, limitando la sensibilidad, la cual a su vez puede ser compensada con un receptor más sensible. La potencia del ruido incrementara considerablemente si la lluvia o nubes húmedas están presentes. Usando mediciones del ruido en el cielo y la distribución de temperatura a lo largo de una trayectoria, la atenuación total a través de la atmósfera puede ser calculada.

Otros Factores.

Aun cuando la absorción atmosférica y la atenuación causada por lluvia, nieve, granizo, etc., constituyen el principal problema de la propagación de las ondas milimétricas, es necesario tener una idea de los efectos de esparcimiento debido a partículas de materia (como por ejemplo partículas de polvo y arena) en el aire.

Sin embargo se ha encontrado que los efectos de las partículas de arena, de polvo y de humo producen una atenuación despreciable sobre las longitudes de onda milimétricas. La habilidad de las ondas milimétricas para propagarse virtualmente sin atenuación a través de diversos humos, polvos y escombros es una de sus principales ventajas.

Atenuación por absorción de gases

Las principales causas de atenuación por gases en la trayectoria de propagación de una onda electromagnética en banda Ka son: la absorción por las moléculas de Oxígeno y por el vapor de agua que se encuentran en las diferentes capas de la atmósfera, así como en la lluvia y en las nubes. La figura 4 muestra la atenuación por Oxígeno y por gases a nivel del mar así como la atenuación total debido a la suma de las dos anteriores en una atmósfera promedio (densidad del vapor de agua de 7.5 gm^{-3} y 20° de temperatura).

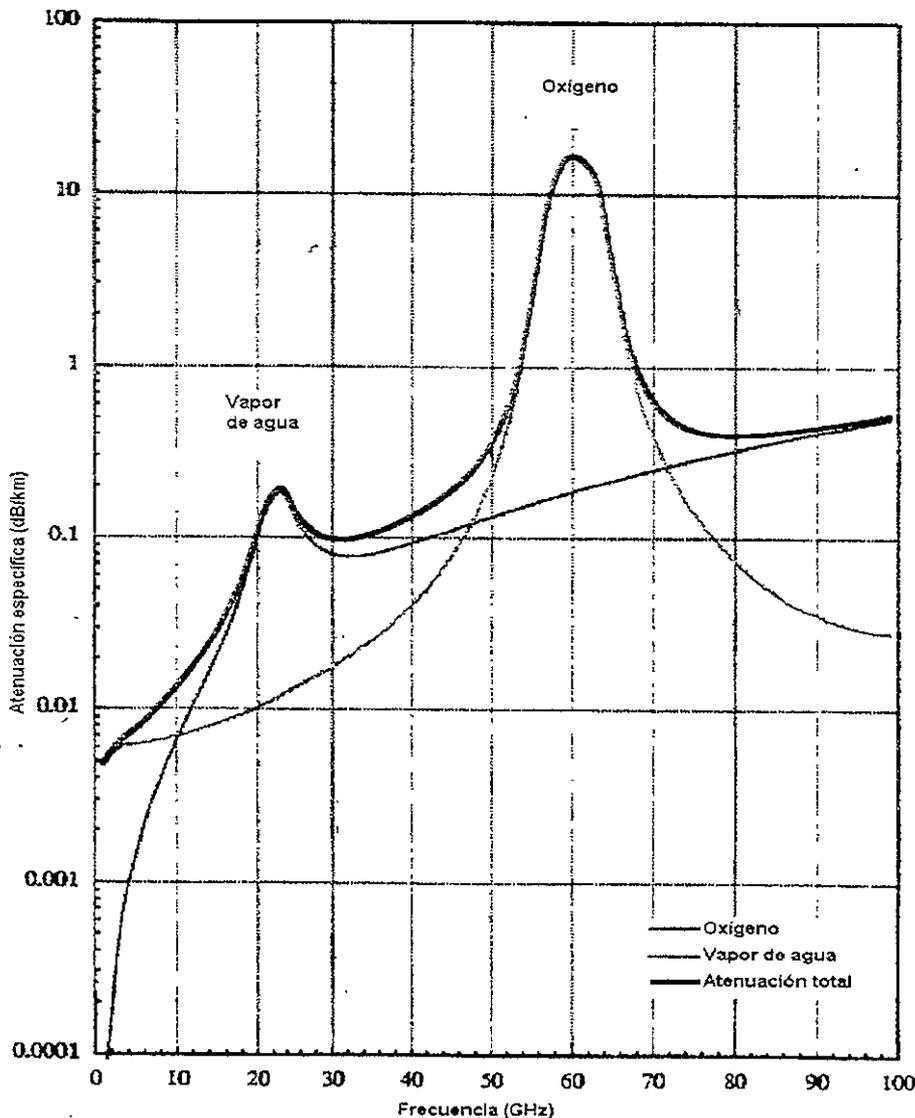


Figura 4. Atenuación total y parcial provocada por presencia de gases y vapor de agua en la atmósfera.

La absorción que sufren las ondas electromagnéticas a su paso por las moléculas de Oxígeno y de vapor de agua se debe a que el campo electromagnético incidente produce un momento magnético en las primeras y un momento eléctrico en las segundas. Esta absorción depende de la presión y de la temperatura³ y para una altitud dada puede variar en un factor de 2 de lugar a lugar o de un momento a otro. En la figura 5 se muestra la atenuación debida a gases para una atmósfera promedio en una trayectoria horizontal.

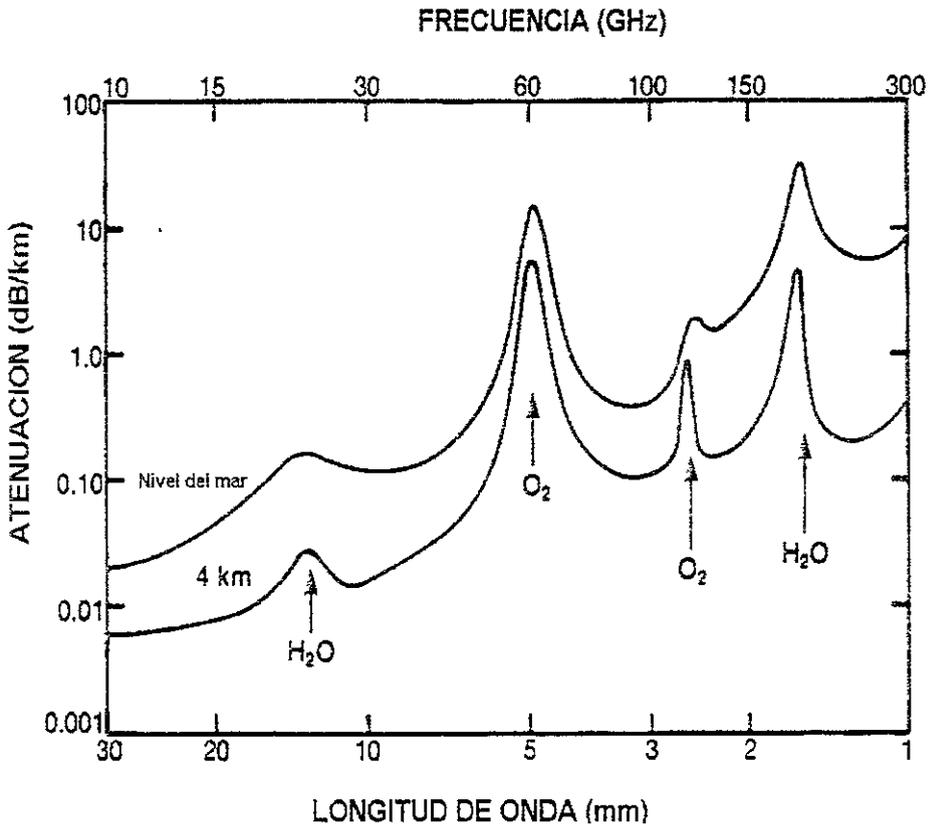


Figura 5. Absorción atmosférica promedio para ondas milimétricas en propagación horizontal

Para longitudes de onda mayores a 3cm, la absorción por gases es pequeña y puede ser despreciada, excepto en enlaces largos de más de 60 Km. El valor de atenuación por gases es, en este caso, de 0.008 dB/km.⁵ Sin embargo, los hidrometeoros provocan más atenuación debido a la absorción y esparcimiento que los gases atmosféricos.

La absorción por Oxígeno puede ser considerada como un efecto constante y tiene variaciones muy pequeñas. La atenuación debida a la absorción de los gases se incrementa a partir de los cambios en la cantidad de vapor de agua en la atmósfera.⁶ Esta variación de vapor de agua es diferente a distintas alturas sobre el nivel de mar y la contribución a la atenuación de la absorción por vapor de agua es dependiente de su concentración y de la temperatura. La concentración de vapor es el factor más inestable y puede tener fluctuaciones de efecto considerable.

Para un enlace satelital, ya sea en el cenit o en una trayectoria inclinada, la atenuación debida a gases se ve influenciada por la longitud de la trayectoria y por su paso por diferentes capas atmosféricas en las cuales es diferente la densidad de vapor de agua. Además, la atenuación por gases varía con respecto a la frecuencia. Es por eso que la atenuación total debida a gases, provocada por la absorción del Oxígeno y del vapor de agua, es función de la frecuencia, del ángulo de elevación del enlace (Figura 6), la altura a la que se encuentre la estación terrena sobre el nivel del mar y la densidad de vapor de agua en ese lugar.

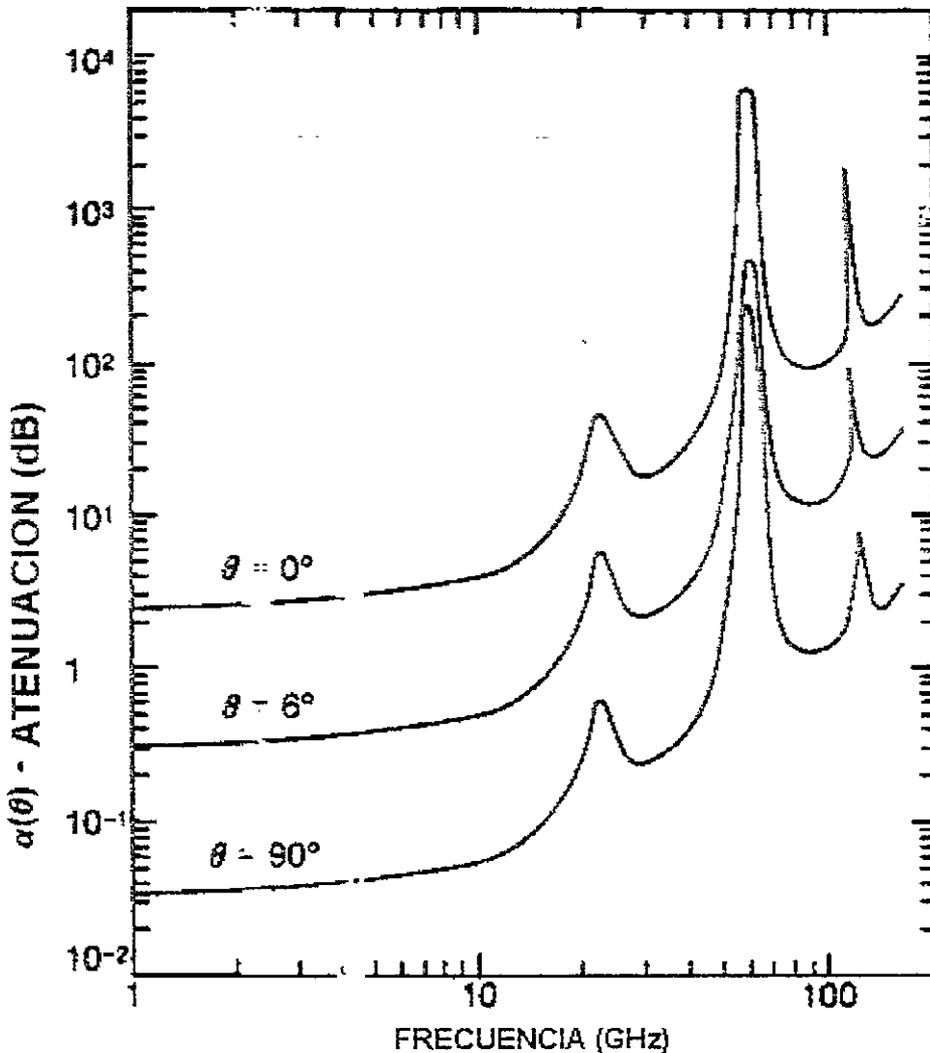


Figura 6. Atenuación total para diferentes trayectorias inclinadas desde la superficie de la tierra hacia el cenit

El cálculo para la absorción por gases es calculada como la suma de la absorción de vapor de agua y Oxígeno. El procedimiento que se propone para su utilización en el modelo DAH es el que propone la ITU,⁶ y es aplicable a frecuencias de hasta 350 GHz.

La atenuación específica del vapor de agua γ_w (dB/km) para una presión atmosférica de 1013 mPa y a una temperatura de 15°C está dada por:

$$\gamma_w = \left(0.05 + 0.0021\mu + \frac{3.6}{(f - 22.2)^2 + 8.5} + \frac{10.6}{(f - 183.3)^2 + 9} + \frac{8.9}{(f - 325.4)^2 + 26.3} \right) f^2 \mu \times 10^{-4}$$

donde:

G.1

f frecuencia (GHz)

μ densidad del vapor de agua (g/m³)

La atenuación total para el vapor de agua está dada por:

$$A_w = \frac{h_w \gamma_w}{\text{seno } \theta} \quad (\text{dB}) \quad \text{para } \theta > 10^\circ$$

$$A_w = \frac{\gamma_w \sqrt{R_e h_w}}{\cos \theta} F(\tan \theta \sqrt{R_e / h_w}) \quad (\text{dB}) \quad \text{para } \theta \leq 10^\circ \quad \text{G.2}$$

donde:

R_e = radio efectivo de la tierra incluyendo la refracción (8500 km),

θ = ángulo de elevación

$$F(x) = \frac{1}{0.661x + 0.339\sqrt{x^2 + 5.51}} \quad \text{G.3}$$

h_w = altura equivalente de la altura del vapor dada por:

$$h_w = h_{w0} \left(1 + \frac{3}{(f - 22.2)^2 + 5} + \frac{5}{(f - 183.3)^2 + 6} + \frac{2.5}{(f - 325.4)^2 + 4} \right) \quad (\text{km}) \quad \text{G.4}$$

h_{w0} = 1.6 km en condiciones de cielo despejado fuera de las regiones de absorción.

La atenuación específica del Oxígeno γ_o (dB/km) está dada por:

$$\gamma_o = \left(7.19 \times 10^{-3} + \frac{6.09}{f^2 + 0.227} + \frac{4.81}{(f - 57)^2 + 1.5} \right) f^2 \times 10^{-3} \quad \text{G.5}$$

donde la frecuencia está dada en GHz ($f < 57$ GHz).

La atenuación total está dada por:

$$A_o = \frac{h_o \gamma_o}{\text{seno } \theta} \quad (\text{dB}) \quad \text{para } \theta > 10^\circ$$

$$A_o = \frac{\gamma_o \sqrt{R_e h_o}}{\cos \theta} F(\tan \theta \sqrt{R_e / h_o}) \quad (\text{dB}) \quad \text{para } \theta \leq 10^\circ \quad \text{G.6}$$

donde:

R_e = radio efectivo de la tierra incluyendo la refracción (8500 km),

h_o = Altura equivalente de la capa de Oxígeno (=6 km en aire seco)

θ = ángulo de elevación

$F(x)$ dada en la ecuación G.3

La absorción por gases A_g (dB) debida a los dos componentes (Oxígeno y Vapor de agua) atá dada por:

$$A_g = A_o + A_w \quad (\text{dB}) \quad \text{G.7}$$

Atenuación por lluvia.

Las ondas electromagnéticas en la Banda Ka experimentan una atenuación significativa debido a la precipitación, y en particular por la lluvia ya que esta provoca la absorción y la dispersión a través de los hidrometeoros.

El patrón de tiempo y espacio de la ocurrencia de lluvia es considerado como un proceso aleatorio. Por esta razón, la atenuación por lluvia en un enlace satelital tiene un comportamiento inherentemente probabilístico, el cual depende de la frecuencia, la posición geográfica de la estación terrena, el clima, el tipo de terreno, la estación, la intensidad de lluvia, etc. El problema de la atenuación por lluvia ha sido estudiado por más de 3 décadas.

La consideración de la atenuación por lluvia en el diseño y planeación de un sistema de comunicaciones es importante debido a que los sistemas de comunicaciones pueden experimentar una pérdida de la señal debido a la atenuación causada por la lluvia y provocar que el sistema se torne indisponible para su uso temporalmente. La dispersión provocada por la lluvia produce, además, señales de ruido indeseables que interfieren en un sistema de recepción y que puede envolver u ocultar la señal recibida.

La atenuación producida por la lluvia tiene un comportamiento casi cuadrático en función de la frecuencia en el rango de 3 a 100 GHz y es mayor a ángulos bajos de elevación de las antenas en las estaciones terrenas. La figura 7 muestra la atenuación específica en función de la frecuencia para razones de lluvia de 1, 10 y 100 mm/h.

A 100 mm/h el máximo de atenuación ocurre en 40 GHz. Afortunadamente, el hablar de 100 mm/h es hablar de condiciones que no se dan siempre. Para razones menores de lluvia, el máximo se encuentra localizado a frecuencias mayores de 100 GHz. Para frecuencias menores de 100 GHz la atenuación específica provocada por la lluvia no es máxima. Sin embargo, en este rango, la atenuación debida a la lluvia crece de forma muy rápida con el valor de la frecuencia. Este comportamiento es igual para las distintas tasas de lluvia. Para frecuencias menores a 3 GHz, la atenuación causada por la lluvia no es significativa. En contraste, para frecuencias mayores, la atenuación por lluvia representa una un factor importante que se debe considerar para el diseño de los sistemas de comunicación. Para frecuencias mayores a 10 GHz, la atenuación por lluvia representa más del 40% de la atenuación en el sistema y en sistemas que trabajan en la Banda Ka (20GHz / 30GHz), esta representa una parte aún más grande.

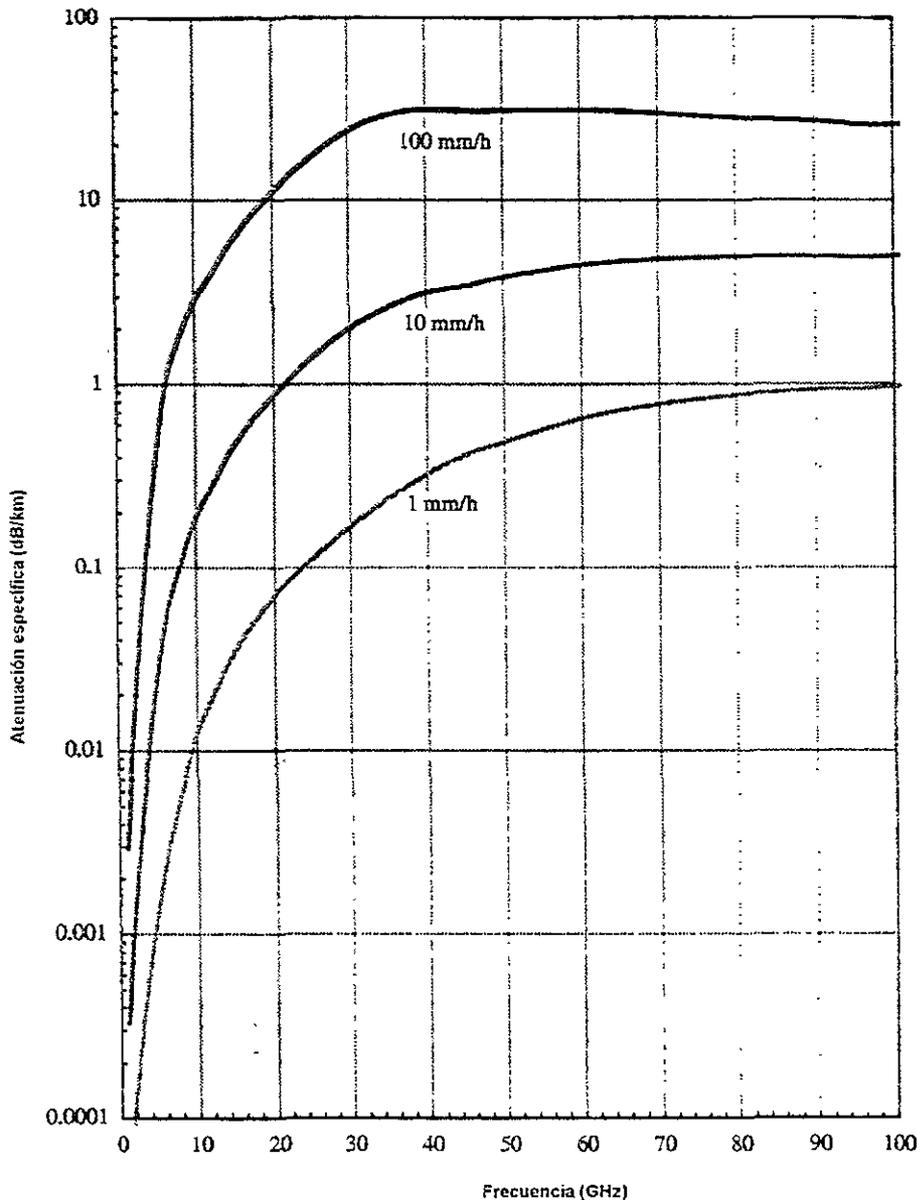


Figura 7. Atenuación específica ocasionada por la lluvia. Los cálculos son para gotas esféricas y una ley de distribución Laws and Parson para el tamaño de las gotas

La atenuación por lluvia se presenta de forma similar en un enlace satelital o en un enlace terrestre. Sin embargo, es necesario hacer consideraciones particulares para cada uno de estos enlaces cuando se realizan los cálculos para el diseño del sistema.

Los cambios de atenuación que ocurren en un enlace espacio-tierra pueden ser determinados por medio de la observación del cambio del nivel de la señal recibida en tierra cuando la potencia radiada desde el satélite no tiene variaciones. Esto se hace con referencia a un nivel de cero atenuación, el cual se determina en condiciones de cielo despejado.

Varios satélites de tipo experimental han sido utilizados para recopilar datos sobre atenuación en la Banda Ka. El más importante de ellos es el ACTS de la NASA. Con este satélite fue posible recopilar datos suficientes sobre atenuación en esta banda de frecuencias. Estos datos han sido comparados con los modelos teóricos empleados para predecir la atenuación producida por diferentes fenómenos como la lluvia. Se encontró que la atenuación por lluvia es el factor que más influye en un enlace en Banda Ka. La condición de lluvia no afecta al enlace en toda su trayectoria⁷ y lo hace en forma distinta a lo largo del área de precipitación. Con tanta variación en el fenómeno de atenuación por lluvia, además de su inherente ocurrencia aleatoria, no existe hasta el momento un modelo preciso con el que se pueda predecir la atenuación provocada por la lluvia en un enlace. Sin embargo, es importante inferir los niveles de atenuación producidos por la lluvia en el diseño de un sistema de comunicaciones para que este no sea afectado en su desempeño en forma descontrolada.

La atenuación derivada de la presencia de la lluvia depende principalmente de la intensidad con que ésta cae y de la probabilidad de que ocurra un evento de lluvia en una determinada zona geográfica.⁸ Además de la atenuación de la señal útil, la lluvia produce otros dos efectos de deterioro en los enlaces: aumenta la *temperatura de ruido* de las antenas receptoras y produce giros en la polarización de las señales.

Las células de lluvia presentan variaciones en cuanto a duración, extensión vertical y área de cobertura. Estas celdas no son homogéneas, tienen un tiempo de vida relativamente corto y un área de presencia pequeña.⁷

En los modelos de predicción de atenuación por lluvia, la tasa de lluvia es uno de los parámetros esenciales. Esta tasa depende de la localización geográfica del sitio en el que se va a calcular el enlace. Existe bibliografía ampliamente publicada que contiene valores de tasa de lluvia para amplias zonas de nuestro planeta. Estas zonas han sido determinadas con estudios históricos y datos recopilados de la ocurrencia de lluvias a lo largo de los años. Actualmente los datos más empleados y que se han difundido más ampliamente son los publicados por la ITU-R y las zonas del modelo global de Crane.

Modelos de atenuación por lluvia.

Para el cálculo de la atenuación por lluvia existen varios modelos propuestos. Entre ellos se encuentran: el Modelo Global de Crane y el que propone la ITU-R en la recomendación ITU-R PN.618-4, 1996.

A raíz de los datos recopilados por el ACTS y los resultados arrojados de los experimentos de propagación en la Banda Ka se ha hecho posible la comparación de dichos resultados experimentales con resultados teóricos provenientes de diversos métodos de predicción de atenuación. Asimismo, se ha buscado mejorar los modelos ya existentes para hacerlos más precisos además de que se han propuesto otros nuevos modelos.

Uno de estos modelos es el propuesto por Asoka Dissanayake, Jeremy Allnutt y Fatim Haidara, el cual es conocido como método DAH y que como se verá más adelante, arroja resultados más precisos en cuanto al cálculo de atenuación por

lluvia y por otros fenómenos en Banda Ka. Este modelo combina además otros tipos de fenómenos que contribuyen a la atenuación en un enlace satelital.

De los múltiples modelos de atenuación por lluvia que existen los más representativos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Modelos de atenuación por lluvia

Modelo	Origen	Autor(es)	Notas
ITU-R	Internacional	ITU	ITU-R Rec P.618-4, 1991
CCIR	Internacional	CCIR (Hoy ITU)	CCIR Reporte 564-3, 1986
Brasil	Brasil	M. Pontes	ITU-R, modelo modificado para regiones tropicales
Japón	Japón	Yoshio Karasawa	ITU-R, modelo modificado para bajas disponibilidades
DAH	USA	Dissanayake, Allnutt, Haidara	Actualización del modelo de la UIT
Dos componentes	USA	R. K. Crane	Procedimientos matemáticos complejos
Leitão-Watson	UK	M. J. Leitão y P. A. Watson	Modelo basado en radar
Misme-Waldteufel	Francia	P. Misme y P. Waldteufel	Una extensión de su modelo terrestre de 1975
ExCell (Exponential CELL model)	Italia	Capsoi, Fedi y Paraboni	Estimación de atenuación por lluvia por celdas individuales
Spain	España	J. A. García-López	Un método simple optimizado para lluvia intensa
Global	USA	R. K. Crane	Ampliamente utilizado para la planeación de sistemas
SAM (Simple Attenuation Model)	USA	W. Stutzman	Perfeccionado para simplicidad

Cada modelo mencionado fue elaborado para un fin específico. Los modelos CCIR e ITU fueron elaborados con la finalidad de ser usados en forma global y en un amplio rango de frecuencias. El modelo DAH fue elaborado con base al modelo de la ITU e introduce factores que hacen más precisa la predicción de atenuaciones por lluvia. De igual forma, los modelos Brasil y Japón fueron elaborados con base en el modelo de la ITU pero para hacerlo más preciso en zonas tropicales de alta precipitación y con bajas disponibilidades, respectivamente. Los siguientes cinco modelos fueron elaborados con base en mediciones de radar. Estos modelos fueron evaluados y comparados con los datos arrojados por el ACTS en siete diferentes localidades. Las siete estaciones se encontraban ubicadas diferentes zonas de los Estados Unidos. Se concluyó finalmente que el modelo que arrojaba el mejor comportamiento era el DAH, el cual está basado en el modelo de la ITU.⁹ Otro estudio realizado por Robert K. Crane y Asoka Dissanayake compara cuatro modelos: El modelo Global, el de dos Componentes, el recomendado por la ITU y el modelo DAH. Estos modelos fueron combinados con tres diferentes modelos de distribución de lluvia: el modelo Crane-Global, el modelo de la ITU y el modelo Rice-Holmberg. Este estudio demuestra que el único modelo que arrojó predicciones aceptables fue el modelo

DAH combinado ya sea con el modelo de distribución Global de Crane o con el modelo Rice-Holmberg. En ambos casos se obtuvo un comportamiento mucho mejor que con el uso de los modelos de Crane o con el modelo ITU para el cálculo de atenuación. Sin embargo, el modelo Rice-Holmberg utiliza datos locales que solo pueden ser obtenidos por medio de observaciones directas a lo largo de periodos de tiempo largos.¹⁰ Aunado a esto, los resultados que arrojó este estudio dejan ver que, estadísticamente, los resultados obtenidos cuando se utiliza la distribución Global de Crane son mejores que cuando se usa el modelo Rice-Holmberg. A partir de las comparaciones que se realizaron con los datos recopilados con el ACTS así como de la observación de los resultados de los distintos modelos se concluyó que, de todos los modelos usados, el modelo Global de distribución de lluvia combinado con el modelo de predicción de atenuación DAH fue el mejor.¹¹

Para la evaluación de resultados se realizaron diferentes pruebas de hipótesis a los modelos de atenuación combinados con los modelos de distribución de lluvia en cuanto a los resultados que arrojaron en la predicción de atenuación en Banda Ka comparados con los resultados que se obtuvieron de los experimentos con el ACTS. Una prueba fue con base a la desviación RMS. La sencilla prueba de hipótesis con un nivel de significancia de 0.1 permite rechazar cualquier combinación de modelos, cuya desviación RMS sea mayor a 0.33, como no consistente con las mediciones del ACTS (Tabla 2). Las diferencias promedio compuestas fueron utilizadas para realizar una segunda prueba de hipótesis. Un modelo es consistente con las observaciones realizadas a un nivel de significancia de 0.1 si la magnitud de la diferencia promedio es menor a 0.07 (Tabla 3).¹¹

Tabla 2. Valores de desviación RMS para diferentes modelos

<i>Datos de atenuación a 20.2 GHz</i>			
Modelo de atenuación	Modelo de distribución de lluvia		
	Global de Crane	ITU-R	Rice-Holmberg
DAH	0.28	0.45	0.32
ITU-R	0.42	0.51	0.50
Dos componentes	0.60	0.63	0.37
Global	0.47	0.61	0.52
<i>Datos de atenuación a 27.5 GHz</i>			
Modelo de atenuación	Modelo de distribución de lluvia		
	Global de Crane	ITU-R	Rice-Holmberg
DAH	0.21	0.51	0.35
ITU-R	0.31	0.53	0.45
Dos componentes	0.53	0.73	0.40
Global	0.48	0.71	0.64

Tabla 3. Valores de diferencia promedio compuesta para diferentes modelos

Datos de atenuación a 20.2 GHz			
Modelo de atenuación	Modelo de distribución de lluvia		
	Global de Crane	ITU-R	Rice-Hoimberg
DAH	0.14	0.10	-0.06
ITU-R	0.16	0.12	-0.06
Dos componentes	0.40	0.31	-0.07
Global	0.30	0.20	0.30
Datos de atenuación a 27.5 GHz			
Modelo de atenuación	Modelo de distribución de lluvia		
	Global de Crane	ITU-R	Rice-Hoimberg
DAH	-0.01	0.06	-0.20
ITU-R	0.07	0.17	-0.14
Dos componentes	0.32	0.37	-0.08
Global	0.30	0.27	0.42

Obsérvese cómo la combinación del modelo DAH con el modelo global de Crane de distribución de lluvia es el que se desempeña mejor en ambas frecuencias de experimentación y en ambas pruebas de hipótesis.

Modelo DAH

El modelo DAH (*Dissanayake, Allnutt, Haidara model*) es, formalmente, un procedimiento para predecir los efectos combinados de atenuación por lluvia y varios factores que contribuyen de manera diferente a la atenuación en un enlace de comunicación satelital. La parte que se refiere a la atenuación por lluvia arroja resultados significativamente mejores que aquellos que se obtienen de otros modelos. Esto es de gran importancia ya que la contribución de la atenuación por lluvia es la más significativa en frecuencias mayores a los 10 GHz. Los otros factores de atenuación han sido estudiados por muchos años y actualmente existen diversos modelos propuestos para el cálculo de la atenuación debida a ellos. Esta se incrementa conforme se incrementa la frecuencia. Este método puede ser empleado para el cálculo de la atenuación individual de cada componente o para todo el conjunto de factores que contribuyen a la atenuación de las ondas electromagnéticas en un enlace satelital. La importancia de predecir con la mayor exactitud posible la atenuación por lluvia así como la atenuación por otros fenómenos, radica en la calidad del desempeño de un sistema de comunicaciones así como en la posibilidad de disminuir costos en cuanto al diseño y a la implementación de estos.

El método DAH está basado en el método de la ITU¹² que es uno de los métodos más empleados para el diseño de sistemas de comunicación satelitales. La parte más importante del modelo es la que se refiere a la atenuación por lluvia. Este procedimiento fue probado por la ITU demostrando ser el más exacto de todos los métodos probados.¹³ Este modelo fue corroborado, además, para su aplicación en Banda Ka utilizando los datos recopilados en los experimentos en Banda Ka realizados con el ACTS. Al igual que en el modelo de la ITU, en este modelo se calculan los valores de atenuación con base en la intensidad de lluvia a un nivel de probabilidad de 0.01% y posteriormente se extrapola para otras disponibilidades. Es aplicable al rango de frecuencias de 4 a 35 GHz y con un rango de porcentajes de probabilidad de indisponibilidad de 0.001% a 10%. Los datos necesarios para los cálculos, así como el procedimiento, paso a paso, se muestran a continuación.

Los datos que se requieren para el modelo son:

- Latitud de la estación terrena ϕ (grados)
- Altitud de la estación terrena sobre el nivel del mar h_s (km)
- Punto de la tasa de lluvia al 0.01% de un promedio anual $R_{0.01}$ (mm/h)
- Porcentaje de probabilidad de exceso para el cual se va a calcular la atenuación p
- Ángulo de elevación θ (grados)
- Frecuencia f (GHz)
- Ángulo de polarización ξ (grados)
- Radio efectivo de la Tierra $R_e = 8500$ km

Paso 1. Calcular la altura de congelamiento durante la lluvia h_{fr} (km) a partir del valor absoluto de la latitud de la estación:

$$h_{fr} = 5 \quad \text{para } 0^\circ \leq \phi < 23^\circ$$

$$h_{fr} = 5 - 0.075(\phi - 23) \quad \text{para } \phi \geq 23^\circ \quad \text{LI.1}$$

Paso 2. La trayectoria inclinada L_s bajo la altura de congelamiento es obtenida de:

$$L_s = \frac{h_{fr} - h_s}{\text{seno } \theta} \quad (\text{km}) \quad \text{LI.2}$$

Paso 3. La proyección horizontal de la trayectoria inclinada es calculada de:

$$L_g = L_s \cos \theta \quad (\text{km}) \quad \text{LI.3}$$

Paso 4. Se obtiene la intensidad de lluvia $R_{0.01}$ (mm/h) excedida para 0.01% de un promedio anual y se calcula la atenuación específica γ (dB/km) usando los coeficientes ampliamente publicados, dependientes de la polarización y de la frecuencia.^{14 15}

$$\gamma = k(R_{0.01})^\alpha \quad (\text{dB/km}) \quad \text{LI.4}$$

Paso 5. Calcular el factor de ajuste horizontal $rh_{0.01}$ para 0.01% del tiempo

$$rh_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_g \gamma}{f}} - 0.38 [1 - 10^{(-2L_g)}]} \quad \text{LI.5}$$

donde f es la frecuencia en GHz.

Paso 6. Calcular la longitud ajustada del enlace L_r (km) a través de la lluvia

$$L_r = \frac{L_g rh_{0.01}}{\cos \theta} \quad \text{para } \zeta > \theta$$

$$L_r = \frac{h_{fr} - h_s}{\text{seno } \theta} \quad \text{para } \zeta \leq \theta \quad \text{LI.6}$$

donde $\zeta = \tan^{-1} \left(\frac{h_{fr} - h_s}{L_g rh_{0.01}} \right)$

Paso 7. Calcular el factor de ajuste vertical $rv_{0.01}$ para el 0.01% del tiempo.

$$rv_{0.01} = \frac{1}{1 + \frac{\text{seno } \theta}{31 \left(1 - e^{-\theta(1-z)} \right) \sqrt{\frac{L_r \gamma}{f^2}} - 0.45}} \quad \text{LI.7}$$

donde:

$$\chi = 36 - \phi \quad \text{para } \phi < 36^\circ$$

$$\chi = 0 \quad \text{para } \phi \geq 36^\circ$$

Paso 8. La longitud efectiva L_e (km) a través de la lluvia es:

$$L_e = L_r rv_{0.01} \quad \text{LI. 8}$$

Paso 9. La atenuación excedida en 0.01% del promedio anual es obtenida de:

$$A_{0.01} = \gamma L_e \quad (\text{dB}) \quad \text{LI. 9}$$

Paso 10. La atenuación a ser excedida para otras indisponibilidades en el rango de 0.001% a 10% es estimada de la atenuación con indisponibilidad de 0.01% con:

$$A_p = A_{0.01} \left(\frac{p}{0.01} \right)^{-[0.655 + 0.033 \ln p - 0.045 \ln A_{0.01} - \text{seno } \theta (1-p)]} \quad (\text{dB}) \quad \text{LI. 10}$$

Donde p es el porcentaje de indisponibilidad de interés y z está dada por

$$\text{para } p \geq 1\%, \quad z = 0$$

para $p > 1\%$

$$z = 0$$

para $|\phi| \geq 36^\circ$

$$z = -0.005(|\phi| - 36)$$

para $\theta \geq 25^\circ$ y $|\phi| < 36^\circ$

$$z = -0.005(|\phi| - 36) + 1.8 - 4.25 \text{seno } \theta$$

para $\theta < 25^\circ$ y $|\phi| < 36^\circ$

Márgenes de lluvia para México en Banda Ka.

Para los enlaces de subida y de bajada, la Banda Ka tiene asignados los rangos de frecuencias de 17.7 – 21.2 GHz y de 27.5 – 31.00 GHz respectivamente, que corresponden a las ventanas que se definen con la menor absorción atmosférica (Figura 5). La importancia de determinar los márgenes de atenuación por lluvia se encuentra en la confiabilidad del sistema diseñado. Si se pueden conocer éstos márgenes de manera precisa, se puede diseñar un enlace con gran confiabilidad. De esta forma se puede inferir en cuanto al tiempo máximo permitido en el que el enlace se tomará indisponible.

Para el cálculo de los márgenes de atenuación por lluvia se utilizó el modelo Global de distribución de lluvia de Crane. Este modelo se basa en mediciones meteorológicas así como en los diferentes climas para establecer las diferentes zonas de lluvia. Este modelo, combinado con el modelo DAH arrojó los mejores resultados en cuanto a la predicción de atenuación por lluvia durante los experimentos realizados con el ACTS.¹²

Para el cálculo de los ángulos de elevación y Azimut se consideró al satélite ANIK F-2, que estará ubicado en 111.1° de longitud Oeste. Este satélite será lanzado en el año 2002 y prestará servicios en Banda Ka a Norteamérica. Se seleccionaron varias ciudades de nuestro país para obtener los márgenes de atenuación por lluvia. Estas ciudades destacan por su importancia económica además de estar ubicadas en diferentes zonas dentro del mapa de distribución de lluvia del modelo Global de Crane. Para el resto de los municipios de nuestro país, en el disco compacto adjunto, se anexan las características geográficas así como los cálculos de atenuación por lluvia realizados por medio del modelo DAH en diferentes disponibilidades. Estos datos se encuentran en formato Excel (consulte el archivo *leame.doc*).

En la tabla 4 se muestran las características geográficas de las ciudades para las cuales se realizaron los cálculos de atenuación por lluvia en Banda Ka. Asimismo, se incluyen las características del ángulo de elevación y azimut de las estaciones terrenas en éstas ciudades, que serían necesarios para establecer un enlace con el satélite ANIK F2, ubicado en los 111.1° de longitud Oeste.

Se realizaron los cálculos de atenuación por lluvia para diferentes disponibilidades y para los rangos de frecuencia que han sido asignados por la ITU para la Banda Ka. Se ordenaron las diferentes ciudades dependiendo de la Zona de lluvia en la que se ubican. Los resultados se muestran en la tabla 5, en donde se puede observar que la variación de la atenuación por lluvia está en

función directa de la frecuencia. En las frecuencias más altas, la atenuación por lluvia se incrementa de manera significativa. Aunado a esto, la atenuación depende del grado de disponibilidad que se requiera en el sistema de comunicaciones; por ejemplo, los valores de atenuación por lluvia para una disponibilidad del 99.99% se triplican en relación con aquellos que se obtienen con una disponibilidad del 99.9%. Esto representa, en términos económicos, una inversión mucho más grande en un sistema que se encuentre disponible casi la totalidad del tiempo de funcionamiento, que en otro que tiene una menor disponibilidad, pero que representa en términos de tiempo de funcionamiento valores similares a los del primero. En el ejemplo mencionado ésta diferencia de tiempo representa tan solo 7.8 horas de indisponibilidad distribuidas en todo el año, es decir, casi un tercio del día que resulta despreciable en comparación con el tiempo de disponibilidad.

Tabla 4. Características geográficas de las ciudades seleccionadas

Ciudad	Altura hs (km)	Latitud N (°)	Longitud O (°)	Elevación	Azimut	Zona
Saltillo	1.60	25.42	101.00	58.20	202.54	D1
Guadalajara	1.54	20.68	103.35	64.20	201.07	D1
Puerto Vallarta	0.04	20.62	105.23	64.92	196.27	D1
Monterrey	0.54	25.67	100.32	57.66	203.74	D1
Mazatlán	0.01	23.23	106.42	62.29	191.73	D1
Nuevo Laredo	0.15	27.48	99.52	55.43	203.95	D1
México D.F. (Cuauhtémoc)	2.24	19.43	99.15	63.43	212.46	D2
Guanajuato	2.00	21.02	101.25	62.94	205.83	D2
Tulancingo	2.14	20.08	98.37	62.33	213.35	D2
Cuernavaca	1.51	18.92	99.23	63.98	212.95	D2
Oaxaca de Juárez	1.55	17.07	96.72	64.02	221.15	D2
San Luis Potosí	1.86	22.15	100.97	61.63	205.36	D2
Heroica Matamoros	0.01	25.87	97.50	56.16	209.01	D2
Tampico	0.01	22.22	97.87	59.97	211.88	D2
Zacatecas	2.42	22.77	102.57	61.65	201.19	D2
Xalapa-Enríquez	1.46	19.53	96.92	61.94	217.08	D3
Veracruz	0.01	19.20	96.13	61.72	219.11	D3
Ensenada	0.02	31.87	116.62	52.42	169.63	F
Paz, La	0.03	24.15	110.32	61.73	181.91	F
Hermosillo	0.21	29.12	110.97	56.04	180.27	F
Campeche	0.01	19.83	90.53	57.01	227.88	G
Tapachula de Córdova y Ordóñez	0.16	14.90	92.27	62.09	232.99	G
Tuxtla Gutiérrez	0.52	16.75	93.12	61.47	228.40	G
Acapulco de Juárez	0.02	16.87	99.90	66.37	214.31	G
Cancún	0.01	21.17	86.83	53.00	231.31	G
Villahermosa	0.01	17.98	92.93	60.36	226.74	G
Mérida	0.01	20.97	89.62	55.41	227.72	G

Ciudad	Zona	Banda	DISPONIBILIDAD																	
			99.99	99.98	99.95	99.925	99.9	99.8	99.5	99.25	99									
Saltillo	D1	Rx (17.2-21.2)	12.11	19.26	9.38	15.15	6.35	10.48	4.64	7.71	3.76	6.29	2.82	4.79	1.60	2.76	1.22	2.12	0.99	1.74
		Tx (21.5-31)	30.58	35.95	24.38	28.71	17.14	20.34	12.74	15.16	10.46	12.47	6.08	9.68	4.74	5.72	3.68	4.45	3.69	3.69
Guadalajara	D1	Rx (17.2-21.2)	12.74	20.36	10.04	18.30	6.96	11.52	4.84	8.08	3.73	6.21	3.01	5.13	1.70	2.95	1.29	2.21	1.06	1.87
		Tx (21.5-31)	32.50	38.70	26.37	31.15	18.95	22.56	13.44	16.03	10.49	12.53	8.70	10.45	5.11	6.18	3.98	4.80	3.28	3.98
Puerto Vallarta	D1	Rx (17.2-21.2)	16.08	25.74	12.71	20.74	8.94	14.80	6.31	10.54	4.82	8.10	3.92	6.68	2.24	3.90	1.71	3.00	1.40	2.47
		Tx (21.5-31)	41.34	48.82	33.81	40.13	24.60	29.40	17.67	21.18	13.67	16.12	11.43	13.61	6.61	8.28	5.28	6.45	4.38	5.35
Monterrey	D1	Rx (17.2-21.2)	14.52	23.03	11.29	18.22	7.70	12.66	5.65	9.37	4.57	7.62	3.47	5.87	1.98	3.41	1.51	2.63	1.24	2.17
		Tx (21.5-31)	36.76	43.25	29.43	34.80	20.85	24.82	15.57	18.56	12.74	15.24	9.95	11.97	5.95	7.14	4.98	5.87	3.80	4.62
Mazatlán	D1	Rx (17.2-21.2)	16.00	25.55	12.59	20.40	8.71	14.39	6.30	10.62	5.09	8.63	3.88	6.60	2.23	3.85	1.70	2.97	1.39	2.45
		Tx (21.5-31)	40.97	48.35	33.20	39.38	23.88	28.52	17.77	21.29	14.36	17.24	11.28	13.62	6.72	8.17	5.23	6.37	4.33	5.29
Nuevo Laredo	D1	Rx (17.2-21.2)	16.09	23.95	11.68	19.21	7.92	12.99	5.93	9.82	5.02	8.35	3.82	6.11	2.07	3.58	1.58	2.79	1.30	2.21
		Tx (21.5-31)	38.11	44.85	30.37	35.92	21.59	25.46	16.29	19.46	13.95	16.69	10.34	12.44	6.15	7.45	4.78	5.81	3.97	4.93
Cuahuahimoc (D F)	D2	Rx (17.2-21.2)	13.19	20.99	10.44	16.86	7.28	11.97	4.87	8.08	4.07	6.76	3.13	5.31	1.77	3.05	1.35	2.35	1.10	1.93
		Tx (21.5-31)	33.18	38.81	27.03	31.77	19.57	23.15	13.32	15.80	11.26	13.39	8.92	10.66	5.23	6.29	4.06	4.89	3.36	4.06
Guajuato	D2	Rx (17.2-21.2)	19.89	22.09	10.95	17.68	7.60	12.51	5.26	8.74	4.12	6.88	3.31	5.61	1.88	3.24	1.43	2.40	1.17	2.06
		Tx (21.5-31)	34.98	40.96	28.40	33.42	20.47	24.25	14.42	17.13	11.43	13.80	9.45	11.31	5.58	6.70	4.32	5.22	3.58	4.33
Tulancingo	D2	Rx (17.2-21.2)	13.49	21.44	10.66	17.10	7.41	12.18	5.00	8.28	3.95	6.59	3.21	5.43	1.81	3.13	1.38	2.41	1.13	1.98
		Tx (21.5-31)	33.88	39.64	27.56	32.39	19.90	23.55	13.64	16.19	10.91	12.98	9.13	10.91	5.36	6.45	4.16	5.02	3.44	4.16
Cuernavaca	D2	Rx (17.2-21.2)	19.37	24.46	12.25	19.78	8.61	14.17	5.73	9.52	4.52	7.55	3.73	6.32	2.12	3.66	1.62	2.82	1.33	2.32
		Tx (21.5-31)	38.86	45.60	31.87	37.69	23.28	27.63	15.76	18.77	12.58	15.01	10.68	12.80	6.31	7.62	4.91	5.94	4.06	4.93
Oaxaca	D2	Rx (17.2-21.2)	15.33	24.38	12.28	19.82	8.69	14.30	5.55	9.21	4.48	7.47	3.72	6.30	2.12	3.65	1.62	2.81	1.32	2.31
		Tx (21.5-31)	38.69	45.38	31.91	37.61	23.46	27.84	15.23	18.12	12.44	14.83	10.66	12.76	6.29	7.58	4.88	5.91	4.04	4.90
S L Potosí	D2	Rx (17.2-21.2)	14.27	22.68	11.22	18.06	7.76	12.75	5.46	9.04	4.49	7.48	3.41	5.77	1.94	3.34	1.46	2.57	1.21	2.12
		Tx (21.5-31)	35.51	42.07	29.06	34.22	20.87	24.73	14.92	17.73	12.42	14.79	9.73	11.64	5.74	6.91	4.46	5.38	3.69	4.47
Matamoros	D2	Rx (17.2-21.2)	18.48	29.21	14.47	23.20	9.95	16.25	7.30	12.03	6.21	10.29	4.56	7.66	2.63	4.51	2.02	3.49	1.66	2.89
		Tx (21.5-31)	46.44	54.63	37.41	44.23	26.72	31.80	19.94	23.81	17.16	20.53	12.97	15.59	7.77	9.41	6.06	7.36	5.04	6.13
Tampico	D2	Rx (17.2-21.2)	19.02	30.15	15.08	24.25	10.54	17.27	7.37	12.18	6.23	10.47	4.73	7.98	2.73	4.69	2.09	3.63	1.71	2.90
		Tx (21.5-31)	48.10	56.66	39.26	46.48	28.50	33.96	20.27	24.24	17.52	21.00	13.55	16.32	8.13	9.86	6.34	7.71	5.26	6.41
Zacatecas	D2	Rx (17.2-21.2)	12.55	19.95	9.81	15.83	6.73	11.07	4.79	7.95	4.15	6.92	2.95	4.99	1.66	2.87	1.27	2.21	1.04	1.82
		Tx (21.5-31)	31.48	36.79	25.33	29.74	18.05	21.33	13.06	15.49	11.45	13.60	8.37	9.96	4.90	5.80	3.80	4.58	3.15	3.60
Xalapa	D3	Rx (17.2-21.2)	18.81	29.73	15.04	24.11	10.62	17.36	7.10	11.70	6.24	10.34	4.68	7.87	2.68	4.61	2.06	3.56	1.69	2.94
		Tx (21.5-31)	47.04	55.12	38.70	45.57	28.39	33.84	19.30	22.94	17.15	20.43	13.25	15.86	7.90	9.52	6.16	7.45	5.12	6.20
Veracruz	D3	Rx (17.2-21.2)	23.05	36.42	18.57	29.76	13.24	21.62	8.81	14.51	7.86	13.02	5.90	9.92	3.43	5.88	2.84	4.55	2.16	3.78
		Tx (21.5-31)	58.03	68.32	48.11	56.92	35.63	42.44	24.12	28.82	21.77	26.07	16.83	20.25	10.17	12.32	7.94	9.65	6.59	8.03
Ensenada	F	Rx (17.2-21.2)	10.86	17.35	8.21	13.32	5.41	8.94	4.31	7.18	3.56	5.97	2.48	4.22	1.40	2.43	1.07	1.86	0.87	1.54
		Tx (21.5-31)	27.69	32.64	21.57	25.58	14.76	17.60	11.96	14.31	10.00	11.90	7.17	8.64	4.21	5.10	3.26	3.97	2.70	3.29
Paz, La	F	Rx (17.2-21.2)	11.60	18.68	9.01	14.73	6.13	10.22	4.56	7.70	3.59	6.07	2.69	4.62	1.52	2.67	1.16	2.05	0.94	1.68
		Tx (21.5-31)	30.10	35.61	24.09	28.64	17.05	20.41	12.96	15.57	10.28	12.37	7.95	9.61	4.68	5.70	3.82	4.42	2.99	3.66
Hermosillo	F	Rx (17.2-21.2)	10.77	17.25	8.21	13.35	5.46	9.05	4.24	7.06	3.46	5.83	2.46	4.20	1.39	2.42	1.06	1.85	0.86	1.52
		Tx (21.5-31)	27.63	32.60	21.70	25.73	15.00	17.91	11.85	14.19	9.80	11.77	7.17	8.65	4.21	5.11	3.25	3.97	2.69	3.29
Campeche	G	Rx (17.2-21.2)	29.49	46.12	23.83	37.80	17.08	27.58	11.38	18.53	9.67	15.83	7.80	12.96	4.59	7.76	3.54	6.04	2.91	5.00
		Tx (21.5-31)	73.01	85.75	60.70	71.65	45.14	53.64	30.58	36.44	26.31	31.42	21.82	26.19	13.32	16.10	10.45	12.66	8.70	10.56
Tapachula	G	Rx (17.2-21.2)	29.49	46.26	24.25	38.60	17.75	28.79	10.87	17.78	9.04	14.87	7.84	13.07	4.60	7.82	3.54	6.07	2.91	5.02
		Tx (21.5-31)	73.44	86.26	62.13	73.37	47.23	55.15	29.41	36.07	24.75	29.56	22.08	26.51	13.46	16.27	10.54	12.78	8.76	10.64
Tuxtla G	G	Rx (17.2-21.2)	28.07	44.04	22.91	36.46	16.82	26.94	10.54	17.23	8.70	14.30	7.40	12.34	4.33	7.36	3.34	5.71	2.74	4.73
		Tx (21.5-31)	69.78	81.92	58.60	69.14	44.13	52.41	28.47	33.91	23.77	28.37	20.80	24.95	12.64	15.26	9.00	11.96	8.24	10.00
Acapulco	G	Rx (17.2-21.2)	30.00	47.34	24.59	39.35	17.93	29.24	11.72	19.28	9.28	15.35	7.98	13.39	4.69	8.01	3.61	6.23	2.97	5.16
		Tx (21.5-31)	75.85	89.15	63.82	75.60	48.35	57.65	32.15	36.45	25.16	30.88	22.79	27.45	13.91	16.87	10.91	13.27	9.08	11.07
Cancún	G	Rx (17.2-21.2)	29.59	46.12	23.78	37.58	16.92	27.23	11.47	18.60	9.82	16.02	7.82	12.94	4.60	7.76	3.55	6.03	2.92	5.00
		Tx (21.5-31)	72.71	85.28	60.09	70.83	44.36	52.64	30.56	36.37	28.48	31.57	21.69	25.99	13.25	15.89	10.39	12.51	8.66	10.40
Villahermosa	G	Rx (17.2-21.2)	29.63	46.47	24.12	38.36	17.44	28.26	11.32	18.49	9.69	16.25	7.86	13.09	4.62	7.84	3.56	6.03	2.93	5.04
		Tx (21.5-31)	73.77	86.79	61.79	73.02	46.39	55.16	30.60	36.51	27.07	32.36	22.12	26.58	13.50	16.33	10.56	12.84	8.81	10.71
Mérida	G	Rx (17.2-21.2)	29.45	46.00	23.71	37.55	16.90	27.26	11.45	18.63	10.45	17.10	7.78	12.90	4.58	7.73	3.53	6.01	2.91	4.90
		Tx (21.5-31)	72.72	85.36	60.21	71.05	44.55	52.92	30.70	36.57	28.34	33.83	21.70	26.03	13.25	16.00	10.39	12.68	8.66	10.51

Tabla 5 Márgenes de atenuación por lluvia en Banda Ka para diferentes ciudades en México

Es aquí en donde es necesario, para el diseño de un sistema, ponderar en cuanto a costos, disponibilidades, importancia del servicio y algunos otros factores que de deben considerar. Por ejemplo, para aplicaciones de telefonía y acceso a Internet de tipo rural, el tener una disponibilidad alta debe ser evaluada con la prioridad de economizar el sistema. En la tabla 6 se muestran los grados de disponibilidad con sus correspondientes valores en tiempo por año.

Tabla 6. Grados de disponibilidad y sus valores en tiempo/año

Disponibilidad (%)	Porcentaje excedido (%)	Tiempo de interrupción (h/año)	Tiempo de interrupción (días/año)
99.00	1.00	87.60	3.65
99.25	0.75	65.70	2.74
99.50	0.50	43.80	1.83
99.80	0.20	17.52	0.73
99.90	0.10	8.76	0.36
99.93	0.08	6.57	0.27
99.95	0.05	4.38	0.18
99.98	0.02	1.75	0.07
99.99	0.01	0.88	0.04

Los valores presentados en la tabla 5 representan el cálculo más preciso que se tiene hasta hoy para los márgenes de atenuación por lluvia que se debieran considerar para el cálculo de enlaces satelitales en Banda Ka en territorio mexicano. Aunque estos cálculos se hayan realizado para un satélite que no estará ubicado en las posiciones de los satélites mexicanos, la variación de márgenes obtenidos, con los que se pudieran obtener a partir de otros datos no sería significativa. El modelo DAH, en su totalidad, presenta errores menores al 20%*. Tomando en cuenta que la variación de la lluvia que se presenta en un enlace dado es del orden de 20%¹⁶, la exactitud para predecir la atenuación a través de un enlace de este método es comparable con este valor.

En las diferentes regiones de nuestro país es posible establecer márgenes de atenuación por lluvia para las diferentes disponibilidades. La tabla 7 muestra los diferentes rangos de atenuación para distintos grados de disponibilidad. Asimismo, se muestra en la figura 8, la distribución de las zonas que se utilizaron y que corresponden al modelo global de distribución de lluvia de Crane.

En las figuras 9 y 10 se muestra el comportamiento de los márgenes de atenuación por lluvia para algunas ciudades listadas anteriormente, correspondiendo cada una a una zona climática diferente. Se muestran los niveles de atenuación por lluvia en dos frecuencias distintas (20.2 GHz y 27.5 GHz) que se encuentran ubicadas en el rango de frecuencias de transmisión y se recepción para un satélite en Banda Ka y que fueron utilizadas en los experimentos realizados con el ACTS.

* Ref. 6, p. 1555

Tabla 7. Rangos de atenuación por zonas de lluvia para México

Zona		99.99	99.98	99.95	99.925	99.9	99.8	99.5	99.25	99
D1	Rx	12.0 25.7	9.4 20.7	6.4 14.8	4.6 10.6	3.7 8.4	2.8 6.7	1.6 3.9	1.2 2.1	1.0 2.5
	Tx	30.6 48.8	24.4 39.4	17.1 29.4	12.7 21.3	10.5 17.2	8.1 13.8	4.7 8.3	3.7 6.5	3.0 5.4
D2	Rx	12.6 30.2	9.8 24.3	6.7 17.3	4.8 12.2	4.1 10.5	3.0 8.0	1.7 4.7	1.3 3.6	1.0 3.0
	Tx	31.5 56.7	25.3 46.5	18.1 34.0	13.1 24.2	10.9 21.0	8.4 16.3	4.9 9.9	3.8 7.7	3.2 6.4
D3	Rx	18.8 36.4	15.0 29.8	10.6 21.6	7.1 14.5	6.2 13.0	4.7 9.9	2.7 5.9	2.1 4.6	1.7 3.8
	Tx	47.0 68.3	38.7 56.9	28.4 42.4	19.3 28.8	17.2 26.1	13.3 20.3	7.9 12.3	6.2 9.7	5.1 8.0
F	Rx	10.8 18.7	8.2 14.7	5.4 10.2	4.2 7.7	3.5 6.1	2.5 4.6	1.4 2.7	1.1 2.1	0.9 1.7
	Tx	27.6 32.6	21.6 28.6	14.8 20.4	11.9 15.6	9.8 12.4	7.2 9.6	4.2 5.7	3.3 4.4	2.7 3.7
G	Rx	28.1 47.3	22.9 39.4	16.6 29.2	10.5 19.3	8.7 17.1	7.4 13.4	4.3 8.0	3.3 6.2	2.7 5.2
	Tx	69.8 89.2	58.6 75.6	44.1 57.7	29.4 36.6	23.8 33.8	20.1 27.5	12.6 16.9	9.9 13.3	8.2 11.1

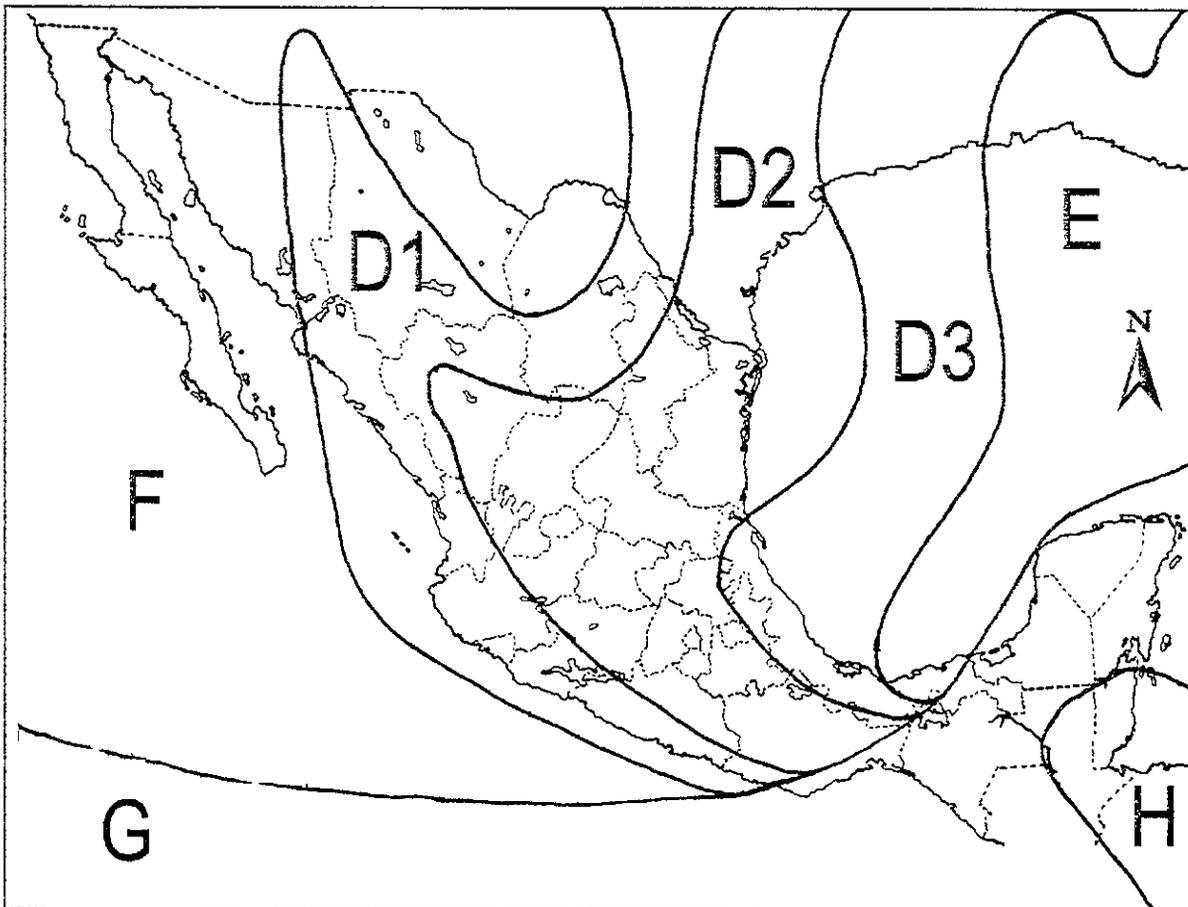


Figura 8. Zonas de lluvia del modelo Global de Crane para México

Atenuación por lluvia a 27.5 GHz

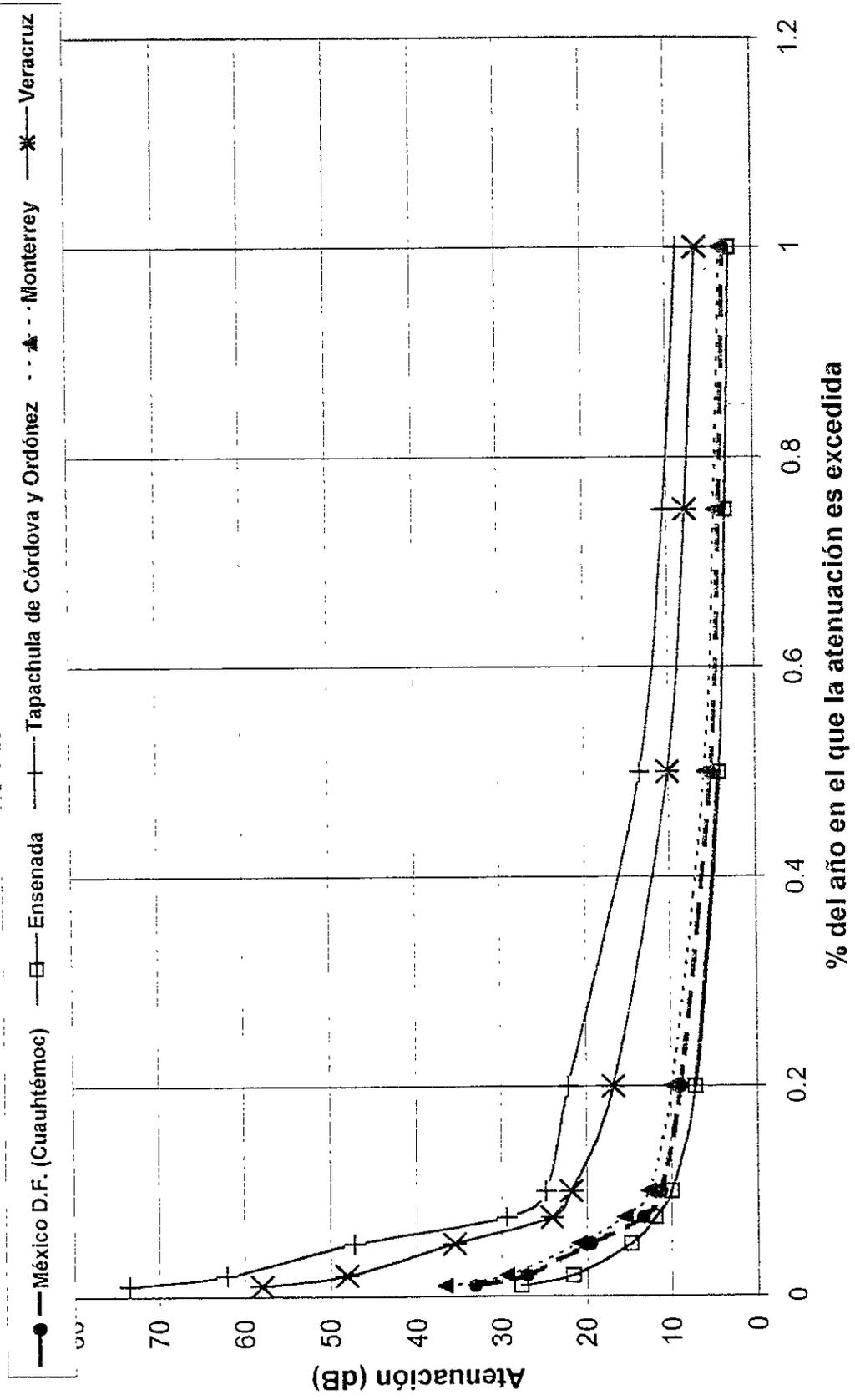


Figura 9. Comportamiento de la atenuación por lluvia para diferentes ciudades de México utilizando el modelo DAI a 27.5 GHz

Atenuación por lluvia a 20.2 GHz

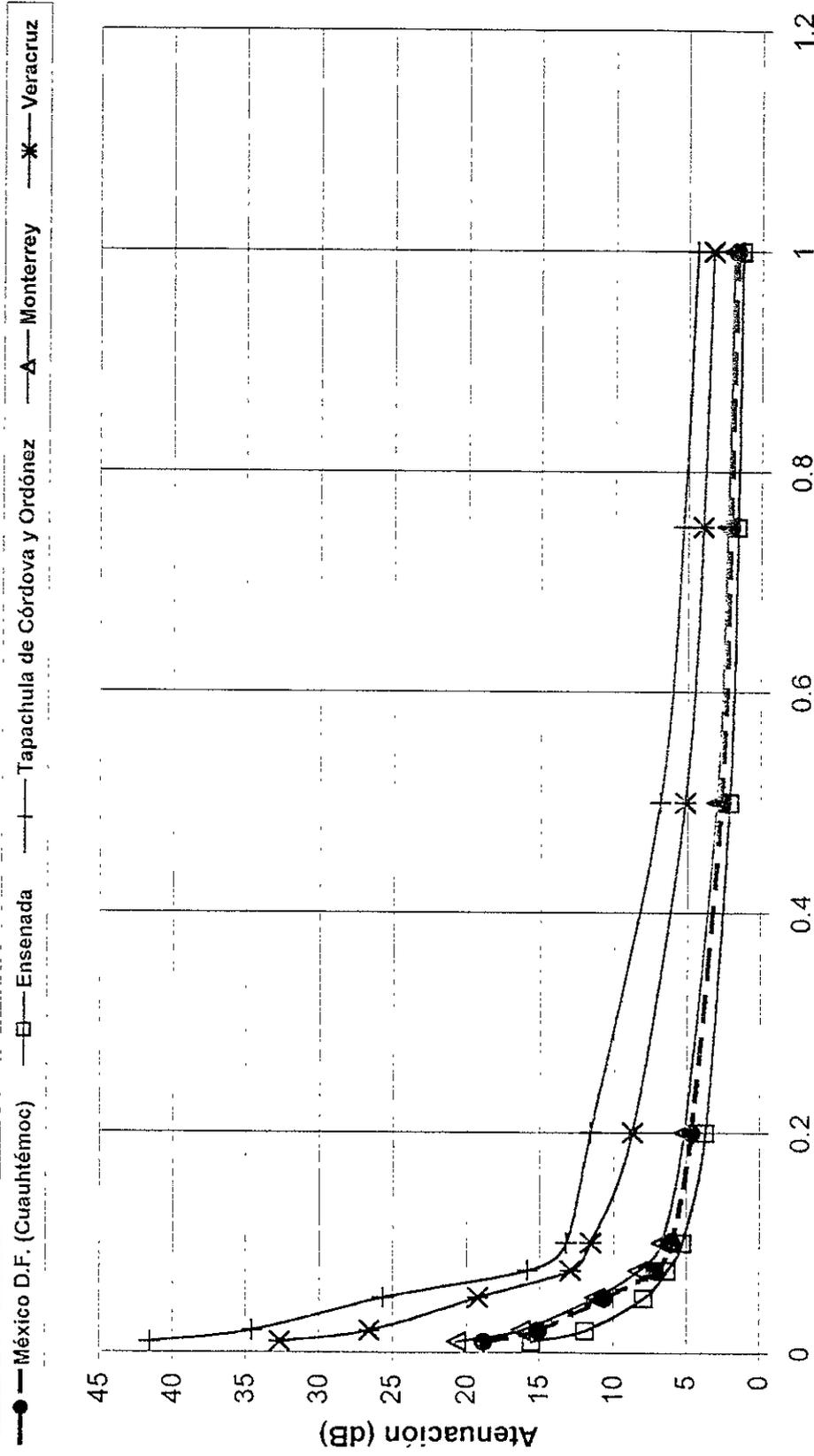


Figura 10. Comportamiento de la atenuación por lluvia para diferentes ciudades de México utilizando el modelo DAH a 20.2 GHz

El modelo empleado para los cálculos de atenuación por lluvia en Banda Ka fue validado con los resultados experimentales con el ACTS por diversos investigadores de Estados Unidos a través de varios estudios. En las figuras 11 y 12 se muestra el comportamiento de la predicción de atenuación por lluvia que se obtuvo a partir del modelo DAH para Ciudad Mante, Tamaulipas a 20.2 GHz y a 27.5 GHz, respectivamente. Esta localidad se encuentra ubicada en 22.75° de latitud norte y 98.97° de longitud Oeste a 80 metros sobre el nivel del mar y en la zona G2 del mapa de distribución de lluvia del modelo Global de Crane.

Figura 11.

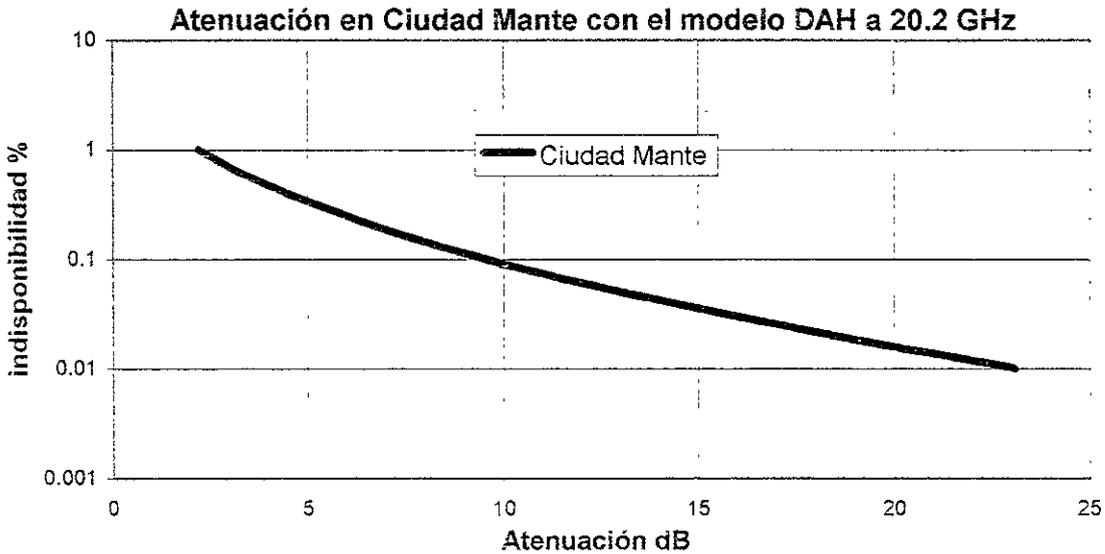
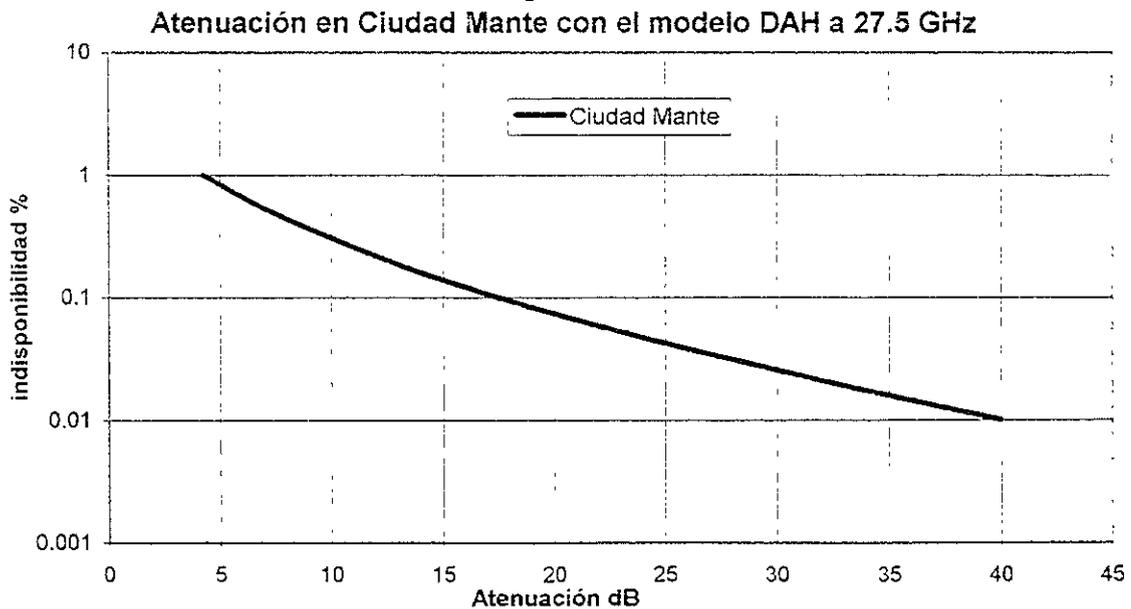


Figura 12.



Este municipio cuenta con características de altura y zona climática idénticas a las que tenía la estación de Reston, VA, en los Estados Unidos y que fue empleada para la recopilación de datos durante el experimento de propagación del ACTS junto con otras seis estaciones ubicadas en diferentes sitios. En las figuras 13 y 14 se muestran los valores de atenuación por lluvia provenientes de mediciones directas con el ACTS.

Figura 13. Atenuación por lluvia a 20.2 GHz. Datos recopilados con el ACTS

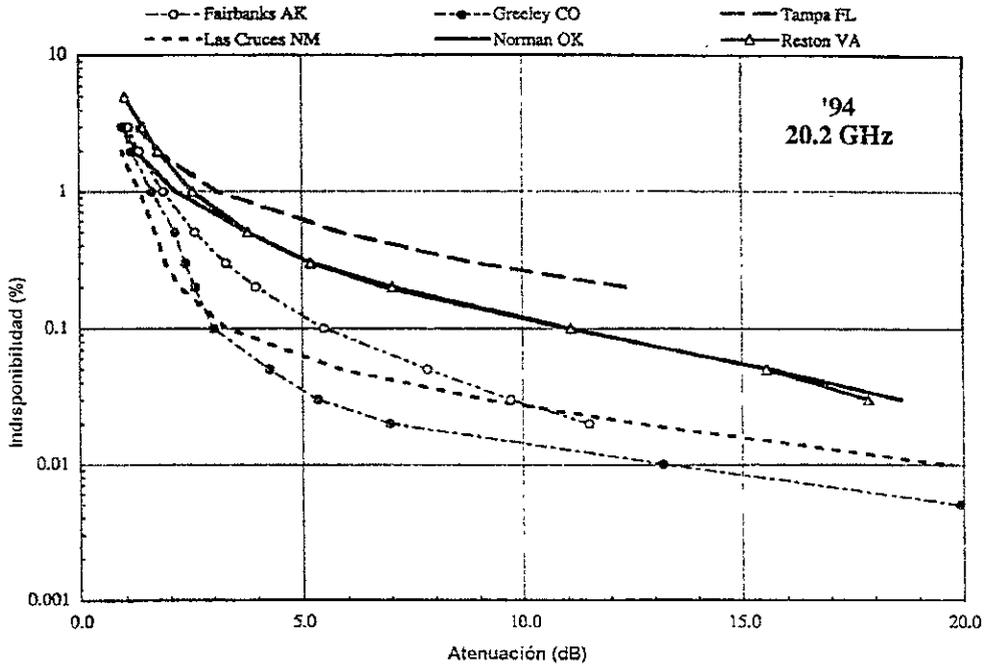
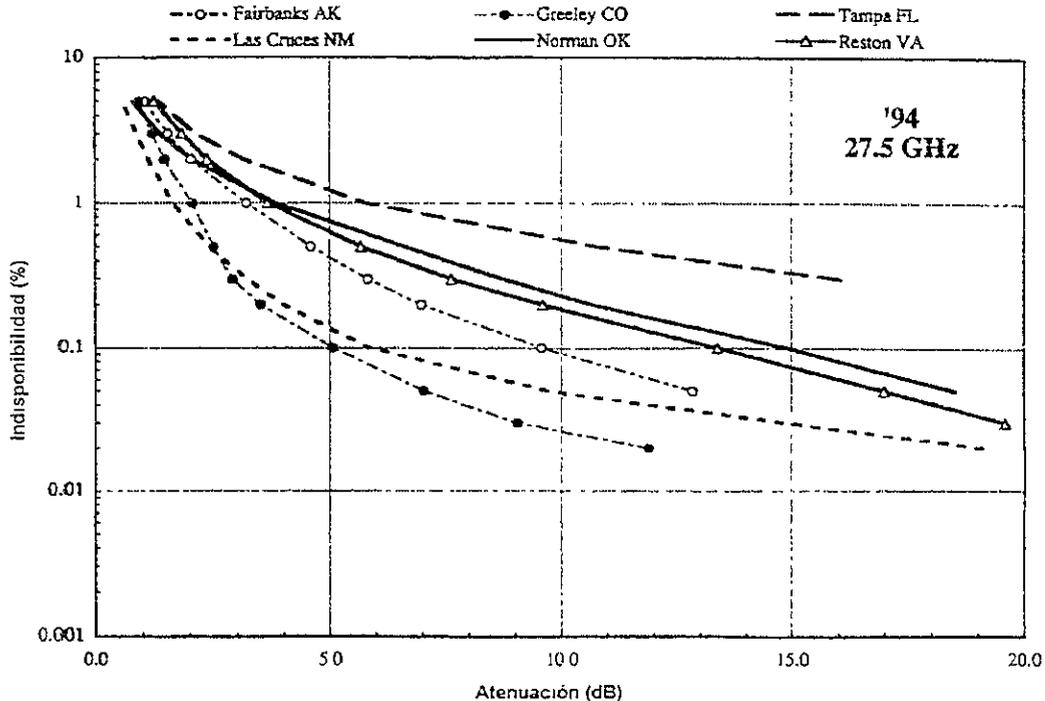


Figura 14. Atenuación por lluvia a 27.5 GHz. Datos recopilados con el ACTS



Como se podrá observar, comparando las figuras 11 y 12 con las curvas correspondientes a Reston, VA en las gráficas 13 y 14, no existe una diferencia significativa entre los valores medidos con los valores predichos para Ciudad Mante, Tamaulipas. Las diferencias existentes pueden ser atribuibles a la variación natural de la precipitación y a la diferencia entre de los ángulos de elevación, necesarios para el enlace con el ACTS, producida por la diferencia en cuanto a latitud y longitud

Los resultados expuestos en este capítulo se podrían mejorar si se contara con mapas de lluvia más precisos para la República Mexicana. Esto requiere, por supuesto, un estudio extenso que pudiera arrojar datos precisos para cada localidad. Para nuestro país no existieron experimentos con los que se pudieran validar los resultados aquí obtenidos. Sobre la importancia de estos resultados se abundará en el último capítulo. —

Referencias

1. H. J. Liebe *Atmospheric Propagation Properties in the 10 to 75 GHz Region: A Survey and Recommendations*. ESSA Technical Report ERL 130-ITS 91. Boulder Co 1969.
2. Professional Reference. *Reference Data for Engineers: Radio, Electronics, Computers and Communication*. Eighth Edition. Pp 27-38
3. A. W. Dissanayake and N. J. McEwan, "Radar and attenuating properties of rain and bright band", *IEE Conf. Publ. 169-2*, pp. 125-129, 1978.
4. Bhartia P. y Bahl I. J. *Millimeter wave engineering and applications*. Canadá: John Wiley and Sons, 1984. Pp 185-190.
5. Collier, Christopher G *Applications of weather radar systems. A guide to uses of radar data in meteorology and hydrology*. U.S.A.: Paraxis Publishing Ltd., 1996.
6. A. W. Dissanayake, J. E. Allnutt y F. Haidara, "A prediction model that combines rain attenuation and other impairments along earth-space paths" *IEEE Trans Antennas Propagation*, vol. 45, no. 10, p 1547-1558, 1997.
7. Crane, Robert K., *Electromagnetic wave propagation through rain*. Wiley series in remote sensing. New York: Wiley, 1996
8. Landeros Ayala S., Neri Vela R. y Núñez Aceves I "Cálculo de los márgenes de atenuación por lluvia para un futuro satélite mexicano en banda Ka", *Ingeniería LVII*. 4 271-278. Facultad de Ingeniería, UNAM. México, 1997 pp. 271-278
9. Glenn S. Feldhake y Lynn Ailes-Sengers "Comparison of multiple rain models with three years of Ka Band propagation data concurrently taken at eight different locations". Sorrento, Italy: Third Ka Band Utilization Conference. 1997.
10. P. L. Rice y N. R. Holmberg. "Cumulative time statistics of surface point rainfall rates" *IEEE Trans. Commun*, vol 21 pp1131-1136. Oct 1973.
11. R. K. Crane y Asoka W. Dissanayake "ACTS Propagation Experiment: attenuation distribution observations and prediction model comparisons" *Proc IEEE*, Vol. 85, no. 6, p. 879-892, jun. 1997
12. "Propagation data and prediction methods required for Earth-Space telecommunication systems", Recommendation ITU-R P.618-4, ITU-R Recommendations. P-Series Fascicle, ITU, Geneva 1995.
13. A. Paraboni, "Testing of rain attenuation prediction methods against the measured data contained in the ITU-R data bank," ITU-R Study Group 3. Document, SR2-95/6, Geneva, 1995.
14. "Specific attenuation model for rain for use in prediction methods" Recommendation CCIR 838, 1992.
15. ITU Recommendation ITU-R RPN 837, 1995
16. R. K. Crane, "Estimating risk of earth-satellite attenuation prediction", *IEEE Proc*, vol. 81, pp 905-913, 1993

Capítulo 5. Cálculos de enlace.

Antecedentes.

Para la realización de los cálculos de enlace se revisan algunos conceptos básicos que se emplearán en el proceso de cálculo.

Ganancia de una antena y patrón de radiación.

$$G_{\max} = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (1)$$

donde

D = diámetro de la antena (m)

λ = longitud de onda = $\frac{c}{f}$ (m)

c = velocidad de la luz = 3×10^8 (m/s)

f = frecuencia (Hz)

η = eficiencia de la apertura de la antena (0.6 típico)

$$[G_{\max}]_{dB} = 10 \log G_{\max}$$

Ancho del haz

El ancho del haz se define como aquél en el que la potencia de radiación de una antena se reduce a la mitad de su potencia de radiación máxima ($P_{\max} - 3dB$).

En la figura 1 se puede observar que el patrón de radiación de una antena, se muestra el lóbulo principal y el ancho del haz.

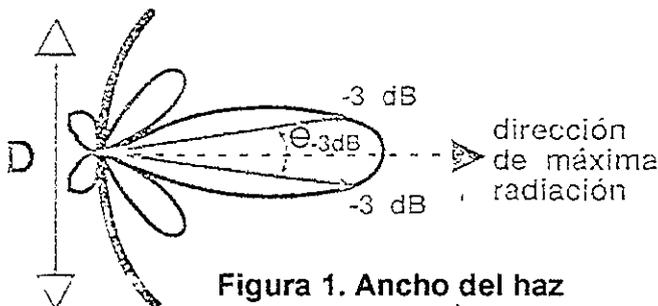


Figura 1. Ancho del haz

$$\theta_{-3dB} = 70 \left(\frac{\lambda}{D} \right) \text{ (grados)} \quad (2)$$

Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (PIRE - EIRP)

Depende de la dirección en la que se toma.

$$PIRE_{\alpha} = P_T G_{T\alpha}$$

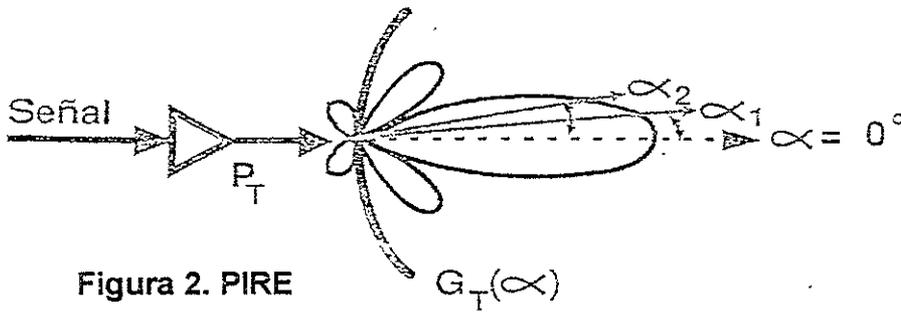


Figura 2. PIRE

$$[G_{T_\alpha}]_{dB} = [G_{\max}]_{dB} - 12 \left(\frac{\alpha}{\theta_{-3dB}} \right)^2 \quad (3)$$

$$PIRE_{\max} = P_T G_{\max}$$

$$[PIRE_{\max}]_{dBW} = [P_T]_{dBW} + [G_{\max}]_{dB}$$

$$[PIRE_\alpha]_{dBW} = [P_T]_{dBW} + [G_{\max}]_{dB} - 12 \left(\frac{\alpha}{\theta_{-3dB}} \right)^2$$

El factor $12 \left(\frac{\alpha}{\theta_{-3dB}} \right)^2$ también es conocido como pérdidas por desapuntamiento.

El factor $[P_T]_{dBW}$ se refiere a la potencia que llega a la entrada de la antena. Considera entonces las pérdidas desde el amplificador de alta potencia (HPA) hasta la entrada de la antena, que son por lo general muy pequeñas y son producidas por los alimentadores. Tomando en cuenta esto:

$$[PIRE_\alpha]_{dBW} = [P_{HPA}]_{dBW} - L_{HPA-Antena} + [G_{\max}]_{dB} - 12 \left(\frac{\alpha}{\theta_{-3dB}} \right)^2$$

Densidad de flujo en el punto receptor

Suponiendo que nuestro transmisor es una fuente isotrópica, la densidad de flujo es, como su nombre lo indica, la potencia contenida en una unidad de área y que es recibida por nuestro receptor. El patrón de radiación de nuestra fuente isotrópica es una esfera. La densidad de potencia a cualquier distancia se calcula suponiendo que la potencia total irradiada se encuentra distribuida de igual forma sobre la superficie de la esfera. A esta densidad de potencia se le conoce como densidad isotrópica. Si esta densidad isotrópica es afectada por medio de una ganancia en la antena transmisora se obtiene la densidad de flujo.

$$F = \frac{P_T}{4\pi R^2} G_T \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (4)$$

Potencia total recibida

La potencia recibida por un área A efectiva es:

$$Pot_{A} = FA_{ef} \text{ (W)} \quad (5)$$

La ganancia de una antena en función de su área física es:

$$G_{\max} = \eta \frac{4\pi A_{física}}{\lambda^2} \quad (6)$$

siendo

$$A_{ef} = \eta A_{física} \text{ (m}^2\text{)}$$

así, el área efectiva en términos de la Ganancia de la antena de recepción es:

$$A_{ef} = G_R \frac{\lambda^2}{4\pi} \text{ (m}^2\text{)}$$

por lo que la Potencia total recibida es:

$$P_{TR} = FA_{ef} = P_T G_T \left(\frac{1}{4\pi R^2} \right) G_R \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right) = P_T G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 = \frac{P_T G_T G_R}{L_{el}} \text{ (W)} \quad (7)$$

$$P_{TR} = \frac{PIRE(G_R)}{L_{el}} \text{ (W)} \quad (8)$$

donde:

$L_{el} = \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2$ es la atenuación o pérdida de potencia por propagación en el espacio libre

$$[L_{el}]_{dB} = 10 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) = 20 \log \left(\frac{4\pi R f}{c} \right) = 20 \log \left(\frac{4\pi R_{(km)} \times 10^3 f_{(MHz)} \times 10^6}{3 \times 10^8} \right)$$

$$[L_{el}]_{dB} = 20 \log \left(\frac{4\pi}{3} \right) + 20 \log(R_{(km)}) + 20 \log(f_{(MHz)})$$

$$[L_{el}]_{dB} = 20 \log \left(\frac{4\pi}{0.3} \right) + 20 \log(R_{(km)}) + 20 \log(f_{(MHz)})$$

$$[L_{el}]_{dB} = 32.44 + 20 \log(R_{(km)}) + 20 \log(f_{(MHz)}) \quad (9)$$

así:

$$[P_{TR}]_{dBW} = [PIRE]_{dBW} + [G_R]_{dB} - [L_{el}]_{dB} \quad (10)$$

Otras pérdidas adicionales.

- Pérdidas debidas a la alimentación de la antena de transmisión. Se consideran la totalidad de las pérdidas ocasionadas por el alimentador,

conexiones, etc. ($L_{HPA-AntTx}$) en la trayectoria que va desde el amplificador de alta potencia (HPA) hasta la entrada de la antena de transmisión.

- Pérdidas debidas a la recepción en el LNA. Se considera la totalidad de las pérdidas ocasionadas por el alimentador del LNA ($L_{AntRx-LNA}$). Estas pérdidas se producen entre otras cosas por las conexiones y por pérdidas en el alimentador en el trayecto que va desde la antena de recepción hasta la entrada del LNA.

- Pérdidas por desapuntamiento de las antenas. Es el factor que se adiciona cuando el PIRE que se está tomando en cuenta no corresponde al PIRE máximo ($\alpha=0$).

$$(L_D)_{Tx} = 12 \left(\frac{\alpha_{Tx}}{\theta_{-3dB Tx}} \right)^2 \quad (\text{dB})$$

$$(L_D)_{Rx} = 12 \left(\frac{\alpha_{Rx}}{\theta_{-3dB Rx}} \right)^2 \quad (\text{dB}) \quad (11)$$

- Pérdidas por Absorción atmosférica. Estas pérdidas se trataron en el capítulo anterior. Son las pérdidas producidas por absorción por gases (O_2 y vapor de agua). Para cuestiones prácticas, la atenuación debida a absorción por gases se puede calcular de la siguiente forma:

1. Leer el valor de la atenuación total por gases de la figura 6; capítulo 4 para un ángulo de elevación de 90° a la frecuencia deseada.

2. Dividir este valor por el seno del ángulo de elevación.

Esta aproximación no produce errores significantes y es sencilla en su aplicación para ángulos mayores a 50° como es el caso de México.

- Pérdidas por lluvia. Estas pérdidas se han descrito en el capítulo anterior. Dependen de la zona geográfica en la que se localiza la estación terrena y se calcula para diferentes disponibilidades del enlace.

Ruido

Como en cualquier sistemas de comunicaciones, la señal, a lo largo de su trayectoria sufre de la adición de señales indeseadas provocadas por diferentes fenómenos y por distintas condiciones sobre las cuales no se tiene control. Estas señales, llamadas ruido, varían dependiendo entre otras cosas, de la frecuencia de operación, de las condiciones atmosféricas y del comportamiento de los diferentes componentes electrónicos de los equipos.

El ruido en un sistema de comunicaciones es un parámetro que no puede ser suprimido en su totalidad. Es por eso que este factor debe ser considerado en el

diseño de sistemas de comunicación para evitar su mal funcionamiento. Dependiendo de la magnitud de ruido que esté presente en un sistema este se comportará de una manera distinta. Es por eso que lo que se trata de hacer en los sistemas de comunicaciones es que la magnitud del ruido que se introduce en la señal sea mínimo comparado con la magnitud que tenga nuestra señal, de tal forma que este margen sea suficiente para que el sistema se comporte de la manera deseada.

Este margen se llama relación portadora a ruido y es establecida tomando en cuenta todos los factores que introducen ruido en el sistema así como los niveles de recepción del sistema.

Densidad de ruido.

Es la cantidad de potencia de ruido por unidad de Frecuencia.

$$N_o = \left(\frac{N}{B} \right) \quad \left[\frac{W}{Hz} \right] \quad (12)$$

donde

N = potencia de ruido térmico generado en una resistencia debido a las fluctuaciones en la corriente eléctrica [W] $N = kTB$
(13)

B = ancho de banda [Hz]

k = Constante de Boltzman $k = 1.38 \times 10^{-23} \quad \left[\frac{J}{K} \right]$

T = Temperatura de ruido [K]

Por lo que: $No = kT \quad \left[\frac{W}{Hz} \right] \quad (14)$

Figura de ruido (Factor de ruido) F

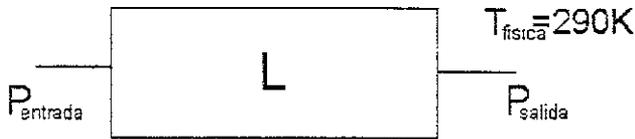
La figura de ruido es el cociente de la potencia total del ruido a la salida de un amplificador entre la porción de dicha potencia que es producida por un ruido ya existente a la entrada de un amplificador, asumiendo a la entrada, una temperatura de ruido $T_0 = T_{\text{ambiente}}$, es decir, 290K (17 °C).

$$F = \frac{(T_0 + T_e)G_{amp}}{T_0 G_{amp}} = \frac{T_0 + T_e}{T_0} = 1 + \frac{T_e}{T_0} \quad (15)$$

En los amplificadores de bajo ruido es común que en vez del parámetro de Figura de ruido se dé directamente su temperatura de ruido.

Temperatura de ruido de un atenuador

La temperatura física de un atenuador es igual a 290K



A partir del esquema tenemos que $P_{sal} = \frac{P_{ent}}{L}$

A la salida del sistema se tiene:

$N_{sal} = kT_0B = kT_fB$, por otra parte:

$$N_{sal} = \frac{N_{ent}}{L} + kT_L B$$

$$kT_f B = \frac{kT_f B}{L} + kT_L B$$

$$T_f = \frac{T_f}{L} + T_L$$

$$T_L = T_f \left(1 - \frac{1}{L} \right)$$

$$T_L = 290 \left(1 - \frac{1}{L} \right) \text{ [K]} \quad (16)$$

Temperatura de ruido de la lluvia

Al igual que la sección anterior, la lluvia funciona como un atenuador pero se usa $T_f = 280 \text{ K}$

$$T_{lluvia} = 280 \left(1 - \frac{1}{L_{lluvia}} \right) \text{ [K]} \quad (17)$$

Temperatura de ruido de la antena.

El ruido de la antena de una estación terrena se compone de las contribuciones de ruido provenientes de los diversos fenómenos que la antena puede captar como son: el ruido por la lluvia, el ruido proveniente del espacio profundo, el ruido de la tierra y el ruido producido por la troposfera en condiciones de cielo despejado. El ruido de la antena cambia en función de su diámetro, el ángulo de elevación y de su tipo de alimentación.

El ruido proveniente del espacio profundo que se compone principalmente de ruido galáctico y de ruido cósmico. El ruido galáctico es aquel que proviene de las radiaciones de las estrellas de nuestra galaxia, su valor no es representativo a frecuencias mayores a los 500 MHz. El ruido cósmico viene de regiones más alejadas que el ruido galáctico y es una suma de las radiaciones que provienen de más allá de la galaxia y de los residuos del origen del universo, su magnitud es de

alrededor de los 2.8K. En la figura 2 se puede observar la contribución de los distintos factores de ruido en la temperatura de la antena.

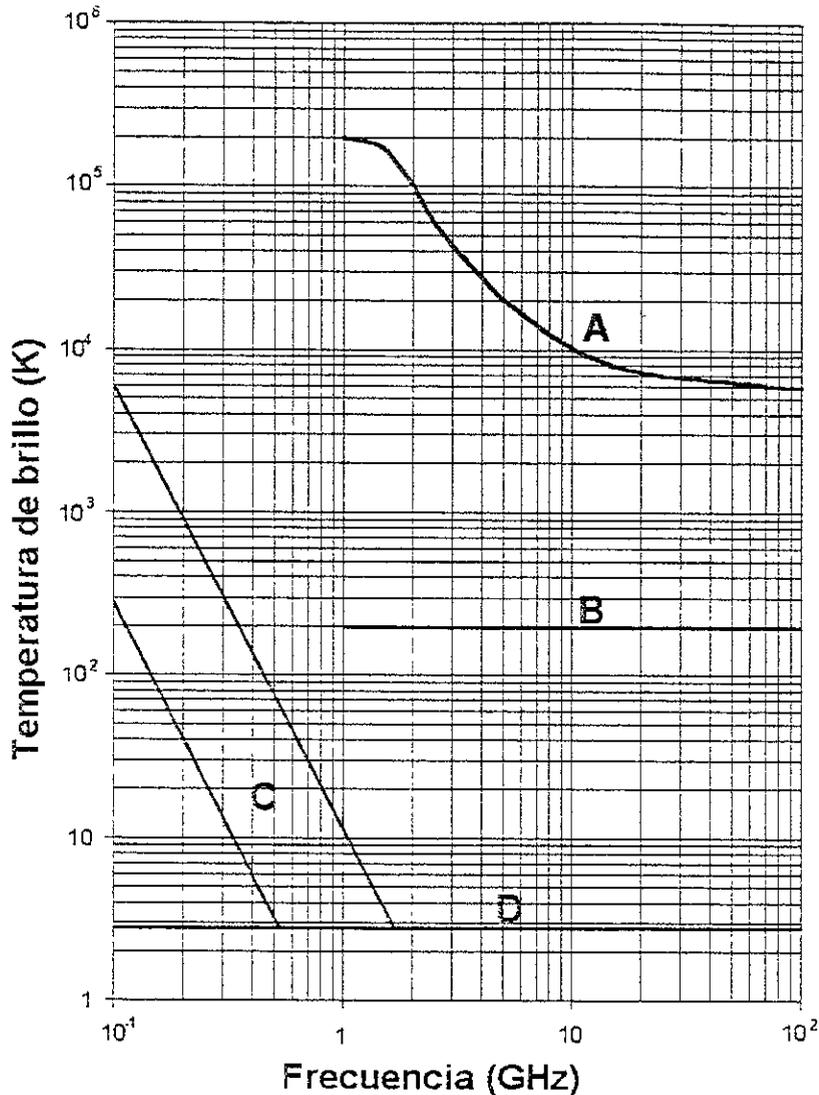


Figura 3. Fuentes de ruido extraterrestre: Sol en reposo (A), Luna (B), gama de ruido galáctico (C), ruido cósmico (D).

Aunque el Sol y la Luna aumentan considerablemente la temperatura de ruido de la antena, los intervalos de tiempo en que inciden en el lóbulo principal son pequeños por lo que no es necesario considerarlos en el cálculo de un enlace. Sin embargo, cuando existe incidencia del Sol sobre el lóbulo principal de la antena, el ruido que introduce al sistema provoca que no se pueda llevar a cabo comunicación alguna. Es por eso que es necesario prever los intervalos de interferencia solar. Para los sistemas geoestacionarios, estos intervalos dependen de la ubicación del satélite y de la ubicación de la estación terrena. Estos eventos se presentan en 2 periodos anuales durante los equinoccios o en los días cercanos a ellos y llegan a durar varios minutos cada día.

Arriba de 10 GHz la temperatura de ruido de debe casi completamente a la atmósfera, cuyas características son muy variables.

La suma total del ruido de la antena se encuentra típicamente en el rango de 20K a 30K en condiciones de cielo despejado. El valor exacto de la temperatura de una antena es generalmente proporcionado por el fabricante, el cual a su vez, la obtiene experimentalmente en condiciones estándares de clima.

Para condiciones de lluvia, el ruido de la antena se incrementa en forma significativa ya que la lluvia tiene una temperatura considerada de 280K y además introduce una atenuación que depende del grado de disponibilidad al que se este calculando. De esta forma, la temperatura de la antena que se debe considerar para calcular la temperatura de ruido del sistema es:

$$T_{a_{lluvia}} = \frac{T_{a_{cd}}}{L_{lluvia}} + T_{lluvia} \quad (18)$$

Siendo:

$T_{a_{cd}}$ – la temperatura de la antena con cielo despejado,

L_{lluvia} – la atenuación de la lluvia a determinada disponibilidad y

T_{lluvia} – la temperatura de la lluvia

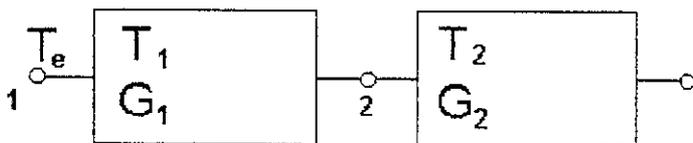
Ruido de la antena de un satélite.

El ruido que recibe la antena de un satélite es en su mayoría el ruido que recibe de la Tierra. Se considera que la antena recibe una temperatura de ruido de 290K. En condiciones de lluvia, el ruido que va asociado a la lluvia no es significativo ya que un evento de lluvia solo ocupa una pequeña parte del área de cobertura. Es por eso que cuando llueve, sobre un enlace ascendente no se suma ruido.

Temperatura de ruido equivalente combinada de dos circuitos en cascada.

El concepto de temperatura de ruido equivalente de dos sistemas conectados en cascada es necesario para la posterior definición de la temperatura de ruido de un sistema.

Basándonos en el esquema siguiente



La temperatura de ruido equivalente combinada de los dos sistemas referida a la entrada está determinado por

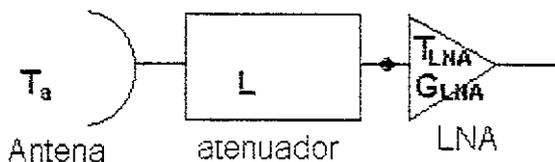
$$T_e = T_1 + \frac{T_2}{G_1} \quad (19)$$

Es decir, la temperatura de ruido en exceso de cada elemento subsiguiente se reduce en proporción a la ganancia del anterior para ser agregada a las demás. Cuando se tienen más elementos conectados, estos no representan una variación significativa siempre y cuando el primer elemento tenga una ganancia grande (G_1).

Temperatura de ruido de un sistema

Para determinar la temperatura de ruido de un sistema se toma como punto de referencia la terminal de la antena o la entrada del amplificador. Por lo regular, cuando existe un elemento atenuador entre las terminales de la antena y la entrada del amplificador de bajo ruido se toma como punto de referencia la entrada de éste. Esto es por la conveniencia que representa el que éste amplificador tenga una alta ganancia con una temperatura de ruido relativamente baja (representada por la Figura de ruido) provocando que las temperaturas de ruido de los elementos conectados posteriormente a él no representen una cantidad considerable en el ruido del sistema.

El sistema siguiente representa a un sistema receptor.



Su Temperatura de ruido total, o temperatura de ruido del sistema referido a la entrada del LNA será la suma de las diferentes temperaturas de ruido referidas a la entrada del LNA.

$$T_s = \frac{T_a}{L} + 290 \left(1 - \frac{1}{L} \right) + T_e \quad (20)$$

En donde el primer término representa la temperatura de ruido de la antena pasando por el atenuador (L es el valor numérico de la atenuación), el segundo término representa la temperatura de ruido del atenuador a la entrada del LNA y el tercer término representa la temperatura de ruido del LNA a la entrada. Debe de considerarse que la temperatura de ruido de la antena tiene que ser calculada previamente con las condiciones de cielo despejado y precipitación en las distintas condiciones de disponibilidad que de consideren. Es decir, se obtiene una temperatura del sistema diferente para las distintas condiciones de disponibilidad. Es aquí donde se refleja la importancia que tiene la lluvia en el funcionamiento de un sistema de comunicaciones.

Relación Portadora a Ruido C/N de un enlace.

Para un trayecto, la relación Portadora a Ruido se obtiene dividiendo la potencia total recibida entre la Potencia total de ruido en el enlace:

$$\frac{C}{N} = \frac{P_{Tr}}{N} \quad (21)$$

Por otro lado, de la ecuación (8) y de la ecuación (13):

$$\frac{C}{N} = \frac{PIRE \times G_R}{LkBT_S} = \left(\frac{PIRE}{LkB} \right) \left(\frac{G_R}{T_S} \right) \quad (22)$$

En donde L representa las pérdidas totales en la trayectoria del enlace, y el término (G_R/T_S) es conocido simplemente como G/T con la denominación de *Factor de calidad* de la estación receptora o *Figura de mérito* ya que contiene los parámetros propios más importantes de ella y su variación se refleja directamente en la relación de C/N .

Por lo general se utiliza la relación C/N_0 (Portadora a densidad de Ruido) que es independiente del ancho de banda que se emplea:

$$\frac{C}{N_0} = \frac{PIRE \times G_R}{LkT_S} = \left(\frac{PIRE}{Lk} \right) \left(\frac{G_R}{T_S} \right) \quad (\text{Hz}) \quad (23)$$

y en representación logarítmica (dB):

$$\frac{C}{N_0} = PIRE_{dBW} - L_{dB} - K_{dB} + \frac{G}{T}_{dB} \quad (\text{dBHz}) \quad (24)$$

en donde:

$$\frac{G}{T}_{dB} = (G_{ARx} - (L_D)_{Rx} - L_{ARx-LNA}) - T_{S,dB} \quad (\text{dB}) \quad (25)$$

$$K_{dB} = -228.6 \quad (\text{dB})$$

Para cada segmento del enlace existe una relación C/N_0 : una relación para el enlace de subida, otra relación para el enlace de bajada y otra relación para el segmento espacial llamada relación Portadora a Ruido de Intermodulación que se produce debido al ruido introducido por los productos de intermodulación cuando en un transpondedor existe más de una portadora. Esto se debe a que al introducir más de una señal simultánea en un amplificador se genera un espectro de ondas espurias por el efecto llamado intermodulación, el cual aumenta en proporción al operar en la parte menos lineal de un amplificador, esto es, cerca del punto de saturación. Esta falta de linealidad no afecta la calidad de los enlaces cuando se opera con una sola portadora y tiene un efecto menor cuando se opera con dos o tres portadoras. En cambio, cuando se manejan múltiples portadoras en un transpondedor se genera un gran número de ondas espurias que pueden degradar la calidad de los enlaces. La relación C/N_0 de intermodulación varía de forma indirecta con el ruido de intermodulación.

La figura 4 muestra la característica de transferencia de potencia de una amplificador de tubo de ondas progresivas típico en donde se aprecia la falta de linealidad de la salida con respecto a la entrada. Los transpondedores que emplean amplificadores de estado sólido presentan una función de transferencia más lineal. Es por eso que mientras más portadoras se tengan es necesario reducir la potencia de las portadoras a la entrada para que se produzca una reducción de potencia a la salida y se mantenga operando al amplificador en su

parte lineal. A esta reducción de potencia también se le conoce con el nombre de "Back-off".

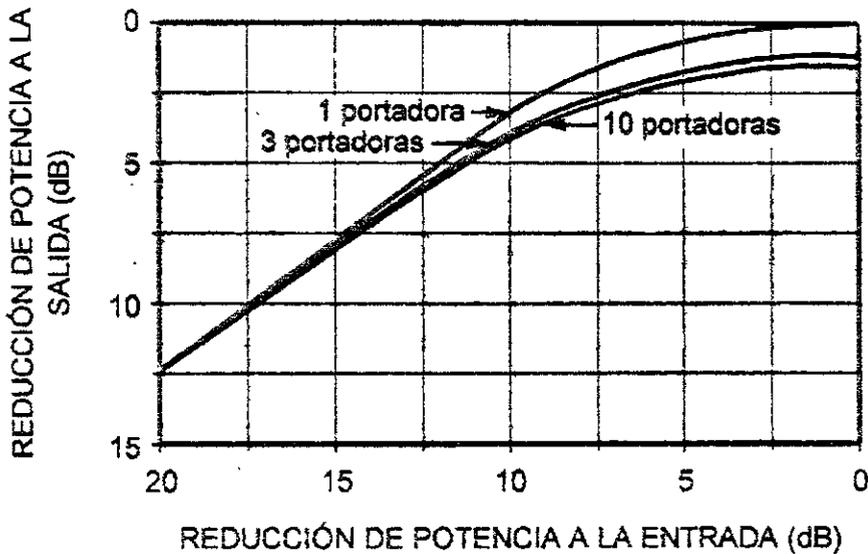


Figura 4. Relación entre la potencia de entrada y de salida de un tubo de ondas progresivas en función de la reducción de potencia respecto de saturación.

Los operadores de satélites tienen disponibles los valores de intermodulación para redes típicas en cada transpondedor de sus satélites en condiciones distintas de *Back-off* y proporciona estos datos a los usuarios para el diseño de sus sistemas. La figura 5 de muestra como un ejemplo de los valores típicos de la relación portadora/ruido de intermodulación en función del *back-off* para un TWT (A) y para un Amplificador de estado sólido (B) en un transpondedor operando con un número alto de portadoras.

Para transpondedores con TWT se puede estimar un valor aproximado en el centro del transpondedor (peor caso), por medio de:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_i = K_n + 0.82BO_i \quad \text{para } 2 \leq BO_i \leq 12 \quad (26)$$

donde K_n tiene los valores 10, 9.5 y 8.6 para $n = 6, 12$ y 500 portadoras en un transpondedor, respectivamente.¹

En la figura 6 se muestra el comportamiento de la relación C/N de intermodulación en función del *back-off* en un TWT típico para diferentes números de portadoras.

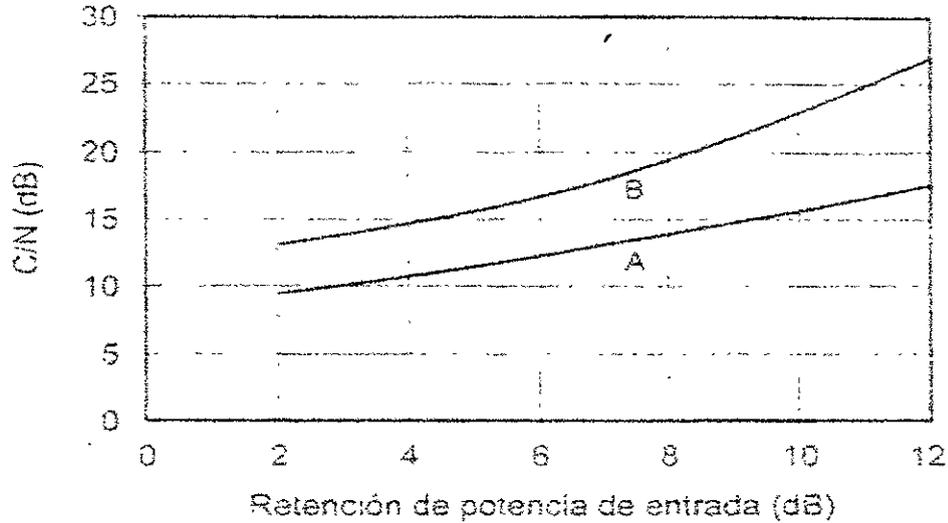


Figura 5. Valores típicos de C/N de intermodulación en función de la retención de potencia (*back-off*) de entrada

Relación C/N total para un enlace.

La relación C/N total de un enlace se compone de las relaciones correspondientes del enlace ascendente, el enlace descendente, de la relación que es introducida en un transpondedor por la intermodulación y de aquellas provenientes de la interferencia con otros sistemas. Esta última proviene de los satélites adyacentes que operan en la misma banda de frecuencias y aumenta si las posiciones orbitales son cercanas.

El valor combinado de las relaciones anteriores es:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_T^{-1} = \left(\frac{C}{N}\right)_B^{-1} + \left(\frac{C}{N}\right)_S^{-1} + \left(\frac{C}{N}\right)_I^{-1} + \left(\frac{C}{I}\right)^{-1} \quad (27)$$

Donde :

$\left(\frac{C}{N}\right)_T^{-1}$ corresponde a la relación portadora / ruido total,

$\left(\frac{C}{N}\right)_S^{-1}$ corresponde a la relación portadora / ruido ascendente (subida),

$\left(\frac{C}{N}\right)_B^{-1}$ corresponde a la relación portadora / ruido descendente (bajada),

$\left(\frac{C}{N}\right)_I^{-1}$ corresponde a la relación portadora / ruido de intermodulación y

$\left(\frac{C}{I}\right)^{-1}$ corresponde a la contribución por la interferencia con otros sistemas.

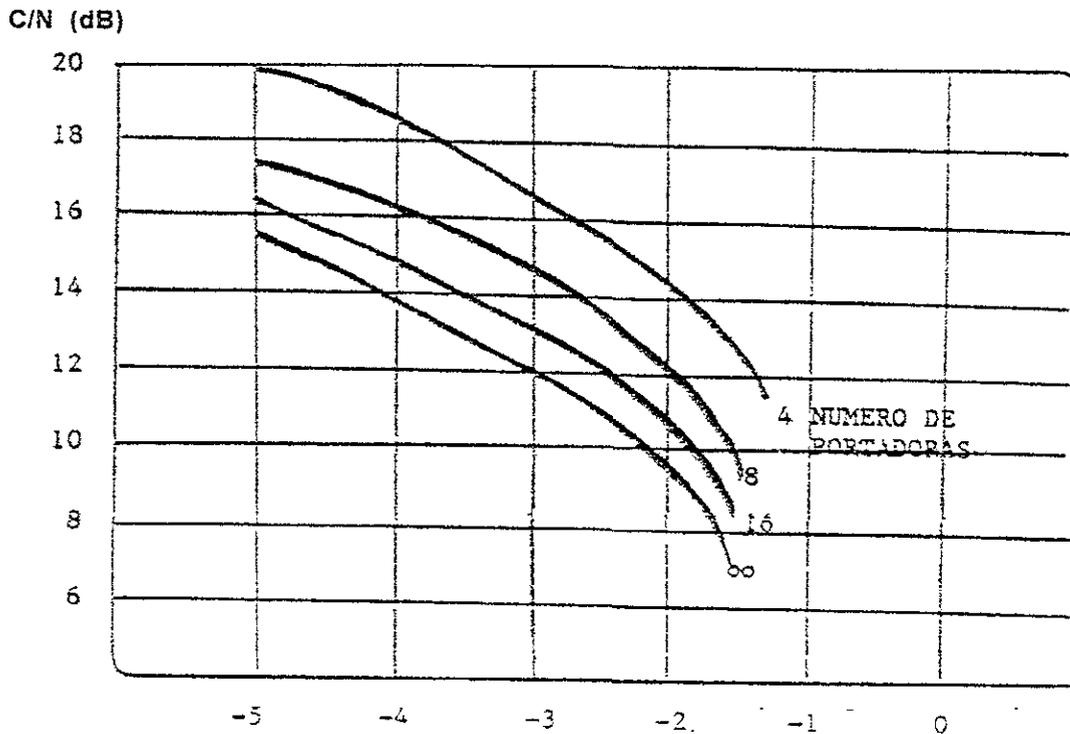


Figura 6. Relación C/N de intermodulación en función del *back off* en un TWT típico para un número variable de portadoras

Los términos anteriores deben de calcularse con los valores de la relaciones directas individuales (no en dB). El valor final, que usualmente se convierte a dB debe ser menor que la menor contribución de sus componentes. La ecuación (27) se puede utilizar con las relaciones portadora / densidad de ruido de los diferentes segmentos del enlace. Solo se tiene que tomar en cuenta que la relación de C/N con C/N_0 está establecida por:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{dB} = \left(\frac{C}{N}\right)_{dB} + B_{dB}$$

en donde B corresponde al ancho de banda que ocupa la señal en dB.

El comportamiento típico de las tres relaciones anteriores en función del *back-off* de entrada se muestra en la Figura 7.

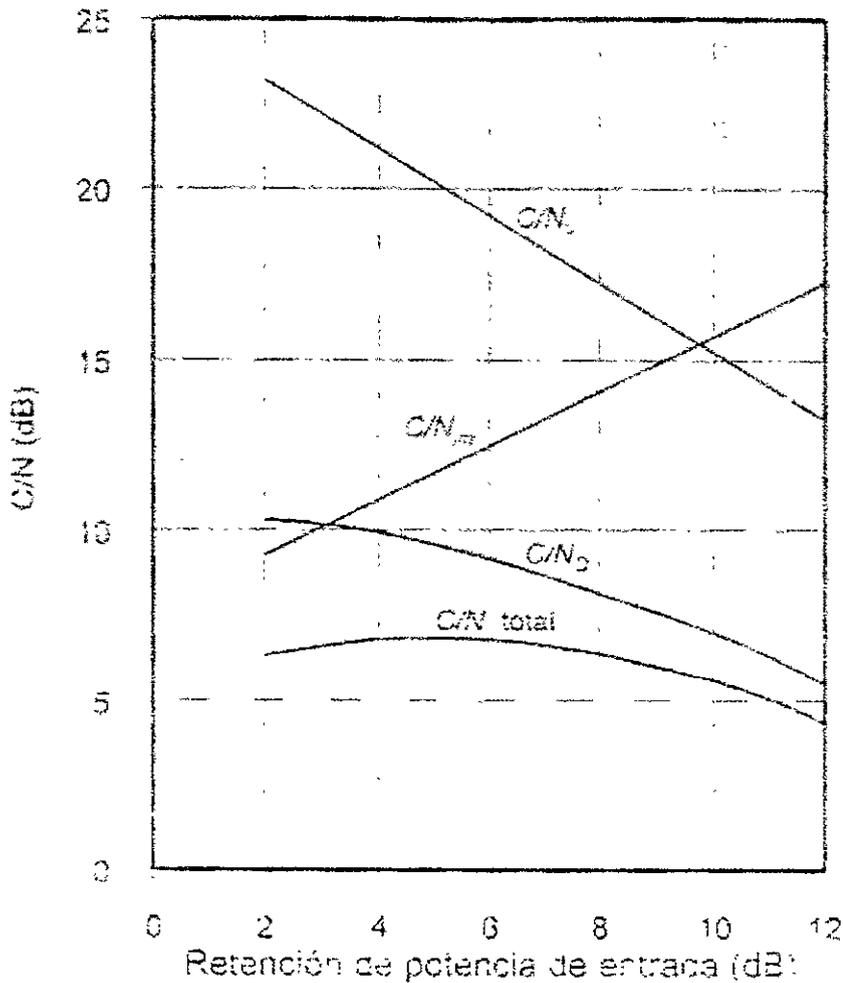


Figura 7. Comportamiento de las relaciones portadora a ruido en función de la retención de potencia (*back-off*)

Relación portadora / densidad de ruido total necesaria para un enlace digital

La relación portadora / densidad de ruido necesaria para un enlace digital está en función de la cantidad de errores que se pueden tolerar en un enlace digital para que se conserve la fidelidad de la información transmitida. Esta cantidad de errores son estimados probabilísticamente. El desempeño de la transmisión de señales digitales se evalúa principalmente por la proporción de bits erróneos recibidos.

En las comunicaciones digitales por satélite, la forma de modulación más comúnmente usada es la de modulación por desplazamiento de fase ya que permite hacer más eficiente el uso del ancho de banda. Los tipos de modulación de este tipo que más comúnmente se usan son la bifásica y la cuadrifásica que por sus siglas en inglés son conocidas como *BPSK* y *QPSK*, respectivamente.

En el caso de la modulación por fase, los bits erróneos en el punto de recepción se deben al ruido térmico, a la interferencia por símbolos y a las fluctuaciones de

fase por la recuperación de la portadora y por la imperfecta sincronización de los pulsos. La proporción de bits erróneos E_b/N_0 está en función de la energía por bit de entrada entre densidad de potencia del ruido a la entrada del filtro de recepción.

La relación de E_b/N_0 con C/N_0 es:

$$\frac{C}{N_0} = \frac{R_b E_b}{N_0} \quad (28)$$

donde R_b es la velocidad de transmisión (bits / segundo).

En decibeles:

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_{dB} = \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{dB} + 10 \log(R_b) \quad (29)$$

Por lo general, a la ecuación (29) se le agrega una margen de implementación con un valor típico de 1.5 dB.

Para la transmisión de datos en redes privadas es muy frecuente que se especifique una proporción de bits erróneos de 10^{-7} para los márgenes de disponibilidad establecidos.

Para mejorar la calidad de la comunicación digital reduciendo la proporción de bits erróneos se aplica la codificación para la detección y corrección de errores. Esta técnica requiere de un mayor ancho de banda pero con ella no es necesario aumentar la potencia requerida para el enlace, siendo una ventaja en aquellas aplicaciones en donde se tiene limitada la potencia. Existen dos clases de control de errores: la petición automática de repetición en caso de detectarse un error o ARQ (*Automatic Repeat reQuest*) y la corrección de errores sin canal de retorno o FEC (*Forward Error Correction*).

La codificación FEC permite corregir una proporción errores en el lugar de destino sin necesidad de retransmisión y es el más utilizado en las redes satelitales. La relación de código de una señal FEC representa el número k de bits de información de una palabra de mensaje o paquete y en número n total de bits transmitidos, $r = k/n$. A r también se le conoce como tasa de codificación.

Así, el ancho de banda necesario para la transmisión de señales digitales con codificación es:

$$B = \frac{1.2R_b}{r} \text{ (Hz)} \quad (30)$$

La relación entre la proporción de bits erróneos y los valores de E_b/N_0 para diferentes tasas de codificación para un módem así como la curva teórica del modem sin codificación se muestra en la figura 8.

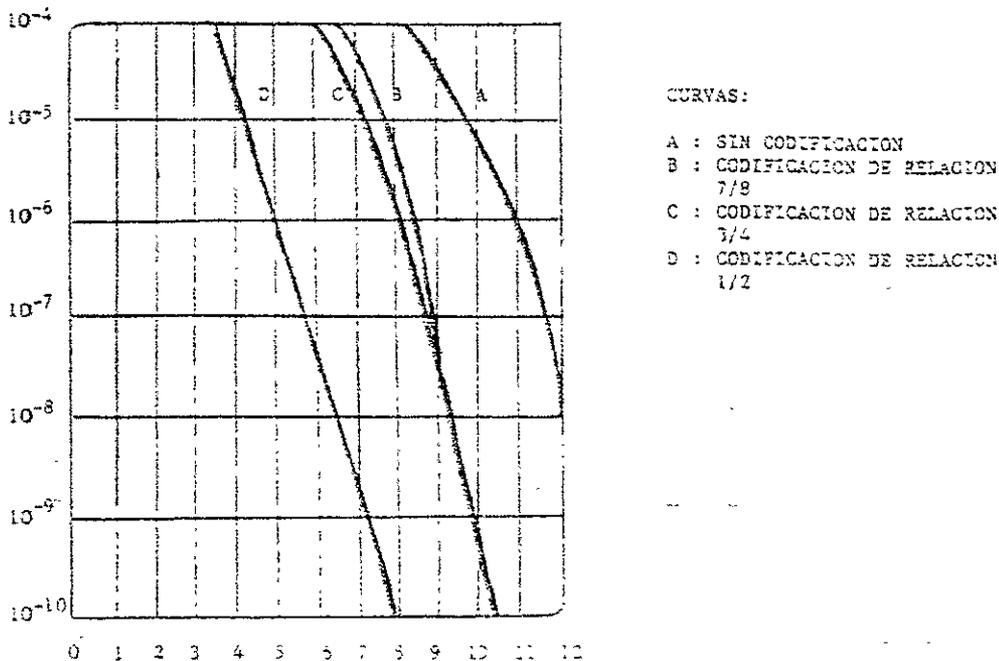


Figura 8. Características típicas de un modem de desplazamiento de fase con el empleo de diferentes códigos de protección contra errores

Ejemplo de cálculo de enlace para Banda Ka.

Enlace México-Tapachula

Para el cálculo de enlace se consideró el satélite ANIK-F2 que será lanzado el próximo año y que dará servicio a Norteamérica. Se consideró la estación terrena llamada VSAT 20/30² GHz que se mencionó en el capítulo 4 y cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 1.

Parámetro	Valor	Comentario
Rango de frecuencias de Tx	29.5-30GHz	
Rango de frecuencias de Rx	19.7-20.2 GHz	
Polarización Tx	Vertical	
Polarización Rx	Horizontal / Vertical	
Rango de frecuencias de Tx	29.5-30GHz	
Rango de frecuencias de Rx	19.7-20.2 GHz	
Ganancia de la antena Tx/Rx @ 29.5 GHz	51/48 dB	
PIRE @ 1dB 25°C	53dBW	Con antena de 1.5m
Amplificador de Alta Potencia	32dBm	
G/T mínima Rx	24 dB/K	Con antena de 1.5m
Figura de Ruido del Receptor @ 25 °C	2.2 dB máx.	

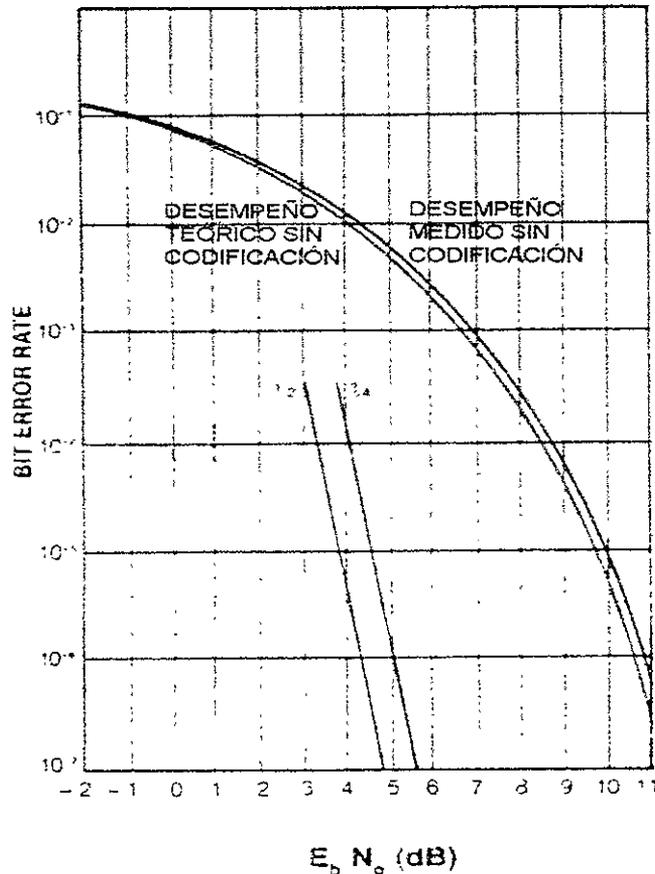
Tabla 1. Especificaciones de la estación VSAT 20/30 GHz

Condiciones del Enlace

Las condiciones para el establecimiento del enlace se basan en la relación C/N_0 total que se requiere. El valor de C/N_0 se calcula principalmente con base en las

condiciones de velocidad de transmisión y las características del módem que se va a emplear.

En el siguiente ejemplo se calcularon las condiciones del enlace para una velocidad de transmisión de 2.04 Mbps. La relación E_b/N_0 del módem a emplear depende de las características particulares del equipo. El dato correspondiente para la relación E_b/N_0 se obtuvo de la hoja de especificaciones del módem digital PSK modelo CM101E de *ComStream Corporation* para una tasa de codificación de $\frac{1}{2}$. La relación BER- E_b/N_0 se muestra en la figura 9. Para una tasa de error de bits de 10^{-7} el valor correspondiente de E_b/N_0 es de 4.8.



Medida del desempeño a 56 kbps.

Figura 9. Curva característica del módem PSK modelo CM101E de *ComStream Corporation*.

Con estos valores se pudo calcular la relación C/N_0 total requerida para el enlace utilizando la ecuación 29. Este valor fue de 69.4 dBHz.

A partir de este valor se propuso un valor para la relación C/N_0 de bajada de 71.4 dBHz y se infirió la C/N_0 de intermodulación a partir de la ecuación (26) donde para el peor de los casos se obtuvo un valor de 78 dBHz. A partir de la ecuación (27) se calculó la relación C/N_0 de subida necesaria para cumplir con las condiciones del enlace. El valor calculado de C/N_0 de subida fue de 75.7 dBHz. El valor para la relación C/N_0 de subida es siempre más grande a la relación C/N_0 de bajada. Con estas condiciones se procedió a calcular los diámetros de las antenas

de las estaciones terrenas en los enlaces de subida y de bajada para cumplir con los requerimientos del enlace para diferentes partes de la República Mexicana. En cuanto a la polarización se consideró polarización Horizontal para el enlace descendente y polarización vertical para el enlace ascendente debido a las características de la estación que se empleó.

Relación C/N ₀	Valor (dBHz)
Ascendente	75.7
Descendente	71.4
Intermodulación	78
Total	69.4

Tabla 2. Relaciones de C/N₀ para 2.04 Mbps

Cálculo de las condiciones del enlace descendente.

Cálculo de los parámetros de la estación Terrena

A partir de las especificaciones de la estación terrena y usando la ecuación (15) se calculó T_e . Este valor fue de 191.22 K. Se supuso un valor de Pérdidas entre la antena y la entrada del LNA de 0.3 dB. A partir de los datos de G/T y considerando una ganancia de la antena de 48 dB con 1.5 m de diámetro se calculó la T_s con la ecuación (25). Obtuvimos un valor de 234.42 K o bien, 23.7 dBK.

Con base en la ecuación (20) se calculó la T_a . El valor obtenido fue de 25.5K que es un valor típico para la temperatura de ruido de una antena en condiciones de cielo despejado (Tabla 3).

Para poder obtener la T_a en condiciones de precipitación se consideraron las diferentes atenuaciones para diferentes disponibilidades provocadas por la lluvia. Esto se realizó con la ecuación (18).

Parámetro	Valor
T_a	25.5 K
T_e	191.22 K

Tabla 3. Parámetros de la Estación Terrena

La estación terrena de recepción se encuentra con las condiciones geográficas mostradas en la Tabla 4. Con estas condiciones y con la ubicación del satélite de 111.1 ° Oeste se calculó el ángulo de elevación, el ángulo de azimut y la distancia real entre la estación terrena y el satélite.*

ET Rx	Tapachula de Córdoba y Ordonez
Longitud (° Oeste)	92.27
latitud(° norte)	14.9
altura SNM (km)	0.16
elevación (°)	62.09473607
azimut (°)	232.9879198
distancia (km)	36421 70253

Tabla 4. Condiciones de la estación terrena para la recepción

* Datos obtenidos de www.inegi.gob.mx

Cálculo de los parámetros del satélite.

La frecuencia a la que se realiza este enlace es de 20.2 GHz. Suponiendo que el satélite ANIK-F2 prestara servicios para México, las condiciones que determinarían los enlaces con éste satélite serían los siguientes.

El ancho de banda necesario para la transmisión de un canal de 2.04 Mbps con una tasa de codificación de $\frac{1}{2}$ se determinó con la ecuación (30) obteniendo un valor de 4.9 MHz. El ancho de banda del transpondedor considerado para el enlace con los usuarios es de 56.25 MHz y la potencia del transpondedor en saturación es de 55 dBW. Si se considera una banda de guarda del 10% del ancho de banda necesario para cada portadora, se determina que en el transpondedor se pueden transmitir 11 portadoras con 2.04 Mbps. La potencia disponible del transpondedor entonces se tiene que dividir entre el número total de portadoras. Con estas condiciones se encontró que el PIRE del satélite para once portadoras de 2.04 Mbps es 44 dBW por portadora (Tabla 5).

Frecuencia	20.2 GHz
Velocidad de transmisión	2.04 Mbps
Tasa de codificación	1/2
Ancho de banda necesario	4.5 MHz
Banda de guarda	0.45 MHz
Ancho de Banda del transpondedor	56.25 MHz
Potencia del transpondedor en saturación	55 dBW
Número de portadoras	11
Potencia por portadora	44 dBW

Tabla 5. Condiciones del satélite

Pérdidas en el trayecto.

Las pérdidas por absorción atmosférica se calcularon con el procedimiento descrito en la sección de las pérdidas adicionales descrito de capítulo. Las pérdidas en el espacio libre se calcularon con la ecuación (9), considerando la frecuencia de 20.2GHz. Las pérdidas por lluvia se calcularon empleando el método descrito en el capítulo de propagación para disponibilidades de 99.99%, 99.95%, 99.9%, 99.8%, 99.5% y 99%. Los valores calculados de estas pérdidas se muestran a continuación (Tabla 6).

Pérdidas	dB
L _{aa}	0.28
L _{el}	209.73
L lluvia (% de disponibilidad)	
99.99	41.60
99.95	25.67
99.9	13.21
99.8	11.58
99.5	6.90
99	4.41

Tabla 6. Pérdidas en el trayecto

Temperatura del sistema.

A partir del valor de T_a en condiciones de cielo despejado se pudo determinar la T_a en condiciones de precipitación para las diferentes disponibilidades propuestas por medio de la ecuación (18). Estos resultados se muestran en la Tabla 7.

T ant c/ll	K
99.99	279.98
99.95	279.31
99.9	267.86
99.8	262.32
99.5	228.00
99	187.84
cielo despejado	25.50

Tabla 7. Temperatura de la antena con precipitación

A continuación se calculó la temperatura del sistema con la ecuación (20), considerando las pérdidas (atenuador) entre la antena y el Amplificador de Bajo ruido de 0.3 dB (Tabla 8).

T sistema	K
99.99	471.93
99.95	471.30
99.9	460.62
99.8	455.45
99.5	423.42
99	385.94
cielo despejado	234.43

Tabla 8. Temperatura del sistema a diferentes disponibilidades

Figura de mérito de la Estación Terrena (G/T)

La relación G/T necesaria para la estación terrena se calculó de la ecuación (24) considerando el PIRE del satélite de 44 dBW. A partir de estos resultados se calculó la Ganancia necesaria de la antena con la ecuación (25). El diámetro necesario para la antena se calculó de la ecuación (1), considerando una eficiencia de la antena de 60% (Tabla 9).

Disponibilidad (%)	G/T de la ET necesaria (dB)	G antena Rx (dB)	Diámetro (m)
99.99	50.41	76.85	42.47
99.95	34.49	60.92	6.79
99.9	22.03	48.36	1.60
99.8	20.40	46.68	1.32
99.5	15.71	41.68	0.74
99	13.23	38.79	0.53
cielo despejado	8.82	32.22	0.25

Tabla 9. Condiciones de la Estación terrena para la recepción

Como se puede observar en la Tabla 9 los diámetros calculados para disponibilidades altas implican un gran tamaño y por consiguiente un gran costo. En cuanto a la diferencia de tiempos con relación a la disponibilidad se puede ver

en la Tabla 5 del Capítulo 4 el valor real de los tiempos de indisponibilidad. Las altas disponibilidades para los enlaces en Banda Ka están restringidos por la alta atenuación en estos rangos. En la última sección de este capítulo se presentan los diferentes diámetros requeridos para los diferentes niveles de disponibilidad considerados en distintas ciudades de nuestro país.

Cálculo de las condiciones del enlace ascendente.

El enlace ascendente se realizó a 29.5 GHz. La figura de mérito del satélite (G/T) es de 14 dBK. El enlace ascendente se calculó para una estación terrena ubicada en la ciudad de México, delegación Cuauhtémoc. Las condiciones geográficas de la estación terrena, así como las condiciones de ángulo de elevación, azimut y distancia hacia el satélite se muestran en la Tabla 10.

ET Tx	México, Cuauhtémoc
Longitud (° Oeste)	99.15
latitud(° Norte)	19.43
altura s. n. m. (Km)	2.24
Elevación (°)	63.43
azimut (°)	212.46
distancia (Km)	36362.93

Tabla 10. Condiciones de la estación terrena para la transmisión

Pérdidas en el trayecto.

Las pérdidas por absorción atmosférica se calcularon con el mismo procedimiento de la sección para el enlace descendente. Las pérdidas en el espacio libre se calcularon con la ecuación (9), considerando la frecuencia de 29.5GHz. Las pérdidas por lluvia se calcularon empleando el método descrito en el capítulo de propagación para las mismas disponibilidades que en la parte del enlace descendente, es decir, de 99.99%, 99.95%, 99.9%, 99.8%, 99.5% y 99%. Se empleó una polarización vertical debido a las especificaciones de la Estación terrena. La tabla 11 muestra los valores obtenidos.

Tipo de pérdida	dB
L _{aa}	0.25
L _{el}	213.01
L _{lluvia (1-p)}	
99.99	31.86
99.95	18.73
99.9	10.77
99.8	8.52
99.5	4.99
99	3.20

Tabla 11. Pérdidas en el trayecto

A continuación se calculó el PIRE necesario de la Estación Terrena para cumplir con los requisitos de C/N_0 en el enlace ascendente (Tabla 2) a partir de la ecuación (24). Los resultados se muestran en la Tabla 12.

Disponibilidad (%)	PIRE (dBW)
99.99	78.26
99.95	65.13
99.9	57.16
99.8	54.91
99.5	51.38
99	49.59
cielo despejado	46.39

Tabla 12. PIRE necesario a la salida de la estación terrena

Con las condiciones para el PIRE dadas en la tabla anterior se pueden variar diferentes parámetros en la estación terrena para poder obtener este valor a la salida. Una opción es, utilizar un diámetro de antena para todas las disponibilidades y variar la potencia del amplificador. La otra opción implica dejar la potencia del Amplificador fija y variar el diámetro de la antena. La opción más económica consiste en la variación del diámetro de la antena. En nuestro caso particular, existen condiciones de potencia para la estación terrena. El valor máximo del amplificador es de 32 dBm. Considerando esto, se calcularon las ganancias necesarias de la antena para todas las disponibilidades así como el diámetro requerido (Tabla 13)

Disponibilidad (%)	Ganancia (dB)	Diámetro requerido (m)
99.99	75.56	25.06
99.95	62.43	5.53
99.9	54.46	2.21
99.8	52.21	1.70
99.5	48.68	1.14
99	46.89	0.92
cielo despejado	43.69	0.64

Tabla 13. Condiciones de la antena de la estación terrena para la recepción

Como se puede observar, la antena que se requiere para establecer el enlace en condiciones de altas disponibilidades es de dimensiones que no son prácticas y por supuesto, de alto costo. Sin embargo se puede optar por disponibilidades relativamente bajas en donde el costo de la estación sea bajo.

Como se puede ver en el enlace México-Tapachula que se realizó como ejemplo, los diámetros de las antenas están en función de la disponibilidad requerida del enlace. Además, para una frecuencia mas grande y para una zona mas lluviosa, el diámetro de la antena tiene importantes diferencias con respecto a otra zona y a otra frecuencia.

A continuación se muestra el cálculo de los diámetros de las antenas que se realizó enlaces ascendentes y descendentes en diferentes ciudades de nuestro país.

Cálculos para diferentes ciudades de México

Las ciudades que se consideraron en esta sección están ubicadas en distintas zonas de lluvia del modelo Global de Crane, además de tener gran importancia económica y social. Las ciudades seleccionadas se muestran en la Tabla 14 con sus respectivos datos geográficos, la zona de lluvia en la que se encuentran, la distancia hacia el satélite y las condiciones que deben tener las estaciones terrenas en cuanto a ángulo de elevación y azimut para realizar un enlace con el satélite Anik-F2.

Ciudad	Altura s.n.m. (km)	Latitud N (°)	Longitud O (°)	Elevación (°)	Azimut (°)	Distancia (km)	Zona
México D.F. (Cuauhtémoc)	2.24	19.43	99.15	63.43	212.46	36362.93	D2
Ensenada	0.02	31.87	116.62	52.42	169.63	36929.69	F
Paz, La	0.03	24.15	110.32	61.73	181.91	36438.28	F
Campeche	0.01	19.83	90.53	57.01	227.88	36671.17	G
Saltillo	1.60	25.42	101.00	58.20	202.54	36608.91	D1
Tapachula de Córdova y Ordóñez	0.16	14.90	92.27	62.09	232.99	36421.70	G
Tuxtla Gutiérrez	0.52	16.75	93.12	61.47	228.40	36450.09	G
Acapulco de Juárez	0.02	16.87	99.90	66.37	214.31	36243.21	G
Guanajuato	2.00	21.02	101.25	62.94	205.83	36384.20	D2
Tulancingo	2.14	20.08	98.37	62.33	213.35	36410.94	D2
Guadalajara	1.54	20.68	103.35	64.20	201.07	36330.32	D1
Puerto Vallarta	0.04	20.62	105.23	64.92	196.27	36300.31	D1
Cuernavaca	1.51	18.92	99.23	63.98	212.95	36339.40	D2
Monterrey	0.54	25.67	100.32	57.66	203.74	36636.81	D1
Oaxaca de Juárez	1.55	17.07	96.72	64.02	221.15	36337.73	D2
Cancún	0.01	21.17	86.83	53.00	231.31	36894.78	G
Mazatlán	0.01	23.23	106.42	62.29	191.73	36412.84	D1
San Luis Potosí	1.86	22.15	100.97	61.63	205.36	36443.00	D2
Hermosillo	0.21	29.12	110.97	56.04	180.27	36723.19	F
Villahermosa	0.01	17.98	92.93	60.36	226.74	36502.10	G
Heroica Matamoros	0.01	25.87	97.50	56.16	209.01	36716.21	D2
Nuevo Laredo	0.15	27.48	99.52	55.43	203.95	36756.50	D1
Tampico	0.01	22.22	97.87	59.97	211.88	36520.93	D2
Xalapa-Enríquez	1.46	19.53	96.92	61.94	217.08	36428.49	D3
Veracruz	0.01	19.20	96.13	61.72	219.11	36438.66	D3
Mérida	0.01	20.97	89.62	55.41	227.72	36757.70	G
Zacatecas	2.42	22.77	102.57	61.65	201.19	36442.05	D2

Tabla 14. Características de las estaciones terrenas para las ciudades seleccionadas

Se calcularon los diámetros de las antenas que se requerirían para disponibilidades de 99.99%, 99.95%, 99.9%, 99.8%, 99.5% y 99% para tasas de transferencia de 2.04Mbps, 1.5Mbps, 1Mbps, 500kbps, 384kbps y 64kbps en polarizaciones vertical y horizontal para los enlaces ascendentes y descendentes, respectivamente. El ancho de banda requerido, el número de portadoras por transpondedor, las condiciones que se consideraron para el enlace en cuanto a

relación C/N_0 total y las condiciones de C/N_0 para los diferentes trayectos, se muestran en la Tabla 15.

Tasa de transmisión	2.04 Mbps	1.5 Mbps	1 Mbps	500 kbps	384 kbps	64 kbps
Ancho de Banda (BPSK) [MHz]	4.90	3.60	2.4	1.2	0.922	0.154
No Portadoras	11	15	23	46	60	362
C/N_0 Total [dBHz]	69.40	68.06	66.30	63.29	62.14	54.36
C/N_0 Ascendente [dBHz]	75.74	74.40	72.64	69.68	68.10	59.99
C/N_0 Descendente [dBHz]	71.40	70.06	68.30	65.29	64.14	56.36
C/N_0 Intermodulación [dBHz]	78.04	76.70	72.64	71.85	71.53	64.56

Tabla 15. Condiciones para el enlace

La atenuación por lluvia que se calculó para cada una de las localidades seleccionadas para las frecuencias de 29.5 GHz y 20.2 GHz que se muestran en la Tabla 16.

Los diámetros para las diferentes disponibilidades se muestran en la Tabla 17 tanto del enlace descendente como del enlace ascendente.

Ciudad	Disponibilidad	Atenuación por lluvia a 29.5 GHz [dB]							Atenuación por lluvia a 20.2 GHz [dB]						
		99.99	99.95	99.9	99.8	99.5	99	99.99	99.95	99.9	99.8	99.5	99		
Xalapa-Enríquez	D3	45.45	27.36	16.51	12.75	7.59	4.91	23.24	13.33	7.88	5.95	3.45	2.18		
Veracruz	D3	56.54	34.65	21.15	16.34	9.86	6.39	28.64	16.71	9.99	7.55	4.43	2.81		
México D.F. (Cuauhtémoc)	D2	31.86	18.73	10.77	8.52	4.99	3.2	16.32	9.14	5.14	3.99	2.27	1.43		
Guanajuato	D2	33.67	19.65	10.96	9.05	5.32	3.42	17.2	9.56	5.22	4.22	2.41	1.52		
Tulancingo	D2	32.57	19.08	10.45	8.73	5.12	3.28	16.68	9.31	4.99	4.09	2.33	1.46		
Cuernavaca	D2	37.52	22.42	12.1	10.26	6.06	3.9	19.09	10.86	5.74	4.76	2.74	1.72		
Oaxaca de Juárez	D2	37.33	22.58	11.96	10.22	6.03	3.87	19.02	10.95	5.68	4.75	2.73	1.71		
San Luis Potosí	D2	34.61	20.07	11.92	9.33	5.49	3.53	17.69	9.77	5.68	4.36	2.49	1.57		
Heroica Matamoros	D2	45.25	25.99	16.67	12.59	7.54	4.88	23.01	12.58	7.9	5.85	3.4	2.16		
Tampico	D2	46.88	27.73	17.04	13.17	7.89	5.1	23.72	13.35	8.03	6.08	3.54	2.24		
Zacatecas	D2	30.21	17.27	10.94	7.99	4.67	3	15.51	8.45	5.24	3.75	2.13	1.34		
Saltillo	D1	29.53	16.52	10.06	7.76	4.55	2.92	15.07	8.03	4.79	3.62	2.06	1.3		
Guadalajara	D1	31.4	18.3	10.09	8.37	4.91	3.14	15.9	8.82	4.76	3.87	2.2	1.38		
Puerto Vallarta	D1	40.26	23.91	13.27	11.1	6.6	4.24	20.18	11.4	6.19	5.07	2.93	1.84		
Monterrey	D1	35.73	20.22	12.35	9.63	5.71	3.67	18.13	9.77	5.84	4.46	2.57	1.62		
Mazatlán	D1	39.92	23.23	13.96	10.96	6.52	4.2	20.07	11.11	6.53	5.02	2.9	1.83		
Nuevo Laredo	D1	37.1	20.78	13.54	10.03	5.96	3.84	18.85	10.05	6.41	4.65	2.69	1.7		
Ensenada	F	26.98	14.35	9.71	6.96	4.08	2.62	13.66	6.91	4.58	3.21	1.83	1.15		
Paz. La	F	29.36	16.6	10	7.72	4.54	2.9	14.67	7.89	4.65	3.51	2.01	1.25		
Hermosillo	F	26.91	14.58	9.52	6.96	4.08	2.61	13.56	6.99	4.47	3.2	1.82	1.14		
Campeche	G	71.21	43.95	25.59	21.21	12.94	8.44	36.39	21.4	12.2	9.9	5.87	3.75		
Tapachula de Córdova y Ordóñez	G	71.49	45.89	24.02	21.41	13.04	8.48	36.4	22.25	11.41	9.96	5.9	3.76		
Tuxtla Gutiérrez	G	67.84	42.81	23.04	20.14	12.22	7.96	34.61	20.8	10.96	9.38	5.54	3.53		
Acapulco de Juárez	G	73.74	47.03	25.04	22.13	13.5	8.8	37.17	22.56	11.76	10.17	6.03	3.85		
Cancún	G	70.92	43.2	25.76	21.08	12.87	8.4	36.45	21.16	12.36	9.91	5.88	3.76		
Villahermosa	G	71.93	45.15	26.33	21.49	13.11	8.54	36.6	21.88	12.49	9.99	5.92	3.78		
Merida	G	70.95	43.39	27.58	21.1	12.87	8.4	36.32	21.16	13.17	9.87	5.86	3.75		

Tabla 16. Atenuación por lluvia para las ciudades seleccionadas

Ciudad	zona	Enlace descendente - 99.99% -						Enlace ascendente - 99.99% -					
		2.04	1.50	1 Mbps	500	384	64 kbps	2.04	1.50	1 Mbps	500	384	64 kbps
		Mbps	Mbps	kbps	kbps	kbps	kbps	Mbps	Mbps	1 Mbps	kbps	kbps	kbps
Diámetro (m)													
Xalapa-Enríquez	D3	7.64	7.35	7.56	7.55	7.42	7.61	120.01	102.89	84.01	63.89	49.81	19.58
Veracruz	D3	15.24	14.66	15.07	15.05	14.80	15.18	430.39	368.96	301.26	229.11	178.63	70.23
México D.F. (Cuauhtémoc)	D2	3.29	3.17	3.26	3.25	3.20	3.28	25.06	21.48	17.54	13.34	10.40	4.09
Guanajuato	D2	3.45	3.32	3.41	3.41	3.35	3.43	30.86	26.46	21.60	16.43	12.81	5.04
Tulancingo	D2	3.23	3.10	3.19	3.19	3.13	3.21	27.23	23.35	19.06	14.50	11.30	4.44
Cuernavaca	D2	4.40	4.23	4.35	4.35	4.27	4.38	48.03	41.17	33.62	25.57	19.93	7.84
Oaxaca de Juárez	D2	4.37	4.20	4.32	4.31	4.24	4.35	46.99	40.29	32.89	25.02	19.51	7.67
San Luis Potosí	D2	3.67	3.53	3.63	3.63	3.57	3.66	34.48	29.56	24.13	18.35	14.31	5.63
Heroica Matamoros	D2	7.31	7.03	7.23	7.22	7.10	7.28	118.38	101.48	82.86	63.02	49.13	19.32
Tampico	D2	7.98	7.67	7.89	7.88	7.75	7.95	141.92	121.67	99.34	75.55	58.91	23.16
Zacatecas	D2	2.77	2.66	2.74	2.73	2.69	2.76	20.76	17.79	14.53	11.05	8.62	3.39
Saltillo	D1	2.60	2.50	2.57	2.56	2.52	2.58	19.31	16.56	13.52	10.28	8.02	3.15
Guadalajara	D1	2.88	2.77	2.84	2.84	2.79	2.86	23.72	20.34	16.60	12.63	9.85	3.87
Puerto Vallarta	D1	4.99	4.80	4.94	4.93	4.85	4.97	65.74	56.36	46.02	35.00	27.29	10.73
Monterrey	D1	3.85	3.71	3.81	3.81	3.74	3.84	39.47	33.83	27.63	21.01	16.38	6.44
Mazatlán	D1	4.92	4.73	4.87	4.86	4.78	4.90	63.48	54.42	44.44	33.79	26.35	10.36
Nuevo Laredo	D1	4.24	4.08	4.19	4.18	4.11	4.22	46.40	39.78	32.48	24.70	19.26	7.57
Ensenada	F	2.14	2.06	2.12	2.11	2.08	2.13	14.56	12.48	10.19	7.75	6.04	2.38
Paz La	F	2.41	2.32	2.38	2.38	2.34	2.40	18.83	16.14	13.18	10.03	7.82	3.07
Hermosillo	F	2.10	2.02	2.08	2.07	2.04	2.09	14.33	12.29	10.03	7.63	5.95	2.34
Campeche	G	42.27	40.66	41.79	41.74	41.04	42.09	2347.3	2012.4	1643.1	1249.6	974.26	383.05
Tapachula de Córdova y Ordóñez	G	42.47	40.85	41.99	41.94	41.24	42.29	2403.9	2060.8	1682.6	1279.6	997.71	392.27
Tuxtla Gutiérrez	G	33.74	32.46	33.36	33.32	32.76	33.60	1581.3	1355.6	1106.9	841.77	656.31	258.04
Acapulco de Juárez	G	46.74	44.96	46.22	46.16	45.39	46.55	3095.6	2653.8	2166.8	1647.9	1284.8	505.16
Cancún	G	42.77	41.14	42.28	42.23	41.53	42.59	2289.1	1962.4	1602.3	1218.6	950.10	373.55
Villahermosa	G	43.41	41.76	42.92	42.87	42.16	43.23	2536	2174	1775.1	1350	1052.5	413.83
Merida	G	41.93	40.33	41.46	41.41	40.71	41.75	2285.1	1959	1599.5	1216.4	948.42	372.89

Tabla 17. Diámetros requeridos de antenas en las estaciones terrenas para diferentes disponibilidades

Ciudad	zona	Enlace descendente - 99.95% -						Enlace ascendente - 99.95% -					
		2.04	1.50	500	384	1 Mbpps	64 kbps	2.04	1.50	500	384	1 Mbpps	64 kbps
		Mbps	Mbps	kbps	kbps	kbps	kbps	Mbps	Mbps	kbps	kbps	kbps	kbps
Diámetro (m)													
Xalapa-Enríquez	D3	2.08	2.00	2.06	2.02	2.07	2.07	14.95	12.82	10.47	7.96	6.21	2.44
Veracruz	D3	3.24	3.11	3.20	3.14	3.22	3.22	34.61	29.67	24.23	18.42	14.36	5.65
México D.F. (Cuauhtémoc)	D2	1.26	1.21	1.25	1.22	1.26	1.26	5.53	4.74	3.87	2.94	2.29	0.90
Guanajuato	D2	1.25	1.20	1.23	1.21	1.24	1.24	6.15	5.27	4.30	3.27	2.55	1.00
Tulancingo	D2	1.21	1.16	1.19	1.17	1.20	1.20	5.76	4.94	4.03	3.07	2.39	0.94
Cuernavaca	D2	1.48	1.43	1.47	1.44	1.48	1.48	8.44	7.23	5.91	4.49	3.50	1.38
Oaxaca de Juárez	D2	1.50	1.45	1.49	1.46	1.50	1.50	8.60	7.37	6.02	4.58	3.57	1.40
San Luis Potosí	D2	1.28	1.23	1.27	1.25	1.28	1.28	6.46	5.54	4.52	3.44	2.68	1.05
Heroica Matamoros	D2	1.87	1.80	1.85	1.82	1.87	1.87	12.89	11.05	9.02	6.86	5.35	2.10
Tampico	D2	2.07	1.99	2.04	2.01	2.06	2.06	15.65	13.41	10.95	8.33	6.49	2.55
Zacatecas	D2	1.07	1.03	1.06	1.04	1.07	1.07	4.68	4.01	3.28	2.49	1.94	0.76
Saltillo	D1	1.01	0.97	1.00	0.98	1.00	1.00	4.32	3.70	3.02	2.30	1.79	0.70
Guadalajara	D1	1.12	1.07	1.10	1.08	1.11	1.11	5.25	4.50	3.67	2.79	2.18	0.86
Puerto Vallarta	D1	1.58	1.52	1.56	1.53	1.57	1.57	10.01	8.58	7.01	5.33	4.16	1.63
Monterrey	D1	1.28	1.23	1.26	1.24	1.27	1.27	6.62	5.67	4.63	3.52	2.75	1.08
Mazatlán	D1	1.52	1.46	1.50	1.48	1.51	1.51	9.29	7.96	6.50	4.94	3.85	1.52
Nuevo Laredo	D1	1.33	1.28	1.32	1.29	1.32	1.32	7.09	6.07	4.96	3.77	2.94	1.16
Ensenada	F	0.86	0.83	0.85	0.84	0.86	0.86	3.40	2.92	2.38	1.81	1.41	0.55
Paz, La	F	0.97	0.94	0.96	0.94	0.97	0.97	4.33	3.71	3.03	2.31	1.80	0.71
Hermosillo	F	0.87	0.83	0.86	0.84	0.86	0.86	3.47	2.97	2.43	1.84	1.44	0.57
Campeche	G	6.06	5.83	5.99	5.89	6.04	6.04	101.82	87.29	71.27	54.20	42.26	16.62
Tapachula de Córdova y Ordóñez	G	6.79	6.53	6.71	6.70	6.76	6.76	126.18	108.17	88.32	67.17	52.37	20.59
Tuxtla Gutiérrez	G	5.62	5.40	5.56	5.55	5.60	5.60	88.63	75.98	62.04	47.18	36.78	14.46
Acapulco de Juárez	G	7.03	6.77	6.96	6.95	7.00	7.00	143.12	122.69	100.18	76.18	59.40	23.35
Cancún	G	5.90	5.68	5.84	5.83	5.88	5.88	94.03	80.61	65.82	50.06	39.03	15.34
Villahermosa	G	6.45	6.20	6.37	6.26	6.42	6.42	116.20	99.61	81.33	61.85	48.23	18.96
Mérida	G	5.89	5.66	5.82	5.81	5.86	5.86	95.68	82.02	66.97	50.93	39.71	15.61

Tabla 17. Diámetros requeridos de antenas en las estaciones terrenas para diferentes disponibilidades (continuación)

Ciudad	zona	Enlace descendente - 99.9% -						Enlace ascendente - 99.9% -					
		2.04	1.50	1 Mbps	500	384	64 kbps	2.04	1.50	1 Mbps	500	384	64 kbps
		Diámetro (m)						Diámetro (m)					
Xalapa-Enríquez	D3	0.99	0.95	0.97	0.97	0.96	0.98	4.29	3.68	3.00	2.28	1.78	0.70
Veracruz	D3	1.31	1.26	1.30	1.30	1.28	1.31	7.32	6.27	5.12	3.90	3.04	1.19
México D.F. (Cuauhtémoc)	D2	0.71	0.68	0.70	0.70	0.69	0.70	2.21	1.89	1.55	1.18	0.92	0.36
Guanajuato	D2	0.67	0.64	0.66	0.66	0.65	0.66	2.26	1.94	1.58	1.20	0.94	0.37
Tulancingo	D2	0.65	0.62	0.64	0.64	0.63	0.64	2.13	1.83	1.49	1.14	0.89	0.35
Cuernavaca	D2	0.72	0.69	0.71	0.71	0.70	0.72	2.57	2.21	1.80	1.37	1.07	0.42
Oaxaca de Juárez	D2	0.71	0.69	0.71	0.70	0.69	0.71	2.53	2.17	1.77	1.35	1.05	0.41
San Luis Potosí	D2	0.72	0.69	0.71	0.71	0.70	0.71	2.53	2.17	1.77	1.35	1.05	0.41
Heroica Matamoros	D2	0.99	0.95	0.98	0.98	0.96	0.99	4.41	3.78	3.09	2.35	1.83	0.72
Tampico	D2	1.00	0.96	0.99	0.99	0.97	1.00	4.57	3.92	3.20	2.43	1.90	0.75
Zacatecas	D2	0.67	0.65	0.66	0.66	0.65	0.67	2.26	1.94	1.58	1.20	0.94	0.37
Saltillo	D1	0.63	0.60	0.62	0.62	0.61	0.62	2.05	1.76	1.44	1.09	0.85	0.34
Guadalajara	D1	0.62	0.60	0.61	0.61	0.60	0.62	2.04	1.75	1.43	1.09	0.85	0.33
Puerto Vallarta	D1	0.76	0.73	0.76	0.75	0.74	0.76	2.94	2.52	2.06	1.57	1.22	0.48
Monterrey	D1	0.73	0.71	0.72	0.72	0.71	0.73	2.67	2.29	1.87	1.42	1.11	0.44
Mazatlán	D1	0.80	0.77	0.80	0.79	0.78	0.80	3.19	2.74	2.24	1.70	1.33	0.52
Nuevo Laredo	D1	0.80	0.77	0.79	0.79	0.78	0.80	3.08	2.64	2.15	1.64	1.28	0.50
Ensenada	F	0.61	0.59	0.60	0.60	0.59	0.61	1.99	1.71	1.40	1.06	0.83	0.33
Paz, La	F	0.61	0.58	0.60	0.60	0.59	0.60	2.03	1.74	1.42	1.08	0.84	0.33
Hermosillo	F	0.60	0.57	0.59	0.59	0.58	0.59	1.94	1.66	1.36	1.03	0.80	0.32
Campeche	G	1.79	1.72	1.77	1.77	1.74	1.78	12.30	10.54	8.61	6.55	5.10	2.01
Tapachula de Córdova y Ordóñez	G	1.60	1.54	1.58	1.58	1.55	1.59	10.18	8.72	7.12	5.42	4.22	1.66
Tuxtla Gutiérrez	G	1.51	1.45	1.49	1.49	1.46	1.50	9.10	7.80	6.37	4.84	3.78	1.48
Acapulco de Juárez	G	1.67	1.60	1.65	1.65	1.62	1.66	11.38	9.75	7.96	6.06	4.72	1.86
Cancún	G	1.84	1.77	1.82	1.82	1.79	1.83	12.63	10.83	8.84	6.72	5.24	2.06
Millahermosa	G	1.85	1.78	1.83	1.83	1.80	1.85	13.30	11.41	9.31	7.08	5.52	2.17
Merida	G	2.04	1.97	2.02	2.02	1.99	2.04	15.50	13.29	10.85	8.25	6.43	2.53

Tabla 17. Diámetros requeridos de antenas en las estaciones terrenas para diferentes disponibilidades (continuación)

Ciudad	zona	Enlace descendente - 99.8% -						Enlace ascendente - 99.8% -								
		2.04 Mbps		1.50 Mbps		500 kbps		384 kbps		64 kbps		500 kbps		384 kbps		
		Diámetro (m)						Diámetro (m)								
Xalapa-Enriquez	D3	0.75	0.72	0.74	0.74	0.74	0.73	0.74	0.73	0.74	2.78	2.38	1.95	1.48	1.15	0.45
Veracruz	D3	0.94	0.90	0.93	0.93	0.93	0.91	0.93	0.91	4.20	3.60	2.94	2.24	1.74	0.69	
México D.F. (Cuauhtémoc)	D2	0.59	0.57	0.58	0.58	0.58	0.57	0.59	0.57	1.70	1.46	1.19	0.91	0.71	0.28	
Guanajuato	D2	0.57	0.55	0.57	0.57	0.57	0.56	0.57	0.56	1.81	1.56	1.27	0.97	0.75	0.30	
Tlancingo	D2	0.56	0.54	0.55	0.55	0.55	0.54	0.56	0.54	1.75	1.50	1.22	0.93	0.73	0.29	
Cuernavaca	D2	0.62	0.60	0.61	0.61	0.61	0.60	0.62	0.60	2.08	1.78	1.46	1.11	0.86	0.34	
Oaxaca de Juárez	D2	0.62	0.60	0.61	0.61	0.61	0.60	0.62	0.60	2.07	1.78	1.45	1.10	0.86	0.34	
San Luis Potosí	D2	0.59	0.56	0.58	0.58	0.58	0.57	0.58	0.57	1.88	1.61	1.31	1.00	0.78	0.31	
Heroica Matamoros	D2	0.74	0.71	0.73	0.73	0.73	0.72	0.73	0.72	2.76	2.36	1.93	1.47	1.14	0.45	
Tampico	D2	0.76	0.73	0.75	0.75	0.75	0.74	0.75	0.74	2.93	2.51	2.05	1.56	1.21	0.48	
Zacatecas	D2	0.53	0.51	0.53	0.53	0.53	0.52	0.53	0.52	1.61	1.38	1.13	0.86	0.67	0.26	
Saltillo	D1	0.52	0.50	0.52	0.52	0.52	0.51	0.52	0.51	1.58	1.35	1.10	0.84	0.65	0.26	
Guadalajara	D1	0.54	0.52	0.53	0.53	0.53	0.52	0.54	0.52	1.67	1.43	1.17	0.89	0.69	0.27	
Puerto Vallarta	D1	0.65	0.62	0.64	0.64	0.64	0.63	0.64	0.63	2.29	1.96	1.60	1.22	0.95	0.37	
Monterrey	D1	0.60	0.57	0.59	0.59	0.59	0.58	0.59	0.58	1.96	1.68	1.37	1.04	0.81	0.32	
Mazatlán	D1	0.64	0.62	0.64	0.64	0.64	0.63	0.64	0.63	2.26	1.94	1.58	1.20	0.94	0.37	
Nuevo Laredo	D1	0.62	0.59	0.61	0.61	0.61	0.60	0.61	0.60	2.06	1.76	1.44	1.09	0.85	0.34	
Ensenada	F	0.49	0.47	0.48	0.48	0.48	0.48	0.49	0.48	1.45	1.24	1.02	0.77	0.60	0.24	
Paz, La	F	0.51	0.49	0.50	0.50	0.50	0.49	0.50	0.49	1.56	1.34	1.09	0.83	0.65	0.25	
Hermosillo	F	0.49	0.47	0.48	0.48	0.48	0.47	0.48	0.47	1.44	1.24	1.01	0.77	0.60	0.24	
Campeche	G	1.31	1.26	1.30	1.30	1.30	1.28	1.31	1.28	7.42	6.36	5.20	3.95	3.08	1.21	
Tapachula de Córdova y Ordóñez	G	1.32	1.27	1.30	1.30	1.30	1.28	1.31	1.28	7.54	6.46	5.28	4.01	3.13	1.23	
Tuxtla Gutiérrez	G	1.22	1.17	1.21	1.21	1.21	1.18	1.21	1.18	6.52	5.59	4.56	3.47	2.70	1.06	
Acapulco de Juárez	G	1.35	1.30	1.33	1.33	1.33	1.31	1.34	1.31	8.14	6.98	5.70	4.33	3.38	1.33	
Cancún	G	1.32	1.27	1.31	1.31	1.31	1.28	1.32	1.28	7.37	6.32	5.16	3.93	3.06	1.20	
Villahermosa	G	1.32	1.27	1.31	1.31	1.31	1.29	1.32	1.29	7.63	6.54	5.34	4.06	3.17	1.24	
Mérida	G	1.31	1.26	1.30	1.30	1.30	1.27	1.31	1.27	7.36	6.30	5.14	3.91	3.05	1.20	

Tabla 17. Diámetros requeridos de antenas en las estaciones terrenas para diferentes disponibilidades (continuación)

Ciudad	zona	Enlace descendente - 99.5% -						Enlace ascendente - 99.5% -										
		2.04 Mbps		1.50 Mbps		500 kbps		384 kbps		1 Mbps		500 kbps		384 kbps				
		Diámetro (m)						Diámetro (m)										
Xalapa-Enríquez	D3	0.51	0.49	0.50	0.50	0.49	0.50	0.49	0.50	0.50	0.49	0.50	1.54	1.32	1.07	0.82	0.64	0.25
Veracruz	D3	0.59	0.57	0.58	0.58	0.57	0.58	0.57	0.58	0.57	0.58	1.99	1.71	1.40	1.06	0.83	0.33	
México D F. (Cuauhtémoc)	D2	0.44	0.42	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	1.14	0.97	0.79	0.60	0.47	0.19	
Guanajuato	D2	0.42	0.41	0.42	0.42	0.41	0.42	0.41	0.42	0.41	0.42	1.18	1.01	0.83	0.63	0.49	0.19	
Tulancingo	D2	0.42	0.40	0.41	0.41	0.40	0.41	0.40	0.41	0.40	0.41	1.15	0.99	0.81	0.61	0.48	0.19	
Cuernavaca	D2	0.45	0.43	0.44	0.44	0.43	0.44	0.43	0.44	0.43	0.44	1.28	1.10	0.90	0.68	0.53	0.21	
Oaxaca de Juárez	D2	0.44	0.43	0.44	0.44	0.43	0.44	0.43	0.44	0.43	0.44	1.28	1.10	0.90	0.68	0.53	0.21	
San Luis Potosí	D2	0.43	0.41	0.42	0.42	0.41	0.42	0.41	0.42	0.41	0.42	1.21	1.03	0.84	0.64	0.50	0.20	
Heroica Matamoros	D2	0.50	0.48	0.50	0.50	0.48	0.50	0.49	0.50	0.49	0.50	1.54	1.32	1.08	0.82	0.64	0.25	
Tampico	D2	0.51	0.49	0.51	0.51	0.49	0.51	0.50	0.51	0.50	0.51	1.59	1.37	1.12	0.85	0.66	0.26	
Zacatecas	D2	0.40	0.39	0.40	0.40	0.39	0.40	0.39	0.40	0.39	0.40	1.10	0.94	0.77	0.58	0.46	0.18	
Saltillo	D1	0.40	0.38	0.39	0.39	0.38	0.39	0.39	0.39	0.39	0.40	1.09	0.93	0.76	0.58	0.45	0.18	
Guadalajara	D1	0.40	0.39	0.40	0.40	0.39	0.40	0.39	0.40	0.39	0.40	1.12	0.96	0.79	0.60	0.47	0.18	
Puerto Vallarta	D1	0.46	0.44	0.45	0.45	0.44	0.45	0.44	0.45	0.44	0.45	1.36	1.17	0.95	0.73	0.57	0.22	
Monterrey	D1	0.44	0.42	0.43	0.43	0.42	0.43	0.42	0.43	0.42	0.43	1.24	1.07	0.87	0.66	0.52	0.20	
Mazatlán	D1	0.46	0.44	0.45	0.45	0.44	0.45	0.44	0.45	0.44	0.45	1.36	1.16	0.95	0.72	0.56	0.22	
Nuevo Laredo	D1	0.45	0.43	0.44	0.44	0.43	0.44	0.43	0.44	0.43	0.44	1.29	1.10	0.90	0.68	0.53	0.21	
Ensenada	F	0.38	0.37	0.38	0.38	0.37	0.38	0.37	0.38	0.37	0.38	1.04	0.89	0.73	0.55	0.43	0.17	
Paz, La	F	0.39	0.37	0.38	0.38	0.37	0.38	0.37	0.38	0.37	0.38	1.08	0.93	0.76	0.58	0.45	0.18	
Hermosillo	F	0.38	0.36	0.37	0.37	0.36	0.37	0.36	0.37	0.36	0.37	1.03	0.89	0.72	0.55	0.43	0.17	
Campeche	G	0.74	0.71	0.73	0.73	0.71	0.73	0.72	0.73	0.72	0.74	2.86	2.46	2.00	1.52	1.19	0.47	
Tapachula de Córdova y Ordóñez	G	0.74	0.71	0.73	0.73	0.71	0.73	0.72	0.73	0.72	0.74	2.87	2.46	2.01	1.53	1.19	0.47	
Tuxtla Gutiérrez	G	0.70	0.68	0.70	0.69	0.68	0.70	0.69	0.68	0.69	0.68	2.62	2.25	1.83	1.39	1.09	0.43	
Acapulco de Juárez	G	0.75	0.72	0.74	0.74	0.72	0.74	0.73	0.74	0.73	0.75	3.01	2.58	2.11	1.60	1.25	0.49	
Cancún	G	0.75	0.72	0.74	0.74	0.72	0.74	0.73	0.74	0.73	0.75	2.86	2.45	2.00	1.52	1.19	0.47	
Villahermosa	G	0.74	0.72	0.74	0.74	0.72	0.74	0.73	0.74	0.73	0.74	2.90	2.49	2.03	1.55	1.21	0.47	
Mérida	G	0.74	0.71	0.73	0.73	0.71	0.73	0.72	0.73	0.72	0.74	2.85	2.44	2.00	1.52	1.18	0.47	

Tabla 17. Diámetros requeridos de antenas en las estaciones terrenas para diferentes disponibilidades (continuación)

Ciudad	zona	Enlace descendente - 99% -						Enlace ascendente - 99% -					
		2.04	1.50	500	384	2.04	1.50	500	384	2.04	1.50	500	384
		Mbps	Mbps	kbps	kbps	Mbps	Mbps	kbps	kbps	Mbps	Mbps	kbps	kbps
		Diámetro (m)											
Xalapa-Enríquez	D3	0.40	0.39	0.40	0.40	0.39	0.42	1.13	0.97	0.79	0.60	0.47	0.18
Veracruz	D3	0.45	0.43	0.45	0.45	0.44	0.47	1.34	1.15	0.94	0.71	0.56	0.22
México D.F. (Cuauhtémoc)	D2	0.37	0.36	0.37	0.37	0.36	0.39	0.92	0.79	0.65	0.49	0.38	0.15
Guanajuato	D2	0.35	0.34	0.35	0.35	0.34	0.37	0.95	0.81	0.66	0.50	0.39	0.15
Tulancingo	D2	0.35	0.34	0.35	0.35	0.34	0.37	0.93	0.80	0.65	0.50	0.39	0.15
Cuernavaca	D2	0.37	0.35	0.36	0.36	0.36	0.39	1.00	0.86	0.70	0.53	0.42	0.16
Oaxaca de Juárez	D2	0.37	0.35	0.36	0.36	0.36	0.39	1.00	0.86	0.70	0.53	0.41	0.16
San Luis Potosí	D2	0.36	0.35	0.36	0.35	0.35	0.38	0.96	0.83	0.67	0.51	0.40	0.16
Heroica Matamoros	D2	0.40	0.39	0.40	0.40	0.39	0.42	1.14	0.97	0.79	0.60	0.47	0.19
Tampico	D2	0.41	0.39	0.40	0.40	0.40	0.43	1.16	0.99	0.81	0.62	0.48	0.19
Zacatecas	D2	0.34	0.33	0.34	0.34	0.33	0.36	0.91	0.78	0.63	0.48	0.38	0.15
Saltillo	D1	0.34	0.33	0.34	0.34	0.33	0.36	0.90	0.77	0.63	0.48	0.37	0.15
Guadalajara	D1	0.34	0.33	0.34	0.34	0.33	0.36	0.92	0.79	0.64	0.49	0.38	0.15
Puerto Vallarta	D1	0.38	0.36	0.37	0.37	0.37	0.39	1.04	0.89	0.73	0.55	0.43	0.17
Monterrey	D1	0.36	0.35	0.36	0.36	0.35	0.38	0.98	0.84	0.69	0.52	0.41	0.16
Mazatlán	D1	0.38	0.36	0.37	0.37	0.37	0.39	1.04	0.89	0.73	0.55	0.43	0.17
Nuevo Laredo	D1	0.37	0.36	0.37	0.37	0.36	0.39	1.01	0.86	0.71	0.54	0.42	0.16
Ensenada	F	0.33	0.32	0.33	0.33	0.32	0.35	0.88	0.75	0.62	0.47	0.37	0.14
Paz, La	F	0.34	0.32	0.33	0.33	0.33	0.35	0.89	0.77	0.63	0.48	0.37	0.15
Hermosillo	F	0.33	0.32	0.33	0.33	0.32	0.35	0.87	0.75	0.61	0.47	0.36	0.14
Campeche	G	0.53	0.51	0.53	0.53	0.52	0.56	1.71	1.46	1.19	0.91	0.71	0.28
Tapachula de Córdova y Ordóñez	G	0.53	0.51	0.53	0.52	0.52	0.56	1.70	1.46	1.19	0.91	0.71	0.28
Tuxtla Gutiérrez	G	0.51	0.49	0.51	0.51	0.50	0.54	1.60	1.37	1.12	0.85	0.67	0.26
Acapulco de Juárez	G	0.54	0.52	0.53	0.53	0.52	0.56	1.75	1.50	1.23	0.93	0.73	0.29
Cancún	G	0.54	0.52	0.53	0.53	0.52	0.56	1.71	1.47	1.20	0.91	0.71	0.28
Villahermosa	G	0.53	0.51	0.53	0.53	0.52	0.56	1.72	1.47	1.20	0.91	0.71	0.28
Mérida	G	0.54	0.51	0.53	0.53	0.52	0.56	1.70	1.46	1.19	0.91	0.71	0.28

Tabla 17. Diámetros requeridos de antenas en las estaciones terrenas para diferentes disponibilidades (continuación)

Ciudad	zona	Enlace descendente - cielo despejado -					Enlace ascendente - cielo despejado -									
		2.04	1.50	500	384	64 kbps	2.04	1.50	500	384	64 kbps					
		Mbps	Mbps	kbps	kbps	kbps	Mbps	Mbps	kbps	kbps	kbps					
		Diámetro (m)														
Saltillo	D1	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.64	0.55	0.45	0.34	0.27	0.11
Guadalajara	D1	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.64	0.55	0.45	0.34	0.27	0.10
Puerto Vallarta	D1	0.25	0.24	0.25	0.24	0.24	0.25	0.24	0.24	0.25	0.64	0.55	0.45	0.34	0.26	0.10
Monterrey	D1	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.65	0.55	0.45	0.34	0.27	0.11
Mazatlán	D1	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.64	0.55	0.45	0.34	0.27	0.10
Nuevo Laredo	D1	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.65	0.56	0.45	0.34	0.27	0.11
México D.F. (Cuauhtémoc)	D2	0.27	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.27	0.64	0.55	0.45	0.34	0.27	0.10
Guanajuato	D2	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.64	0.55	0.45	0.34	0.27	0.10
Tulancingo	D2	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.64	0.55	0.45	0.34	0.27	0.10
Cuernavaca	D2	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.64	0.55	0.45	0.34	0.27	0.10
Oaxaca de Juárez	D2	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.64	0.55	0.45	0.34	0.27	0.10
San Luis Potosí	D2	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.64	0.55	0.45	0.34	0.27	0.10
Heroica Matamoros	D2	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.65	0.55	0.45	0.34	0.27	0.11
Tampico	D2	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.64	0.55	0.45	0.34	0.27	0.10
Zacatecas	D2	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.64	0.55	0.45	0.34	0.27	0.10
Xalapa-Enríquez	D3	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.64	0.55	0.45	0.34	0.27	0.10
Veracruz	D3	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.64	0.55	0.45	0.34	0.27	0.10
Ensenada	F	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.65	0.56	0.46	0.35	0.27	0.11
Paz, La	F	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.64	0.55	0.45	0.34	0.27	0.10
Hermosillo	F	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.65	0.55	0.45	0.34	0.27	0.11
Campeche	G	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.65	0.55	0.45	0.34	0.27	0.11
Tapachula de Córdova y Ordóñez	G	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.64	0.55	0.45	0.34	0.27	0.10
Tuxtla Gutiérrez	G	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.64	0.55	0.45	0.34	0.27	0.10
Acapulco de Juárez	G	0.25	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.25	0.64	0.55	0.45	0.34	0.26	0.10
Cancún	G	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.65	0.56	0.46	0.35	0.27	0.11
Milahermosa	G	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.64	0.55	0.45	0.34	0.27	0.10
Mérida	G	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.65	0.56	0.45	0.34	0.27	0.11

Tabla 17. Diámetros requeridos de antenas en las estaciones terrenas para diferentes disponibilidades (continuación)

Como se podrá observar en la Tabla 17, los diámetros de las antenas calculados para los enlaces ascendentes son mayores que los que se calcularon para los enlaces descendentes. Esto se debe principalmente a la frecuencia que se utiliza en cada enlace. Sin embargo, existen otros factores que afectan las dimensiones de la antena como es la Figura de Mérito del Satélite (G/T). Considerando las diferencias para ambos enlaces, y tomando en cuenta que una estación terrena se utiliza para la transmisión y recepción simultánea en un enlace satelital, es necesario satisfacer los requerimientos mínimos para que el comportamiento del sistema sea satisfactorio. Es por esa razón por la que, para el diseño de una estación terrena se toma el valor máximo del diámetro. De esta forma quedan satisfechas las condiciones mínimas para el desempeño del enlace ascendente y al mismo tiempo se satisfacen y se benefician las condiciones para el enlace descendente; en otras palabras, el sistema cumplirá la disponibilidad para la cual se diseñó para el enlace ascendente mientras que tendrá una disponibilidad mayor a ésta en la sección del enlace descendente.

En cuanto a los diámetros de las antenas requeridos para establecer enlaces con niveles de disponibilidad del 99.99%, se puede ver que los resultados obtenidos para las distintas ciudades de México muestran las características de una antena que son imposibles de realizar por sus grandes dimensiones y por consiguiente por su alto costo.

Las disponibilidades típicas que se emplean para el diseño de los sistemas en Banda Ka están entre 99.5% y 99.7%³. En algunos sitios se pueden obtener disponibilidades mayores, dependiendo del clima del lugar principalmente así como de la velocidad de transmisión que se desee emplear. Esto puede ser observado en los cálculos arrojados para la disponibilidad de 99.9%. En esta parte de la Tabla 17 la realización del enlace con esta disponibilidad puede ser hecha solo en algunas zonas y/o en algunas velocidades de transmisión. Este es el caso de la zona F con todas las velocidades de transmisión o de la zona D2 en donde solamente se puede alcanzar esta disponibilidad en las velocidades mas bajas considerando que la utilización de antenas de hasta 2 metros puede ser demasiado costoso.

En la sección de disponibilidades de 99.8% de la Tabla 17 se puede observar que en muchos de los sitios es posible realizar el enlace con antenas de entre 1.5m a 2m para velocidades altas de transmisión. Sin embargo, en la zona G no es posible establecer el enlace mas que para una velocidad de transmisión de 64 kbps.

Para la disponibilidad de 99.5% es posible realizar todos los enlaces tomando antenas de hasta 3 metros para la región G. En las otras regiones es posible realizar el enlace con antenas de hasta 1.5 m a excepción de Veracruz, en donde se necesita una antena de 2m para poder transmitir a una tasa de 2.04 Mbps.

Si se baja la disponibilidad hasta 99% es posible realizar los enlaces en la zona G pero con antenas de mas de 1.7m. Para las demás regiones, es posible realizar los enlaces con antenas de 1m. Sin embargo, el hablar de una disponibilidad de

99% significa hablar de un sistema que se tomará indisponible casi 4 días distribuidos a lo largo del año.

La sección referente al cielo despejado comparada con las otras secciones refleja la variación del diámetro de la antena con respecto a la disponibilidad deseada. Se puede ver que la contribución de la lluvia es determinante para el diseño del sistema.

Vale la pena recordar que en el diseño de un sistema se deben de tomar en cuenta varios factores. El factor de la calidad en el enlace es importante además de la disponibilidad deseada dependiendo del servicio que se prestará, sin embargo, el factor económico es determinante en la mayoría de los casos.

En la Tabla 18 se da un resumen de los diámetros requeridos para las estaciones terrenas por zona para satisfacer disponibilidades de 99.8% y 99.5% a partir de los resultados de la Tabla 17.

Zona	99.8%				99.5%				99%			
	Diámetro (m)				Diámetro (m)				Diámetro (m)			
	2.04 Mbps	1 Mbps	384 kbps	64 kbps	2.04 Mbps	1 Mbps	384 kbps	64 kbps	2.04 Mbps	1 Mbps	384 kbps	64 kbps
D3	4.2	3	1.7	0.7	2	1.5	1	0.3	1.3	1	0.60	0.2
D2	3	2	1.2	0.5	1.5	1	0.6	0.3	1.1	0.8	0.5	0.2
D1	2.3	1.6	1	0.4	1.4	1	0.6	0.2	1	0.7	0.45	0.2
F	1.5	1	0.6	0.3	1	0.75	0.45	0.2	0.90	0.60	0.40	0.2
G	8	5.7	3.4	1.3	3	2	1.20	0.5	1.70	1.20	0.70	0.3

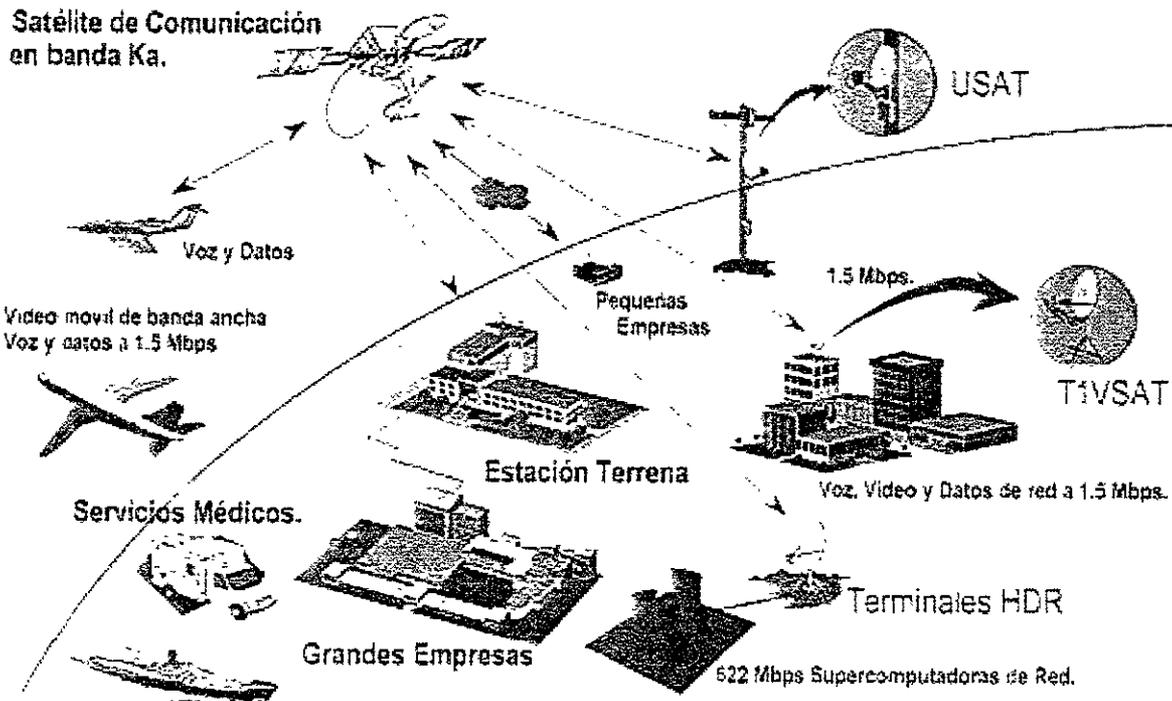
Tabla 18. Diámetros requeridos en las antenas de las estaciones terrenas por zona a diferentes disponibilidades

Como se ve en la Tabla 18, se pueden realizar disponibilidades del orden de 99.5%, sin embargo, para algunas zonas geográficas con tasas bajas de lluvia esta disponibilidad puede ser mejorada y para zonas con tasas de lluvia altas ésta disponibilidad puede ser alcanzada con una mayor inversión en el equipo.

Referencias

1. Rosado Rodríguez Carlos, *Comunicación por Satélite, principios, tecnologías y sistemas*. Limusa, México 1999, p 122.
2. J. Fikart, "Versatile RF Front End for Small Ka-band Ground Terminals", Third Ka-band Utilization Conference, Sorrento, Italy, Sept. 1997, pp 385-392
3. A. Grami, K. Gordon, and A. Shoamanesh. "Amk F2 Ka-Band system: High-speed Internet access", Telesat Canada. <http://www.telesat.ca/news/speeches/00-02.html>.
4. Apuntes de la clase de *Temas selectos de Telecomunicaciones* impartida por el Dr. Rodolfo Neri Vela durante el semestre 2000-3 en la Facultad de Ingeniería, UNAM.
5. Apuntes de los cursos de la División de Educación Continua y de la clase de *Seminario de Ingeniería en Telecomunicaciones* impartida por el Dr. Salvador Landeros Ayala en la Facultad de Ingeniería, UNAM.
6. Apuntes de la clase de *Sistemas de Radiocomunicaciones* impartida por el Ing. Jesús Reyes García durante el semestre 2000-2 en la Facultad de Ingeniería, UNAM
7. Datos geográficos obtenidos de www.inegi.gob.mx. INEGI. México, 2001

Capítulo 6. Perspectivas.



Actualmente, la avanzada infraestructura de telecomunicaciones está limitada sólo a las áreas urbanas desarrolladas del mundo. Esto deja a la mayoría de la población mundial sin acceso. Y en muchos casos ni siquiera acceso a los servicios de telecomunicaciones básicos.

Sin conocer todas las aplicaciones y protocolos de datos que una red de banda ancha tendrá que soportar en el Siglo 21, es razonable asumir que esas aplicaciones serán desarrolladas en las áreas urbanas avanzadas del mundo desarrollado, donde las fibras ópticas determinan la norma. Los sistemas de satélites ofrecen la capacidad de proveer acceso conmutado de banda ancha, independiente de la ubicación física, extendiendo el alcance de las redes y aplicaciones a cualquier parte del mundo. Pero para asegurar una compatibilidad transparente con esas redes, se debe crear un sistema de satélites con las mismas características esenciales de las redes de fibra óptica: canales de banda ancha, bajas tasas de errores y bajos tiempos de retardo.

Uno de los principios fundamentales de la Internet es la noción de que todas las aplicaciones pasan a ejecutarse en una plataforma común de red; es decir, el concepto de una red abierta basada en normas y protocolos comunes. La idea de redes autónomas separadas o de redes específicas para una aplicación, está desapareciendo con rapidez. Todas las aplicaciones se ejecutarán en las mismas redes, utilizando los mismos protocolos. En estas redes con conmutación de paquetes en la cual la voz, video, y datos son solamente paquetes de bits

digitalizados, no es factible separar las aplicaciones que pueden tolerar demora de aquellas en que las demoras resultan inaceptables. Como resultado de ello, la red debe ser diseñada para la aplicación más exigente.

Sistemas de satélites de órbita geoestacionaria.

Tal como las redes terrestres han evolucionado desde sistemas centralizados contruidos alrededor de una sola computadora central a redes distribuidas de computadoras personales interconectadas, las redes de satélites basadas en el espacio están evolucionando desde redes centralizadas que dependen de un solo satélite geoestacionario a redes distribuidas de satélites de órbita terrestre baja interconectados. En los sistemas geoestacionarios, cualquier falla o pérdida individual del satélite es catastrófica para el sistema. Para reducir esta contingencia a niveles aceptables, se debe diseñar la fiabilidad muy cerca del punto de rendimientos decrecientes donde ganancias adicionales de fiabilidad solamente pueden ser alcanzadas a un costo muy alto.

Sistemas de satélite de órbita terrestre baja

La evolución de los satélites geoestacionarios a satélites de órbita terrestre baja (LEO) ha resultado en numerosos sistemas propuestos de satélites globales, los cuales pueden ser agrupados en tres tipos distintos. Estos sistemas LEO pueden distinguirse mejor haciendo referencia a sus complementos terrestres: mensajería personal, celular y fibra óptica.

El mercado del futuro

La convergencia de la informática y las telecomunicaciones están causando que todos aquellos elementos que uno asocia con un estándar de vida alto - desde la educación y la salud hasta el desarrollo económico y los servicios públicos - se conviertan cada vez más dependientes de un flujo de información que aumenta continuamente. En áreas altamente urbanizadas, esta exigencia de información está siendo satisfecha a través de conexiones de fibras ópticas con anchos de banda altos y de alta calidad. Cada vez más, las instituciones y los individuos están utilizando conexiones de banda ancha para tener acceso al Internet, operar computadoras en red, agregar y concentrar enlaces de líneas telefónicas, y trabajar a distancia. Pero, al salir de las ciudades, estos servicios de telecomunicaciones similares a los de las fibras ópticas resultan de un costo elevado o sencillamente no se encuentran a ningún precio.

Habrá una gama amplia de clientes, desde los trabajadores de información que no están dispuestos a ser encerrados en ciudades cada vez más congestionadas, a países que están haciendo conexiones terrestres con líneas telefónicas agregadas desde remotas estaciones celulares, a empresas multinacionales conectando sus sucursales a través del mundo a sus existentes redes empresariales globales. El desarrollo de los nuevos sistemas puede proporcionar conectividad transparente a todas las instituciones e individuos, cuando y donde quieran, obteniendo el acceso a servicios de telecomunicaciones semejantes a

aquellos provistos a través de fibras ópticas y que solamente están disponibles en este momento en áreas urbanas altamente desarrolladas.

El crecimiento de la demanda del ancho de banda es exponencial, analistas predicen que el mercado de servicios de banda ancha tendrá un valor de entre 20 a 30 billones de dólares para el 2005.

Entre los factores que más contribuirán a una mayor demanda de ancho de banda es la creciente demanda del acceso a Internet que impera hoy en todo el mundo.

Debido a todo lo anterior, es que se están desarrollando actualmente toda una gama de proyectos que pretenden emplear el uso de servicios satelitales fijos y móviles, haciendo uso de la banda Ka para poder cubrir la necesidades de un mayor ancho de banda que la sociedad esta demandando para el mañana.

Con el surgimiento de los nuevos sistemas satelitales en banda Ka se planea cubrir la necesidades de:

- Organizaciones gubernamentales
- Escuelas
- Hospitales
- Grandes empresas corporativas
- Medianas y pequeñas empresas.
- Oficinas
- Hogares
- Usuarios.
- Etc.

Las grandes corporaciones, así como las organizaciones gubernamentales, tienen gran confianza en que los servicios de comunicación basados en la red les ayudará a lograr sus metas:

- Reducción de costos de operación.
- Incremento en la productividad
- Proveer mejores servicios al consumidor
- Y en el caso de corporaciones, llegar a ser mas competitivos.

La ventaja del comercio basado en Internet, el cual conecta negocios con socios y consumidores a través de una red en tiempo real, da ahora a las organizaciones una gran oportunidad para conseguir sus metas.

Sin embargo, muy frecuentemente, ellos enfrentan obstáculos sustanciales para poder obtener una conexión de información de alta velocidad, conexión que necesitan para correr sus aplicaciones multimedia compañía-compañía y compañía-consumidor. Las redes terrestres de banda ancha solo sirven en

grandes áreas metropolitanas, así, muchas oficinas remotas no tienen la oportunidad de obtener este servicio.

Las compañías grandes, medianas y pequeñas están descubriendo que el comercio electrónico es una gran oportunidad. Las aplicaciones multimedia comerciales, dan a ellos, el poder de extenderse dentro de los mercados más rápidamente, y económicamente. Habilitando la capacidad de expandir su base de consumidores e incrementando sus ingresos. El comercio electrónico transforma a las pequeñas y medianas empresas en compañías globales.

No obstante, ellos encuentran los mismos problemas que las grandes compañías e instituciones gubernamentales: el obtener una conectividad de información de alta velocidad donde y cuando ellos lo quieran. Para esas compañías, las conexiones de banda ancha son particularmente difíciles de solventar, ya que estos no pueden justificar los gastos mensuales de enlaces dedicados T1 a las redes terrestres de banda ancha.

Las compañías y organizaciones gubernamentales no son el único segmento de consumidores que necesitan de una conexión de alta velocidad. Cada vez más y más gente que accesa dentro de la Internet, requieren de adicional ancho de banda para poder tomar ventaja de las numerosas oportunidades que la red de redes ofrece. Actualmente para muchos individuos esas oportunidades tanto personales como profesionales que ofrece la Internet, están lejos de su alcance.

El cable MODEM ofrece un acceso rápido, pero mucha gente finalmente ha descubierto que esa congestión sobre un cable de red compartido, puede disminuir su velocidad de acceso significativamente. El servicio DSL está emergiendo como una alternativa de banda ancha, pero este, es disponible solo para aquellos que viven muy cerca de una oficina central de una compañía telefónica. Conexiones dedicadas de alta velocidad (T1), están lejos del alcance financiero de la gran mayoría de consumidores individuales y de empresarios pequeños.

Debido a todo lo anterior, es por ello que se están desarrollando redes de banda ancha basados en satélites. Con esto se pretende satisfacer la gran demanda que esta emergiendo hacia las redes de banda ancha.

Los servicios que pretenden proporcionar la siguiente generación de satélites en banda Ka contemplan los siguientes servicios :

- Telefonía
- Acceso a Internet a alta velocidad.
- Videoconferencias en tiempo real.
- Servicios de E-mail y correo de voz.
- Vídeo sobre demanda.
- Aprendizaje a distancia.
- Transmisión de señal de TV.
- Servicios Multimedia Interactivos.

- Enlaces punto a punto.
- Enlaces punto a multipunto.
- Servicios de rastreo.

Como podemos notar, el futuro de las comunicaciones por satélite en la banda Ka es muy alentador. Esta es la razón por la cual es necesario que los países que deseen participar en esta nueva ola tecnológica de comunicaciones satelitales, lleven a cabo estudios más detallados sobre el comportamiento de las señales en banda Ka, esto con el fin de implementar en esos lugares sistemas más eficientes, así como aumentar la calidad de los servicios ya sean fijos ó móviles que se pretendan proporcionar. Esto implicará, por supuesto, no quedar excluidos de todas las grandes ventajas que se prevé traerá consigo la siguiente generación de satélites de comunicación en banda Ka.

Capítulo 7.

Conclusiones.

El auge que ha tenido en los últimos años el área de comunicaciones por satélites demanda cada vez un mayor ancho de banda para poder satisfacer las necesidades que los usuarios requieren, así como de las necesidades futuras que demandarán. Es por ello que para poder cubrir las necesidades de los servicios fijos y móviles, se empezó a analizar la posibilidad de explotar la banda Ka (20GHz-30GHz), pero no fue hasta que se llevaron a cabo una serie de experimentos que culminaron con los realizados con el satélite ACTS y que sentaron las bases para poder desarrollar los primeros sistemas de comunicación comercial en banda Ka. El uso de la banda Ka parece ser el factor que caracterizará a la siguiente generación de satélites de comunicación. Estos contemplan ofrecer grandes anchos de banda y serán la base de los servicios que se prestarán. Entre los servicios que cabe destacar están: la videoconferencia en tiempo real, acceso a Internet a alta velocidad, servicios de banda ancha, distribución de señal de TV, aplicaciones de telemedicina, así como toda una gama de aplicaciones multimedia. Estos nuevos sistemas de satélites estarán alojados tanto en órbitas geoestacionarias, como en órbitas medias y bajas, proporcionando una cobertura regional o global.

Existe una gran variedad de estaciones terrenas que se pueden utilizar para redes privadas de datos y para diversos servicios. Se encuentran las llamadas USAT que con amplificadores de baja potencia y con diámetros del orden de 0.3 metros pueden ser utilizadas para el monitoreo remoto y la adquisición de datos con tasas de transmisión pequeñas de hasta 19.2 kbps. Por otra parte, las estaciones USAT de 2ª generación ya cuentan con amplificadores de 1.5 y 2 W y su diámetro es de 60 cm, estas estaciones permiten velocidades del orden de un T1 o un E1.

Las estaciones desarrolladas por el CRC muestran los primeros pasos en cuanto a estaciones portátiles. Las estaciones desarrolladas permitieron velocidades de transmisión de un T1 y un E1 con equipos de procesamiento portátil. La picoterminal, por otro lado, muestra un equipo totalmente ensamblado para permitir comunicaciones de hasta 128 kbps con una antena de 35 cm con herramientas integradas en cuanto a precisión de apuntamiento y automatización con la utilización de un GPS, además, ésta terminal es independiente en cuanto a alimentación de energía ya que cuenta con una batería de Níquel-Cadmio integrada.

Las ODU's de NORSAT han sido una iniciativa para la producción de una gran variedad de equipos destinados a distintas aplicaciones y que recoge los últimos avances en cuanto a LNA y SSPA para la transmisión y recepción en Banda Ka. Sin embargo, en cuanto al precio de las terminales que se ocuparán residencialmente aun no se considera accesible para la gran mayoría de los usuarios potenciales. La tecnología necesaria para la implementación de estas unidades solo será accesible si se considera una producción en gran escala, de

esta manera, el equipo necesario para el acceso residencial a los servicios satelitales en Banda Ka estará a disposición de pequeños consumidores.

Como se puede observar en el capítulo referente a las Estaciones Terrenas para Banda Ka, existe una gran variedad de estas que ya han sido sometidas a pruebas y que en la etapa experimental obtuvieron, por lo general, un desempeño satisfactorio. No sería extraño que en los años por venir, los avances tecnológicos para la implementación y fabricación de equipos terrestres que funcionen en el nivel doméstico y en redes privadas de datos fuera tal que permita el acceso a estos servicios a pequeños consumidores que requieran servicios multimedia satelitales para diferentes aplicaciones con sus respectivas ventajas. Además, pensando en que la Banda Ka promete ser el futuro de las comunicaciones satelitales en servicios multimedia, la producción en gran escala de los equipos necesarios para su funcionamiento permitirá abaratar aún más los costos de producción y como consecuencia abrirá la posibilidad de un gran mercado en usuarios pequeños y medianos de estos servicios.

La atenuación de una señal electromagnética es un factor importante para el diseño de un sistema de comunicaciones por satélite. Los estudios que se realizaron con el ACTS al respecto arrojaron diversos resultados. Además la puesta en funcionamiento del ACTS permitió la comparación de diversos modelos de atenuación con los datos obtenidos a lo largo de su vida útil.

Como se sabe, el principal factor que contribuye en la atenuación de una señal electromagnética en la Banda Ka es la lluvia. La presencia de lluvia en una trayectoria de enlace satelital puede provocar una calidad deficiente en la transmisión y puede en ocasiones interrumpir el enlace. Otros factores como la absorción atmosférica, la atenuación por nubes y la atenuación por la capa de absorción incrementan su importancia conforme la frecuencia va en aumento. Para la estimación de éstos últimos factores existe una gran cantidad de modelos publicados para el cálculo de las contribuciones individuales. La proporción de la atenuación debida a estos factores no es importante cuando se compara con la atenuación que se produce por la lluvia, sin embargo, no llegan a ser despreciables y menos cuando se trata de obtener un desempeño óptimo en un sistema de comunicaciones por satélite. La gran contribución de la lluvia en la atenuación de un enlace satelital hace que se busquen modelos más precisos que los que se aplican en la actualidad para las futuras frecuencias como es el caso de la Banda Ka.

El modelo que mejor predice la atenuación por lluvia en la Banda Ka es el modelo DAH. Esto fue comprobado en diferentes estudios con el uso de los datos que se recopilaron con el ACTS a estas frecuencias a través de distintos procedimientos de evaluación. Fue este modelo el que se empleó para el cálculo de la atenuación por lluvia en nuestro país.

Se debe tomar en cuenta que, aunque en nuestro país no se realizaron experimentos y mediciones durante el funcionamiento del ACTS, éstas fueron realizadas en diversas zonas de lluvia, las cuales están comprendidas en México.

Al analizar los datos que se obtuvieron a partir del modelo DAH en su sección de atenuación por lluvia se pudo concluir que no es posible establecer márgenes de atenuación por lluvia fijos para las diferentes regiones que se consideraron y que se muestran en el capítulo 3. Esto se debe principalmente a que la variación de la atenuación por lluvia es grande dentro del rango de frecuencias establecido para la Banda Ka. Por ejemplo, en la sección de 17.7 a 21.2 GHz, la variación de la atenuación por lluvia en la región D1 con una disponibilidad de 99.9% es de 4.7 dB, lo cual representa más del doble de la atenuación de la frecuencia límite inferior a la frecuencia límite superior de la sección destinada a la transmisión desde un satélite para la Banda Ka; en lo que respecta a la sección de la Banda Ka destinada a la recepción de un satélite (27.5 a 31 GHz) en estas mismas condiciones, la variación de la atenuación por lluvia es de 6.7 dB, lo que corresponde a más de cuatro veces la variación de atenuación. Dadas estas condiciones, se establecieron rangos de atenuación por lluvia en la Banda Ka para las diferentes regiones consideradas.

Para conocer la contribución de la atenuación por lluvia en una ciudad determinada es necesario utilizar los datos más precisos posibles de las condiciones en que va a operar el sistema a diseñar como son la ubicación geográfica, la frecuencia y la zona de precipitación.

Los datos sobre atenuación por lluvia que se obtuvieron estuvieron basados en los datos de distribución de lluvia del Modelo Global de Crane. Las zonas establecidas son amplias y no son tan precisas como se hubiera deseado. Estos datos se pueden mejorar si se realiza un estudio para establecer zonas de distribución de lluvia más precisas para México.

Los cálculos de enlace se realizaron con las características del ANIK-F2 que será el primer satélite que proporcionará servicios multimedia para América del Norte suponiendo que pudiera haber un satélite prestando servicios de similares características en nuestro país en un futuro cercano. Se realizaron los cálculos para determinar las características de las estaciones terrenas que serán utilizadas para diversos servicios con diversas tasas de transmisión. La variación que se presenta en los diámetros de las antenas para la recepción y para la transmisión muestra una clara variación de las dimensiones con respecto a la variación de la atenuación por lluvia, es decir, con respecto a las distintas zonas geográficas que se consideraron. En cuanto a los cálculos del enlace de recepción existían dos posibilidades para la satisfacción de los requerimientos del enlace: la variación del diámetro de la antena manteniendo la potencia del amplificador de estado sólido constante o mantener constante el diámetro de la antena variando la potencia del amplificador estado sólido. Se optó por mantener la potencia del amplificador de estado sólido constante ya que es más económico variar las dimensiones de la antena con condiciones preestablecidas del equipo de alimentación de las antenas.

El diámetro requerido para el enlace de recepción siempre es menor que el requerido para el enlace de transmisión en un grado de disponibilidad dado debido a la diferencia de los márgenes de atenuación por lluvia, el cual está en función de las diferentes frecuencias de trabajo. Para establecer las características de una

antena es necesario tomar en cuenta el diámetro mayor ya que con esto se garantiza el funcionamiento del enlace de transmisión de la antena en la disponibilidad deseada y se garantiza el funcionamiento del enlace de recepción a disponibilidades mas altas que el establecido para el primero.

Con los resultados obtenidos se concluye que el orden de las disponibilidades de los enlaces deben estar en el orden de 99.5% a 99.8%. En disponibilidades de 99.5%, el diámetro de las antenas es pequeño en las regiones menos lluviosas de nuestro país y del orden de 2 y 3 metros para regiones lluviosas con tasas de transmisión de 2.04 Mbps. La disponibilidad de 99.8% se puede alcanzar solo en las regiones de escasa lluvia y con tasas de transmisión pequeñas. Los diámetros de las antenas que se proponen para las diferentes regiones para diferentes disponibilidades son los mostrados en la tabla siguiente.

Zona	99.8%				99.5%				99%			
	Diámetro (m)				Diámetro (m)				Diámetro (m)			
	2.04 Mbps	1 Mbps	384 kbps	64 kbps	2.04 Mbps	1 Mbps	384 kbps	64 kbps	2.04 Mbps	1 Mbps	384 kbps	64 kbps
D3	4	3	2	1	2	1.5	1	0.3	1.5	1	0.6	0.3
D2	3	2	1.5	0.6	1.5	1	0.6	0.3	1	1	0.5	0.3
D1	2	1.5	1	0.5	1.5	1	0.6	0.3	1	1	0.5	0.3
F	1.5	1	0.6	0.3	1	1	0.5	0.3	1	0.6	0.5	0.3
G	8	6	3.5	1.5	3	2	1.5	0.5	2	1.5	1	0.3

Hay que tomar en cuenta que los diámetros establecidos para las diferentes disponibilidades en la tabla anterior representan una disponibilidad mayor en el enlace descendente. Sin embargo, el funcionamiento del enlace completo estará regido por los valores enlistados.

Como se mencionó anteriormente, la creciente demanda por servicios que requieren de un mayor ancho de banda y ha obligado a los actuales sistemas de comunicación por satélite emigrar hacia partes mas altas en el espectro radioeléctrico. Según analistas, las comunicaciones por satélite en banda Ka poseen un futuro muy prometedor ya que de acuerdo a expectativas se prevé que el principal servicio proporcionado por esta ola de nuevos sistemas de comunicación por satélite es el acceso a Internet, el cual ha tenido en los últimos años un crecimiento casi exponencial, y se espera que este sea mayor para mediados de la década siguiente, este servicio exigirá de un ancho de banda cada vez mayor, con el fin de proporcionar un acceso de mayor velocidad en ambas direcciones. Esta creciente demanda por el acceso a Internet se espera que sea totalmente cubierta por los nuevos sistemas que hoy se están desarrollando y que están muy próximos a ser puestos en operación.

Además del acceso a Internet, otro factor importante que se cree, dominará al mercado de las comunicaciones satelitales de la siguiente década, son los servicios que demandarán las grandes corporaciones con el propósito de llevar a cabo operaciones sobre sus redes privadas globales.

Debido a todo lo anterior, es importante remarcar que si México pretende entrar a esta nueva era de comunicaciones por satélite, se deben empezar estudios

propios en cuanto a la planeación y diseño de sistemas satelitales que puedan prestar múltiples servicios en Banda Ka. Además, es preciso realizar estudios más profundos en cuanto a condiciones de propagación en nuestro territorio. Aunado a esto, en la planeación de los futuros sistemas satelitales mexicanos se deben involucrar sistemas que ya operen en Banda Ka con el objetivo de apoyar los estudios que se pudieran realizar por parte de las instituciones de educación superior y de investigación en los diferentes aspectos que involucra. Sólo de esta manera México podrá seguir siendo competitivo en materia de comunicaciones por satélite durante, al menos, las siguientes dos décadas.