



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS”**

INGENIERÍA EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA

**“MÉTODO GRÁFICO PARA ESTIMAR LA ATENUACIÓN POR
LLUVIA EN EL SISTEMA SATELITAL MEXSAT 3”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA**

PRESENTAN:

**Armando Ávila Pérez
Marco Antonio Anaya Montaña
Dante Ulises Contreras Cortés**

ASESORES:

**Dr. Daniel Rodríguez Saldaña
Ing. Pedro Gustavo Magaña Del Río**



MÉXICO, D.F. 2015

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS”

TEMA DE TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN
DEBERA (N) DESARROLLAR**

INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA
TESIS COLECTIVA Y EXAMEN ORAL INDIVIDUAL
C. MARCO ANTONIO ANAYA MONTAÑO
C. ARMANDO AVILA PEREZ
C. DANTE ULISES CONTRERAS CORTES

**“MÉTODO GRÁFICO PARA ESTIMAR LA ATENUACIÓN POR LLUVIA EN EL SISTEMA SATELITAL
MEXSAT 3”**

**DESARROLLAR UN MÉTODO GRÁFICO PARA ESTIMAR LA ATENUACIÓN POR LLUVIA EN EL SISTEMA
SATELITAL MEXSAT 3 (BICENTENARIO), EN LA BANDA C Y KU, HACIA CUALQUIER PUNTO DE LA
REPÚBLICA MEXICANA**

- INTRODUCCIÓN
- ANTECEDENTES
- ANTECEDENTES DE LOS SISTEMAS SATELITALES
- ELEMENTOS DE UN ENLACE SATELITAL
- ENLACE SATELITAL
- MODELOS DE ATENUACIÓN POR LLUVIA
- DESARROLLO DEL PROYECTO
- CONCLUSIONES
- ANEXOS
- BIBLIOGRAFÍA
- REFERENCIAS

MÉXICO D.F. A 13 DE AGOSTO DE 2014

ASESORES



DR. DANIEL RODRÍGUEZ SALDAÑA



ING. PATRICIA LORENA RAMÍREZ RAMÍREZ
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE
INGENIERÍA EN COMUNICACIONES Y ELECTRONICA



ING. STAVO MAGAÑA DEL RÍO

Dedicatorias y Agradecimientos

Esta tesis la **dedico** principalmente a **mis padres**

A ti **Margarita**, mi madre por tu amor y consejos.

A ti **padre, Carlos** por tu trabajo y esfuerzo.

A ustedes **hermanas** por su compromiso y paciencia.

Gracias porque solo con su ayuda y apoyo incondicional logré conquistar esta meta, porque con este logro quiero devolver un poco de lo que me han dado desde antes que naciera

Un agradecimiento muy especial al **Dr. Daniel Rodríguez Saldaña** que nos brindó su apoyo para la realización de este proyecto y a todas las personas que participaron en el mismo

La dedico al **Instituto Politécnico Nacional** que es una institución ejemplar en la formación de ingenieros basada en su plan de estudios y siempre **comprometida** al desarrollo e innovación para el servicio de la nación.

A aquellas personas que lean este trabajo buscando respuestas a sus preguntas. Espero que les sirva y que tomen un poco de él para el análisis de sus proyectos.

Marco Antonio

Dedicatorias

El siguiente trabajo va **dedicado** con mucho respeto y afecto a quienes de alguna manera me otorgaron su apoyo en los momentos que más lo necesitaba.

A **mis padres**, porque ellos me dieron **la vida**, me dieron estudio, y me brindaron toda la **atención** necesaria, por ello he logrado llegar hasta aquí y son la razón de que yo haya alcanzado éste nivel de estudio.

A quien también desde temprana edad se ha preocupado por mí, esas **atenciones incesantes**, esas palabras alentadoras en momentos precisos, esas bendiciones, por esto y muchas cosas más que he recibido de ti mi **segunda madre Teodora**.

Al **ser supremo** que en todo momento ha estado a mi lado, en los momentos buenos y en los difíciles, pero marcadamente en los difíciles, porque nunca me dejó sólo y estaba allí para brindarme esa fortaleza, determinación y cuidado.

Dante Ulises

Agradecimientos

Agradezco especialmente a **dos personas** que han visto y que siguen viendo por mí en situaciones que en su momento parecían imposibles y tan tormentosas, porque gracias a ellos tuve la mente en claro y la fortaleza requerida para hacer frente a diversos obstáculos que se presentaban, me vienen a la mente recuerdos de aquellas primeras veces que ustedes me **instruyeron** en el ámbito del estudio y de la preparación profesional porque ahora se más que nunca que lo que ustedes más anhelan es la preparación y superación de los suyos. Todo ese apoyo tan grande e incondicional, me han hecho ir creciendo y forjándome como un ser humano con buenos principios porque desde siempre han estado presentes para encaminar mis aspiraciones. Es por esto y muchas cosas más que hago suyo este trabajo, siendo este logro, fruto de múltiples esfuerzos de ustedes **mis padres**.

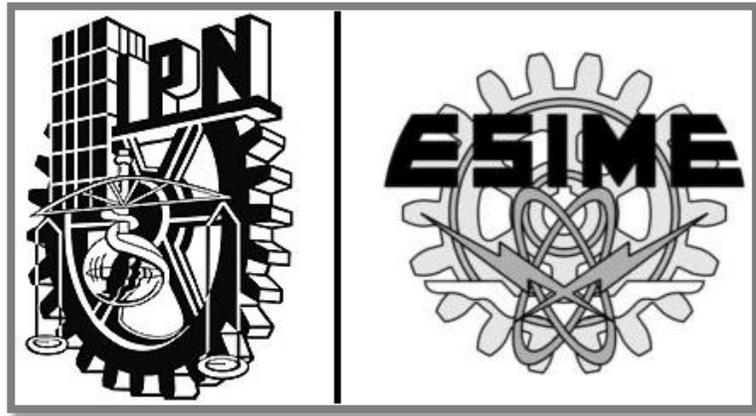
Es necesario mencionar que el apoyo recibido por **dos personas** más fue de gran ayuda cuando me sentía falta de fortaleza y sumergido en el estrés, ustedes estaban ahí para transmitirme esos pensamientos positivos y alentadores que hacían que retomara mi camino con más fuerza y entusiasmo. A ustedes **mis hermanos** por todo su apoyo **GRACIAS**

No se debe pasar por alto el apoyo recibido por parte de nuestros **asesores** porque en todo momento se tuvo su apoyo para el desarrollo de éste trabajo, ayudaron **amablemente** a disipar algunas dudas que en su momento se tenían pero que al final se tuvo un resultado gratificante.

De la misma manera quiero agradecer al **Instituto Politécnico Nacional** por abrirme las puertas y forjarme como profesionista, porque fué dentro de las instalaciones donde fui adquiriendo nuevos conocimientos.

Finalmente gracias a **TI** por permitirme haber logrado esta meta, por haber puesto en mí, la perseverancia necesaria para poder seguir adelante aun cuando las cosas parecían no tener salida, porque gracias a ti, pude salir de la mejor manera.

Dante Ulises



MÉTODO GRÁFICO PARA ESTIMAR LA ATENUACIÓN POR LLUVIA EN EL SISTEMA SATELITAL MEXSAT 3

OBJETIVO

Desarrollar un método gráfico para estimar la atenuación por lluvia en el Sistema Satelital MEXSAT 3 (Bicentenario), en la banda C y Ku, hacia cualquier punto de la República Mexicana.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	XIV
ANTECEDENTES	XVII
Capítulo 1: ANTECEDENTES DE LOS SISTEMAS SATELITALES	2
1.1 Historia de los Sistemas Satelitales	2
1.2 Servicios	3
1.3 Antecedentes del Sistema Satelital Mexicano	4
1.3.1 Características del Sistema Satelital MEXSAT	5
1.3.2 Particularidades del Sistema Satelital Mexicano	6
1.3.3 MEXSAT I	7
1.3.4 MEXSAT II	7
1.3.5 MEXSAT III	8
Capítulo 2: ELEMENTOS DE UN ENLACE SATELITAL	11
2.1 Consideraciones Generales	11
2.2 Características de las Órbitas	11
2.3 Tipos de Orbitas Satelitales	12
2.4 Geometría, Coordenadas, Orientación y Tiempo	14
2.4.1 Sistema de coordenadas	14
2.4.2 Ángulos de elevación y acimut	15
2.5 Transpondedor	18
2.6 Estación Terrena	19
Capítulo 3: ENLACE SATELITAL	24
3.1 Características y Efectos del Medio de Propagación	25
3.1.1 Atenuación debido a nubes	25
3.1.2 Atenuación debido a lluvia	30
3.1.3 Atenuación por absorción atmosférica	31
3.1.4 Efecto Faraday	32
3.1.5 Despolarización causada por lluvia	33
3.2 Enlace Ascendente	34
3.3 Enlace Descendente	35

Capítulo 4: MODELOS DE ATENUACIÓN POR LLUVIA	37
4.1 Modelos estadísticos para atenuación por lluvia	38
4.2 Modelo CCIR	38
4.3 Modelo ITU-R Rec. 618-10	43
4.4 Modelo ITU-R mejorado para zonas tropicales (Brasil)	48
4.5 Modelo de Bryant	49
4.6 Modelo Empírico con una Aproximación Analítica	50
4.7 Modelo Excell	52
4.8 Modelo García-López	54
4.9 Modelo Global de Crane	55
4.10 Modelo Australiano	56
Capítulo 5: DESARROLLO DEL PROYECTO	58
5.1 Calculo del Angulo de Elevación y Acimut	60
5.1.1 Ángulo de elevación y acimut para la Sonda de Campeche	60
5.1.2 Ángulo de elevación y acimut para la Ciudad de México	63
5.2 Calculo de la Atenuación por Lluvia	66
5.2.1 Enlace ascendente (Sonda de Campeche a MEXSAT 3)	66
5.2.2 Enlace descendente (MEXSAT 3 a Ciudad de México)	71
5.3 Comparación entre el Modelo CCIR y el Modelo Empírico	74
5.4 Cartas de Diseño para Atenuación por Lluvia	76
CONCLUSIONES	83
ANEXOS	
Anexo A: Lista de símbolos	86
Anexo B: Algoritmos utilizados	90
Anexo C: Atenuación por lluvia en función de la longitud efectiva (Frecuencia fija y tasa de lluvia variable)	95
Anexo D: Atenuación por lluvia en función de la longitud efectiva (Tasa de lluvia y frecuencia variable)	97
Anexo E: Atenuación por lluvia en función del porcentaje del tiempo (Frecuencia fija y tasa de lluvia variable)	99

Anexo F: Atenuación por lluvia en función del porcentaje del tiempo (Tasa de lluvia fija y frecuencia variable) ----- 101

BIBLIOGRAFÍA ----- 104

REFERENCIAS----- 105

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1: ANTECEDENTES DE LOS SISTEMAS SATELITALES

Figura 1.1	Esquema que indica las características del sistema MEXSAT -----	6
Figura 1.2	Mapa donde se muestra la cobertura del MEXSAT III -----	8

Capítulo 2: ELEMENTOS DE UN ENLACE SATELITAL

Figura 2.1	Tipos de Orbitas -----	14
Figura 2.2	Definición del ángulo de elevación -----	15
Figura 2.3	Definición del ángulo de acimut -----	16
Figura 2.4	A) Acimut: Después de conocer dónde queda el punto Cardinal Norte, el observador dirige la mirada hacia el ángulo de acimut de 45 grados. B) Elevación: De frente al acimut deseado se inclina la cabeza hacia el ángulo de elevación -----	17
Figura 2.5	Transpondedor del satélite -----	19
Figura 2.6	Modelo de subida del satélite -----	19
Figura 2.7	Elementos de una estación terrena -----	20
Figura 2.8	Etapas de una estación terrena-----	21

Capítulo 3: ENLACE SATELITAL

Figura 3.1	Modelo del enlace satelital -----	24
Figura 3.2	Contenido total normalizados de una columna de agua líquida de nube (kg/m ²) rebasado durante el 20% del año -----	26
Figura 3.3	Contenido total normalizados de una columna de agua líquida de nube (kg/m ²) rebasado durante el 10% del año -----	27
Figura 3.4	Contenido total normalizados de una columna de agua líquida de nube (kg/m ²) rebasado durante el 5% del año -----	28
Figura 3.5	Contenido total normalizados de una columna de agua líquida de nube (kg/m ²) rebasado durante el 1% del año -----	29
Figura 3.6	Atenuación debida a la absorción atmosférica para: (a) la banda de 6/4 GHz; (b) la banda 14/12 GHz -----	32
Figura 3.7	Rotación de Faraday -----	32
Figura 3.8	Modelo básico ascendente -----	34
Figura.3.9	Modelo básico descendente -----	35

Capítulo 4: MODELOS DE ATENUACIÓN POR LLUVIA

Figura 4.1	Regiones de América designadas con letras por la CCIR*, según la intensidad de lluvia que es excedida -----	39
Figura 4.2	Cuando llueve, una señal portadora recorre una distancia d a través de la lluvia y se atenúa progresivamente -----	40
Figura 4.3	Nomograma de la CCIR del reporte 721 para calcular gráficamente el coeficiente γ de atenuación específica -----	42
Figura 4.4	Representación esquemática de un trayecto tierra-espacio con indicación de los parámetros que se utilizan en el proceso de predicción de la atenuación -----	44
Figura 4.5	Altura media anual de la isoterma de 0° C por encima del nivel del mar -----	45
Figura 4.6	Atenuación por lluvia en función de la distancia al aplicar el modelo Brasil --	46
Figura 4.7	Representación esquemática de una célula de lluvia exponencial según el modelo Excell -----	52
Figura 4.8	Ejemplo de campo de células de lluvia bidimensional obtenido mediante el método Excell -----	53

Capítulo 5: DESARROLLO DEL PROYECTO

Figura 5.1	Localización de la estación terrestre en la Sonda de Campeche. El sitio está marcado con la flecha -----	59
Figura 5.2	Localización de la estación terrestre en la ciudad de México. El sitio está marcado con la flecha amarilla -----	60
Figura 5.3	Calculo del ángulo de elevación y acimut mediante curvas para el enlace ascendente -----	62
Figura 5.4	La relación entre el ángulo de acimut real ϕ y el ángulo de acimut parcial ϕ' dependen del cuadrante en donde se ubica la estación terrena -----	63
Figura 5.5	Calculo del ángulo de elevación y acimut mediante curvas para el enlace descendente -----	65
Figura 5.6	Regiones de América designadas con letras por la CCIR según la intensidad de lluvia que es excedida -----	67
Figura 5.7	Curvas de atenuación específica α [dB/Km], obtenidos con el modelo CCIR para diferentes tasas de lluvia en cuatro diferentes zonas -----	74

Figura 5.8	Curvas de atenuación específica α [dB/Km], usando el modelo CCIR y el modelo empírico aproximado -----	75
Figura 5.9	Gráfica de atenuación por lluvia A0.01 en función de la longitud efectiva en diferentes zonas pluviales, usando una frecuencia de 14 GHz -----	77
Figura 5.10	Gráfica de atenuación por lluvia A0.01 en función de la longitud efectiva LE para cuatro diferentes frecuencias de operación y específicamente para la zona M (63mm/h) -----	78
Figura 5.11	Cálculo de atenuación por lluvia específica α [dB/Km], para las frecuencias de 4, 6, 12 y 14 GHz en diferentes zonas pluviales -----	79
Figura 5.12	Gráfica de atenuación específica $A_{RAIN}(p)$ para la frecuencia de 14 GHz en las cuatro diferentes zonas pluviales -----	80
Figura 5.13	Gráfica la atenuación específica $A_{RAIN}(p)$ para un porcentaje de tiempo p para la zona pluvial M (63 mm/h) en cuatro diferentes frecuencias de transmisión -----	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Especificaciones del MEXSAT II -----	7
Tabla 1.2	Características de los satélites Mexsat I y II -----	9
Tabla 3.1	Tabla general de los coeficientes de Atenuación Específica -----	31
Tabla 4.1	Datos estadísticos por región para el mapa de la Figura 4.1 -----	39
Tabla 5.1	Especificaciones del MEXSAT III -----	58
Tabla 5.2	Coordenadas de las estaciones terrestres -----	59
Tabla 5.3	Datos estadísticos por región para el mapa de la Figura 5.6 -----	67
Tabla 5.4	Coefficientes de atenuación específica para polarización horizontal (subíndice h) y polarización vertical (subíndice v) -----	68



INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Mientras transcurren los años, en el mundo se van creando nuevas formas para que las personas puedan comunicarse a pesar de la distancia que los separa.

Los sistemas de comunicaciones en la actualidad tienen un gran alcance y cubren casi toda el área territorial del mundo. Existen diversas maneras de hacer posible la comunicación a gran distancia. Por ejemplo, actualmente, los sistemas de comunicación satelital cuentan con una amplia infraestructura que hace posible mantener conectada e informada a gran parte de la población mundial.

Los sistemas de comunicaciones vía satélite están formados básicamente por las estaciones terrenas y el satélite. El objetivo de este sistema es permitir que las estaciones terrenas se comuniquen entre sí utilizando al satélite como una estación repetidora cuando la distancia que separa a las estaciones terrenas es muy grande. Los enlaces satelitales son prácticamente iguales a los de microondas, excepto en que uno de los extremos de la conexión se encuentra en el espacio. Un factor limitante para la comunicación con enlaces de microondas es que tiene que existir una línea recta entre dos puntos, pero como la tierra es esférica la línea de vista entre dos puntos terrestres se ve limitada por la distancia. Por lo tanto, si se coloca ya sea el receptor o el transmisor en el espacio se cubre una mayor distancia y un área más grande de cobertura.

Los satélites artificiales de comunicaciones proporcionan un medio muy eficaz para emitir señales de radio en zonas con áreas muy amplias o poco desarrolladas.

Dado que no hay problemas de visión directa, se pueden utilizar frecuencias elevadas con valores de GHz que son inmunes a las interferencias. Además, la elevada direccionalidad de las ondas electromagnéticas a estas frecuencias permite cubrir zonas muy concretas sobre la tierra.

Sin embargo, la principal desventaja que presentan los sistemas satelitales es que se ven afectados por fenómenos atmosféricos como la lluvia, ya que las gotas de lluvia absorben y dispersan la onda, causando atenuación y reducen el desempeño y la disponibilidad del sistema. Por eso, es muy importante estimar la atenuación debido a lluvia en los sistemas satelitales, la cual depende de su posición orbital, la posición de las estaciones terrenas, la precipitación pluvial anual de las zonas de cobertura y de las frecuencias de operación del sistema.

Actualmente, México se encuentra en el desarrollo de un nuevo sistema satelital denominado MEXSAT constituido por tres nuevos satélites (Centenario, Morelos III y Bicentenario) de los cuales uno ya se encuentra en órbita y operando con fines de proporcionar servicios de banda ancha para internet, telefonía satelital digital de alta calidad, videoconferencias, educación a larga distancia y atención médica en zonas marginadas. Además de que éste satélite sirve como controlador para los otros dos satélites que forman parte del sistema MEXSAT.

Es de vital importancia tener una visión de los problemas que causarían los fenómenos atmosféricos, como la atenuación por lluvia, en los nuevos sistemas que se están implementando. Por ello, el cálculo de curvas de atenuación por lluvia para el nuevo sistema satelital mexicano proporcionará una aproximación del efecto que causa la lluvia en los enlaces satelitales, además es posible implementar éste desarrollo para el sistema MEXSAT o cualquier otro sistema satelital. Con esto se consigue tener un panorama de cómo afecta la lluvia a los enlaces satelitales en distintas regiones del país y con los diferentes sistemas satelitales que se implementaran.



ANTECEDENTES

ANTECEDENTES

Los satélites utilizan las bandas de comunicaciones comerciales denominadas C, Ku y Ka. En los intervalos de frecuencia de GHz, la lluvia es un factor dominante en lo que a la atenuación de señales se refiere, ya que la energía electromagnética es absorbida y convertida en calor por las gotas de lluvia.

Los datos sobre la precipitación pluvial, en los que se sustenta el diseño de los satélites que envían señales hacia el territorio mexicano, están fundamentados en información de los sistemas meteorológicos de Estados Unidos. Esta situación ocasiona que eventualmente las señales emitidas hacia el país no sean de la calidad que se requiere.

Cuando llueve sobre la zona donde está instalada una estación terrena, las señales portadoras son atenuadas conforme se propagan a través de la región del aire en donde esté lloviendo. La distancia total que las señales viajan a través de la lluvia depende de la altura de las nubes con relación al piso y del ángulo de elevación de la antena de la estación. Actualmente, se puede saber con bastante precisión qué tanto se atenúa una señal por efecto de la lluvia, en función de la frecuencia de la señal y de la intensidad de la lluvia medida en milímetros sobre hora (mm/h). Las gotas de lluvia absorben energía al ser calentadas por las señales de microondas, y conforme la longitud de onda se hace comparable con el tamaño de las gotas el efecto es más severo, causando mayor atenuación en la banda Ka ($\lambda=1$ cm) que en la banda Ku ($\lambda=2$ cm) o en la C ($\lambda=5$ cm). Además, una parte de la energía de la señal se dispersa al chocar ésta con las gotas de lluvia. Como la lluvia no es permanente, para el diseño del enlace satelital resulta de interés el porcentaje de tiempo total en el que cierto valor especificado de mm/h es excedido (normalmente se toma como tiempo de referencia 1 año).

Es de interés, establecer la importancia de conocer y emplear modelos para aplicaciones satelitales fijas en la Banda C y Ku que ayuden a estimar la atenuación producida por fenómenos atmosféricos como es el caso de la lluvia y donde el cálculo del parámetro de atenuación es preponderante para el eficaz funcionamiento de estas aplicaciones.

Para encontrar una solución al presente problema, ha sido necesario estudiar el fenómeno apoyándose en modelos estadísticos de la lluvia que permitan conocer el efecto de esta en las comunicaciones. Existen distintos modelos que se basan en análisis meteorológicos y climáticos, del mismo modo hay otros que ponen particular atención al tipo de perturbación que este efecto produce entre los medios de transmisión satelital y las estaciones terrenas.

Para el cálculo de atenuación es preferible usar mediciones de lluvia obtenidas localmente. Pero, si esto no es posible se pueden usar los mapas de precipitación pluvial producidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones.

La comunicación satelital, hoy en día, es un pilar muy importante para los medios de comunicación con mayor actividad y de grandes alcances globales.

El sistema satelital es una solución idónea para la prestación de aplicaciones Multimedia (televisión, envío de datos, telefonía, internet por satélite, entre otras muchas aplicaciones), especialmente en aquellas zonas geográficas donde las redes terrestres de telecomunicaciones convencionales no son viables, ni económica, ni tecnológicamente apropiadas. Y desde esta perspectiva, los nuevos servicios y aplicaciones de banda ancha del satélite se aprovechan con el potencial de un sistema tecnológico. Con la tendencia de equiparar en los próximos años la utilización tradicional del satélite con el uso de capacidad destinada a comunicar a la gran parte de la población mundial. El satélite se ha convertido en una solución que hasta ahora se ha complementado en el canal de retorno con estaciones terrestres.

El que suministra el servicio de transmisión vía satélite puede dividir la capacidad total disponible en una serie de canales alquilando sus usos a terceras compañías. Dichas compañías, equipadas con una serie de antenas distribuidas en diferentes localizaciones pueden utilizar una canal del satélite para establecer una red privada.



CAPÍTULO 1 | ANTECEDENTES DE LOS SISTEMAS SATELITALES

CAPITULO 1

ANTECEDENTES DE LOS SISTEMAS SATELITALES

1.1 Historia de los Sistemas Satelitales.

Desde 1957, año en que fue lanzado el primer satélite artificial, Sputnik, miles de objetos se han puesto en órbita alrededor de la Tierra, la Luna y los principales planetas. Los vehículos en órbita alrededor de la Tierra son de dos tipos esenciales: por una parte están los satélites no tripulados para aplicaciones, tales como, sistemas de telecomunicaciones, observación de la Tierra, navegación, astronomía y geofísica; y por otra parte las estaciones o naves tripuladas.

Los primeros trabajos relacionados con los satélites en órbita geoestacionaria, orbita más utilizada por los satélites de comunicaciones, se atribuyen a Hermann Noordung que en 1929 publicó el trabajo: “*The Problem of Space Flight, The Rocket Engine*”, en el que describe el concepto de órbita geoestacionaria.

En Octubre de 1945, el autor americano de la revista *Wireless World* de ciencia y ciencia ficción, Arthur C. Clark, quien es considerado el padre de las comunicaciones por satélite, describió y analizó como usar la órbita situada a 36000Km sobre el ecuador para comunicaciones globales. Un satélite situado en esta órbita tendría una velocidad angular igual al de la Tierra y permanecería aparentemente siempre sobre una misma posición y podría recibir y retransmitir señales en un solo hemisferio. Tres satélites equi-espaciados en un ángulo de 120 grados podrían cubrir, prácticamente, todo el mundo y, siempre que los mensajes pudieran retransmitirse entre los satélites, se podrían enlazar dos puntos cualesquiera del globo.

El 4 de Octubre de 1957, la Unión Soviética lanzó el primer satélite artificial, el Sputnik I, comenzando así la carrera espacial. Los Estados Unidos, lanzo el SCORE (Señal de Comunicación por Equipo de Relevo de Orbita) el 18 de Diciembre de 1958. Este era un satélite de órbita elíptica baja de 101 minutos de periodo que difundía un mensaje de Eisenhower grabado en cinta. Aunque, también permitía retransmitir mensajes. Su forma de operar era grabar la transmisión del enlace ascendente cuando pasaba por encima de una estación terrena y lo retransmitía bajo petición de otra estación. La duración máxima del mensaje era de 4 minutos y la capacidad del transpondedor era de un canal de voz o 70 canales de teletipo de 60 palabras por minuto. La frecuencia del enlace ascendente era de 150 MHz, la del enlace descendente era de 132 MHz y el transmisor proporcionaba una

potencia de 8 Watts hasta que fallaron las baterías después de 35 días en órbita. Los primeros satélites utilizados para comunicaciones en tiempo real fueron repetidores pasivos de 30 metros de diámetro denominados ECHO (I y II) que se usaron entre 1960 y 1964 para enlaces entre las costas Este y Oeste de los Estados Unidos. Los primeros transpondedores en tiempo real de banda ancha fueron implementados en los satélites TELSTAR (I y II). Estos satélites proporcionaban 50Mhz de banda para la transmisión de señales analógicas de FM en las bandas centradas en 6.38958Ghz en el enlace ascendente y 4.16972Ghz en el enlace descendente. Esta elección de frecuencias sentó el precedente para el uso de la banda C en comunicaciones por satélite, aunque proporcionaba una interferencia potencial con los sistemas terrestres que empleaban la misma banda de frecuencias.

Diecinueve años después de la aparición del artículo de Clark, el 2 de Octubre de 1964, el satélite SYNCOM III fue colocado en la órbita de Clarke para proporcionar comunicaciones a través del Pacífico.

Las aplicaciones de los sistemas satelitales de uso civil son muy diversas. Desde que se inició su uso con fines comerciales su desarrollo se ha incrementado enormemente y en los próximos años sus aplicaciones prácticamente estarán en todas las actividades de ser humano.

La cantidad de satélites y las frecuencias que usan para comunicarse con la Tierra han originado la creación de diversas organizaciones para la asignación de orbitas y frecuencias de comunicación. Por ejemplo, la Conferencia Administrativa Mundial de Radiocomunicaciones CAMAR (WARC: World Administrative Radio Conference) asigna frecuencias para las radiocomunicaciones según los distintos servicios. La CAMAR se lleva a cabo bajo los auspicios de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU: International Telecommunication Union), formada por las distintas administraciones del mundo.

1.2 Servicios.

Los servicios de radiocomunicaciones espaciales son:

- Servicio fijo por satélite para comunicaciones a través de uno o más satélites entre estaciones terrenas localizadas en puntos fijos.
- Servicio de radiodifusión vía satélite que permite la recepción de sonido e imagen a través de satélites con receptores individuales o colectivos.

- Servicio móvil por satélite que proporciona comunicaciones entre estaciones terrenas móviles a través del satélite. Si las estaciones terrenas están situadas a bordo de barcos se tiene el Servicio Móvil Marítimo, a bordo de aviones el Servicio Móvil Aeronáutico y a bordo de vehículos en tierra el Servicio Móvil Terrestre. Estos servicios se usan también para detectar y localizar señales de socorro y emergencia.
- Servicio de exploración de la Tierra desde satélite para meteorología, geodesia, exploración de recursos, etc.
- Servicio de exploración del espacio en el que el satélite u otras plataformas se utilizan para investigación técnica o científica.
- Servicio de operación espacial para la operación de los satélites (tele-medida, telemando y seguimiento).
- Servicio de radio-determinación por satélite para determinar la posición y velocidad de un objeto usando uno o varios satélites (por ejemplo, GPS, GLONASS, GALILEO).
- Servicio de radioaficionados por satélite, que permite el acceso a los satélites a los radioaficionados.
- Servicio entre satélites utilizado para enlaces entre satélites.
- Servicio de comunicación global.

Otros servicios de los sistemas satelitales de uso civil son:

- Servicios sensorialmente remotos.
- Servicios de información geográfica.

1.3 Antecedentes del Sistema Satelital Mexicano.

Para la difusión internacional de las olimpiadas en México 1968, el gobierno mexicano se afilió ese mismo año al sistema satelital Intelsat y construyó en el estado de Hidalgo la primera estación terrena del país y rentó un satélite ATS-3, propiedad de la NASA. Dos años después, en 1970, se inició el uso satelital en México para servicio doméstico. A partir de 1982, el gobierno mexicano adquirió su primer paquete de satélites propios, conocido como sistema Morelos. Los satélites Morelos I y Morelos II fueron puestos en órbita en 1985, en posiciones geoestacionarias para ambos en los 113.5° W y 116.8° W, respectivamente, y se construyó en Iztapalapa su centro de control terrestre.

Para el manejo de ambos satélites y su centro de control, en 1989 se creó Telecomunicaciones de México (Telecomm), con sede en la Ciudad de México, organismo descentralizado que adquirió un segundo paquete satelital para sustituir eventualmente al sistema Morelos al término de su vida útil. El Sistema Solidaridad se conformó con los satélites Solidaridad 1 y Solidaridad 2, puestos en órbita en 1993 y 1994 respectivamente, al tiempo que se dio de baja el Morelos 1, conservando las dos posiciones satelitales ya adquiridas más una nueva en los 109.2º W.

La Universidad Nacional Autónoma de México creó el Programa Universitario de Investigación y Desarrollo Espacial (PUIDE) que en 1991 comenzó la fabricación del primer satélite 100% mexicano, el UNAMSAT-1, que fue destruido durante su lanzamiento en 1995. En 1996 puso en órbita el UNAMSAT-B que funcionó cerca de un año.

En 1995 el gobierno mexicano reformó la ley de Telecomunicaciones y con la Sección de Servicios Fijos Satelitales de Telecomm constituyó la empresa Satélites Mexicanos S.A. de C.V. (SATMEX) el 26 de junio de 1997, la cual se puso a la venta a través de una licitación pública. El 75% de SATMEX fue adquirido, en octubre de 1997, por Principia Loral Space & Communications y el 25% restante lo conserva el gobierno mexicano, sin derecho a voto, e inicia una inversión de 645 millones de dólares. El paquete incluyó el Morelos 1 inactivo, el Morelos 2, Solidaridad 1 y 2 en activo y el Morelos 3 en construcción (el cual se le cambió el nombre a SATMEX 5).

Con fines de seguridad nacional, el gobierno mexicano anunció en 2010 la creación de un nuevo Sistema Satelital Mexicano, conocido como MEXSAT, para ser administrado por Telecomunicaciones de México (Telecomm-Telégrafos) el cual constará de 3 satélites denominados como Bicentenario, Centenario y Morelos III.

1.3.1 Características del sistema satelital MEXSAT.

El Sistema Satelital Mexicano MEXSAT brindará cobertura total al territorio mexicano y a sus aguas patrimoniales. Este sistema satelital transmitirá comunicaciones civiles con fines de coadyuvar al desarrollo socioeconómico del país y será el principal gestor de la transferencia y análisis de información sensible de seguridad nacional. En la [Figura 1.1](#) se muestra un esquema con las principales características del sistema MEXSAT.

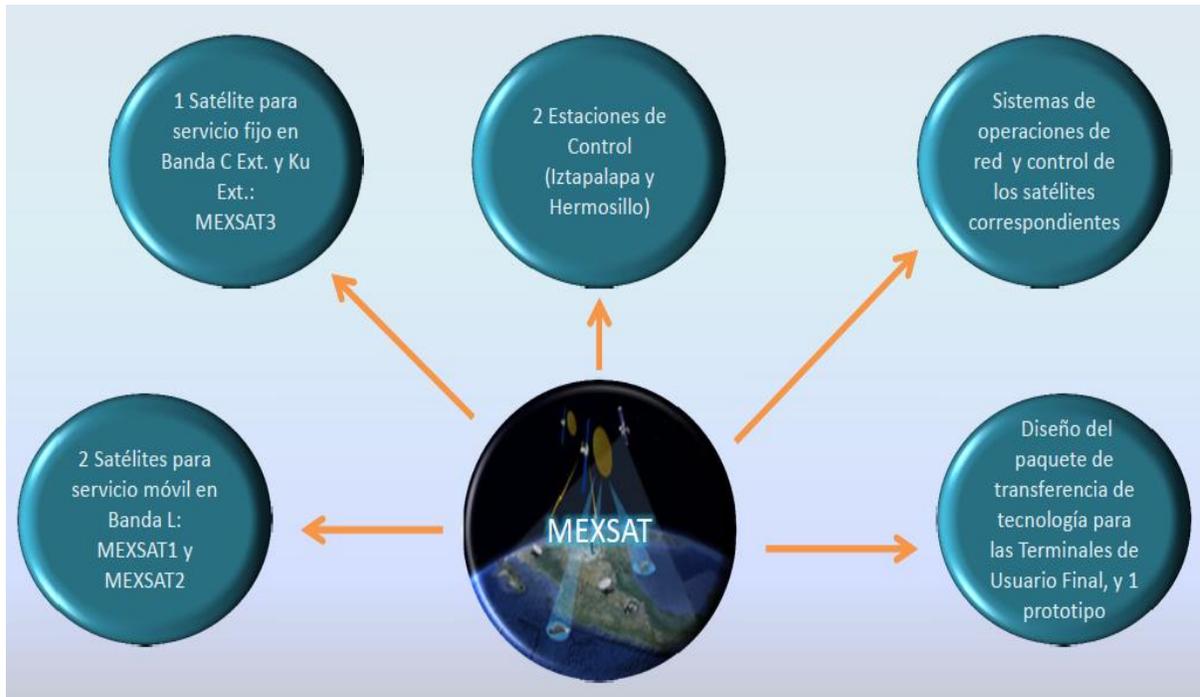


Figura 1.1. Esquema que indica las características del sistema MEXSAT.

1.3.2 Particularidades del Sistema Satelital Mexicano.

Los satélites del sistema satelital MEXSAT cuentan con un sistema de formación de haces denominado Pincel en Tierra GBBF con cancelación adaptativa de frecuencias.

El sistema BGGF permite a los sistemas móviles satelitales la conformación de haces o celdas reutilizando frecuencias y multiplicando así la capacidad de comunicación. El GBBF puede ser considerado como un “despachador” en tierra que asigna segmentos de frecuencias (alterados en fase y en amplitud) y produce haces de contornos sobre la superficie terrestre.

El sistema de cancelación de frecuencias permite cancelar la interferencia de otros operadores, usuarios no autorizados, o cualquier otra intromisión, lo que se traducen en una mayor transmisión y en consecuencia un mayor número de usuarios.

1.3.3 MEXSAT I.

El MEXSAT 1, también conocido como Centenario como parte de los festejos del centenario del inicio de la Revolución Mexicana, es el principal satélite para el servicio móvil de la red MEXSAT. Este satélite es un Boeing 702 HP, el cual se pondrá en la órbita 113°W, en el último trimestre del 2013. Este satélite tendrá una vida útil estimada de 15 años.

1.3.4 MEXSAT II.

El MEXSAT 2 o Morelos III, nombrado así como continuación de los primeros dos satélites mexicanos puestos en órbita, es el satélite secundario para el servicio móvil de la red MEXSAT. También es un Boeing 702 HP, el cual se pondrá en la órbita 116.8°W, en el tercer trimestre del 2014. Este satélite tendrá una vida útil estimada de 15 años.

Tabla 1.1. Especificaciones del MEXSAT III.

Astronave	
Lanzamiento en masa	2900 Kg.
Capacidad de carga de energía	3,5 kW.
Paneles solares	Tres paneles por conjunto con células de arseniuro de galio UTJ.
Estabilización	Estabilización de 3 ejes con sistemas de impulso cero.
Propulsión	Sistema de transferencia orbital con bi-propelente líquido e hidracina mono-propelente para estabilización orbital.
Baterías	Baterías de Li-Ion.
Vida útil	15 años.
Orbita	114.9 ° Longitud Oeste.
Bandas de Frecuencia	
Banda C	3.7 – 4.2 GHz (Descendente) y 5.925 – 6.425 GHz (Ascendente)
Repetidor	12 transpondedores activos en banda C extendida.
Antena	2,3 m de doble reflector de rejilla desplegable.
Banda Ku	11.7 – 12.2 GHz (Descendente) y 14 – 14.5 GHz (Ascendente)
Repetidor	12 transpondedores activos en banda Ku extendida.
Antena	2.5 x 2.7 m con un solo reflector super elíptico y desplegable.
Lanzamiento	
Vehículo de Lanzamiento	Ariane 5
Lugar de Lanzamiento	Kourou, Guayana Francesa.
Fecha	19 e diciembre 2012.

1.3.5 MEXSAT III.

El MEXSAT 3 o Bicentenario, nombrado así como parte de los festejos del bicentenario del grito de independencia, es el primero de los satélites de la red MEXSAT en ponerse en órbita. Fue programada su fecha de lanzamiento el 19 de diciembre de 2012, tal como se observa en las especificaciones de la [Tabla 1.1](#). Este satélite sirve de controlador de los otros dos satélites de la red. Es un satélite para servicio fijo de la plataforma STAR-2 y es fabricado por la compañía Orbital Sciences Corporation. Este satélite ocupará la órbita 114.9°W y será puesto en órbita a bordo de un cohete Ariane 5 desde la base de Kourou en la Guayana Francesa. Otras características de los satélites Mexsat I y II aparecen en la [Tabla 1.2](#). Las áreas de cobertura de este satélite para la banda C y Ku, tanto para transmisión como para la recepción, se muestran en la [Figura 1.2](#).

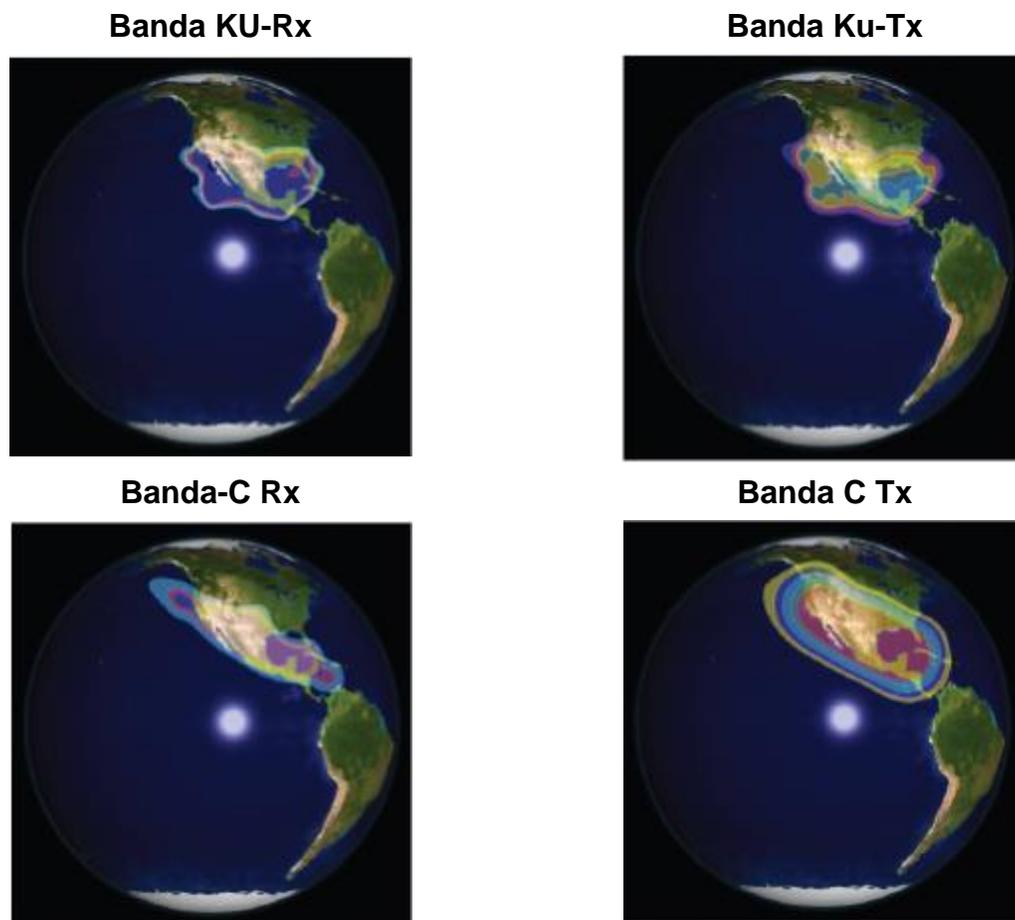


Figura 1.2. Mapa donde se muestra la cobertura del MEXSAT III.

Tabla 1.2. Características de los satélites Mexsat I y II.

CONCEPTO	MEXSAT I Y II
FABRICANTE	BOEING.
MODELO DEL SATÉLITE	BOEING 702HP.
POSICIÓN ORBITAL	113° Y 116° Oeste.
VIDA UTIL	Aproximadamente 15 años.
ANTENAS	Reflector de 22 m. para Banda L; Antena de 2m. para banda Ku planificada.
COBERTURA	México, Zona económica exclusiva, Centroamérica, América del Sur.
PESO TOTAL EN TIERRA	Masa lanzamiento: 5400 kg. Masa en órbita: 3200kg.
CARGA ÚTIL	Amplificador de potencia de estado sólido para banda L, tubos amplificadores de onda viajera de 100W para banda Ku, canalizador digital flexible.
POTENCIA EN WATTS	14000..
ALIMENTACIÓN	Panales solares: dos alas con cinco paneles de celdas fotovoltaicas de triple unión. Baterías: dos conjuntos de baterías de ion litio. Unidad de control electrónico de baterías y controlador de alimentación integrado.
SITIOS DE CONSTRUCCIÓN	California.
COHETES COMPATIBLES	Arianespace - (Ariane 5/ Ariane 6), International Launch Services (Proton M), Sea Launch company (Zenith-3SL), SpaceX (Falcon-9 Heavy), NASA (Atlas).
PROPULSORES	Propulsor de apogeo de propelente. Líquido de alto rendimiento de 100lbf. Propulsores axiales: 4 de 5 lbf. Propulsores este-oeste: 4 de 2.2 lbf.
SERVICIOS	Voz, Datos, Internet y Video en entorno móvil.
TIPO DE ORBITA	Geoestacionaria Inclinada 6°.



CAPÍTULO 2 | ELEMENTOS DE UN ENLACE SATELITAL

CAPITULO 2

ELEMENTOS DE UN ENLACE SATELITAL

2.1 Consideraciones Generales.

La interacción entre los cuerpos del sistema solar es muy compleja, porque depende de múltiples relaciones cambiantes. Para conocer sus efectos es necesario emplear una alta precisión en los cálculos correspondientes. Además, para entender los fenómenos de dicha disciplina hay que visualizar con certeza cambios progresivos en las relaciones geométricas durante la evolución de cada evento en el espacio, lo cual en ocasiones se dificulta considerablemente. Por fortuna, en el caso de los satélites de comunicación solamente es necesario tomar en cuenta, además de su interacción con la tierra, los efectos del sol y de la luna, ya que la interacción con otros cuerpos celestes no son significativos para su misión. Por otra parte, en un enlace satelital, se consideran también los efectos pertinentes a las capas superiores de la corteza en la tierra, tales como, la atmósfera, tropósfera y ionósfera.

El análisis de las órbitas terrestres incluye los principios de las relaciones espaciales y temporales, así como los medios y la magnitud del impulso que permiten alcanzar y circunnavegar una órbita precisa.

2.2 Características de las Órbitas.

Las características del movimiento de un satélite artificial en órbita terrestre están fundamentadas por las tres leyes de Kepler sobre el movimiento de los planetas alrededor del sol, que después tuvieron el sustento de la ley de gravitación de Newton y de su segunda ley de movimiento. Las leyes de Kepler se pueden expresar como sigue:

- La órbita de cada planeta es una elipse con el sol en el foco.
- La línea que une un planeta con el sol describe áreas iguales en tiempos iguales.
- El cuadrado del periodo de la órbita es proporcional al cubo de la distancia media al foco.

La ley de gravitación universal establece que la fuerza de atracción entre dos cuerpos es proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre sus centros. La segunda ley de movimiento de Newton establece que la aceleración de un cuerpo tiene la misma dirección de la fuerza que se le aplique y es

proporcional a la magnitud de ésta, e inversamente proporcional a su masa, tal como se muestra a continuación:

$$F = -\frac{GMm}{r^2} \quad (2.1)$$

$$F = m \frac{dv}{dt}. \quad (2.2)$$

Donde, F es la fuerza de atracción, G es la constante de gravitación fundamental, M es la masa del sol o, en un caso general, la de un cuerpo mayor, m es la masa del cuerpo menor, r es la distancia entre los centros de los dos cuerpos y dy/dt es la aceleración de m respecto de un sistema de coordenadas con origen en el centro de M .

En los casos que más interesa, la masa mayor es de la tierra ($5.9742 \times 10^{24} \text{kg}$) y se puede hacer la sustitución $GM = \mu \approx 398601 \text{ km}^3/\text{s}^2$. Además, como normalmente la aceleración gravitacional es más útil que la fuerza, si se divide entre m y se combinan las ecuaciones anteriores, entonces la ley de la gravitación universal aplicada a los satélites artificiales en cuestión, se puede representar como:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{\mu}{r^2} \quad (2.3)$$

A ésta ecuación se le llama ecuación de movimiento de dos cuerpos.

2.3 Tipos de Orbitas Satelitales.

Una forma de diferenciar los sistemas de satélites, es por la altura a la que se encuentra la órbita por la que circulan, además ésta también influye de forma decisiva a la hora de obtener el número de satélites necesario para conseguir la cobertura deseada. Dado un ancho de haz, el área de cobertura será mucho menor estando en una órbita baja que en otra de mayor altura. Por otro lado, la potencia necesaria para emitir desde órbitas bajas es menor, con los inconvenientes que ello conlleva. Entonces, se intenta alcanzar un compromiso que dé, relativamente, buena zona de cobertura y la potencia de transmisión sea la menor posible.

Se pueden diferenciar en la [Figura 2.1](#) cuatro tipos de órbitas según sus altitudes:

- GEO: Órbitas Terrestres Geosíncronas, también conocida como órbita de Clarke, en honor al escritor Arthur Clarke, que escribió, en 1945, por primera vez sobre esta posibilidad. La órbita GEO está situada a 35848 Km de altura, con una latitud de 0 grados, es decir, situada sobre el Ecuador. El período de esta órbita es de exactamente 24 horas y por lo tanto esta siempre sobre una misma posición relativa con respecto a la Tierra. La mayoría de los satélites actuales son del tipo GEO. Los satélites con orbitas GEO precisan menos cantidad de ellos para cubrir la totalidad de la superficie terrestre, pero poseen un retardo de 0.24 segundos, debido al camino de ida y vuelta que debe recorrer la señal. Los satélites GEO necesitan también obtener una posición orbital específica alrededor del Ecuador para mantenerse lo suficientemente alejados de otros (2 grados aproximadamente) y así para evitar posibles interferencias inter-satelitales. La ITU y la FCC se encargan de administrar estas posiciones.
- MEO: Órbita Terrestre Media. Se encuentran a una altura de entre 10075 y 20150 Km. A diferencia de los GEO su posición relativa respecto a la Tierra no es fija. Debido a su menor altitud se necesitan más satélites para cubrir la superficie terrestre, pero por lo contrario se reduce la latencia del sistema de forma significativa. En la actualidad, no existen muchos satélites MEO, y se utilizan principalmente para posicionamiento.
- LEO: Órbita Terrestre de Baja Altura. Los satélites encauzados en este tipo de órbitas son de tres tipos: LEO pequeños (centenares de Kbps) destinados a aplicaciones de bajo ancho de banda; LEO grandes (miles de Kbps) albergan las aplicaciones de los anteriores y otras como telefonía móvil y transmisión de datos; y finalmente los LEO de banda ancha (mega LEO) que operan en la banda de Mbps, entre los que se encuentra Teledesic.
- HEO: Es una órbita elíptica, muy excéntrica (70000 Km/1000 Km) e inclinada (alrededor de 63°) que no ha sido todavía utilizada por los occidentales. Es muy estimada por los rusos (por lo que también se llama "órbita Molniya"). El satélite sobrevuela muy rápidamente (cerca de 33000 Km/h) una misma región extendida, durante alrededor de 8 h sobre 24 h, sobre un ángulo próximo a la vertical. Favorece a los países nórdicos.

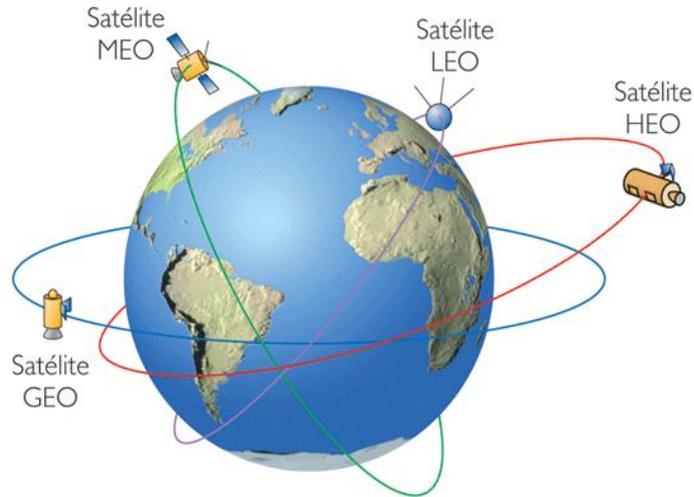


Figura 2.1 Tipos de Orbitas.

2.4 Geometría, Coordenadas, Orientación y Tiempo.

2.4.1 Sistema de coordenadas.

Las coordenadas tridimensionales para calcular el movimiento de los satélites denominadas geocéntricas de inercia o celestiales, con origen en el centro de la Tierra, son las más utilizadas para calcular la velocidad y la posición de un satélite. También se usan otros dos tipos de sistemas de coordenadas terrestres: uno geocéntrico en el plano de la órbita que facilita su análisis, el cual es esencial porque en ese plano se relacionan su geometría con los parámetros más importantes, y otro denominado topocéntrico, empleado para calcular la dirección y distancia de un satélite desde la estación terrena que interese, con el origen de ésta misma.

En cualquier caso, al considerar la cobertura de los satélites debe tomarse en cuenta el propio sistema de coordenadas de la superficie de la Tierra, basado en longitudes y latitudes. Finalmente también se utilizan sistemas de coordenadas referidos al satélite que se esté considerando y a la órbita, por lo que es frecuente la necesidad de hacer conversiones de un sistema a otro.

En la actualidad, hay muchos programas encargados de detectar la dirección de máxima radiación de una antena o bien del satélite, los cuales utilizan diversos tipos de sistemas de coordenadas y sus conversiones, con la finalidad de ejecutar “pruebas de aislamiento”. Las pruebas de aislamiento se realizan con la finalidad de no interferir entre enlaces de distintas estaciones terrenas. Para ello, el programa le da un panorama al operador de como orientar

la antena en cuestión para su transmisión con un satélite en particular. Los ángulos que se ajustan en una antena de una estación terrena satelital son su acimut y su elevación, en el siguiente apartado se harán mención.

2.4.2 Ángulos de elevación y acimut.

Para orientar la antena de una estación terrena en la dirección correcta hacia donde está el satélite con el que desea comunicarse, se definen los ángulos de elevación y acimut. Estos ángulos son medidos tomando en cuenta la línea sobre la cual la antena tiene ganancia máxima, y en el caso de una antena parabólica, que es la más comúnmente usada, dicha referencia es el eje del plano parabólico. Este eje contiene al vértice y al foco, tal como se muestra en la [Figura 2.2](#). El ángulo de elevación θ se define como el ángulo formado entre el plano horizontal local y la línea de vista entre la estación terrena y el satélite, tal como se indica en la [Figura 2.2](#).

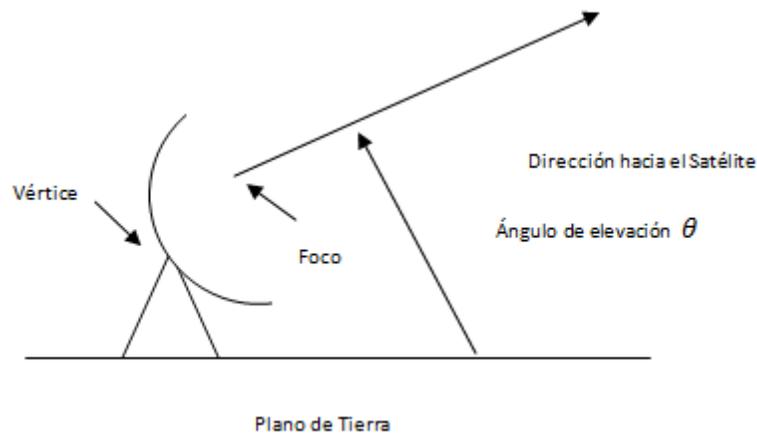


Figura 2.2. Definición del ángulo de elevación.

Tanto el valor del ángulo θ como el ángulo de acimut ϕ dependen de las coordenadas geográficas de la estación terrena y de la posición orbital del satélite.

El ángulo de acimut ϕ es el ángulo medido en sentido de las manecillas del reloj entre la línea que une a la estación terrena con el norte geográfico y la proyección horizontal local de la línea de máxima radiación de la antena, que debe apuntar en la dirección hacia el satélite.

Como ya se había mencionado, la importancia de estos ángulos radica en la capacidad de la antena de una estación terrena de transmitir la información en la dirección adecuada para que no exista una atenuación significativa en el trayecto de la señal. Además, una señal transmitida no debe interferir con alguna otra señal del medio. Por lo tanto, estos ángulos posicionan la antena en dirección al satélite con el que se quiere comunicar de manera que la potencia recibida tenga un factor de calidad no menor al 70% y con un nivel de aislamiento de 30 a 35 dB. Esto es suficiente para que no exista interferencia entre las demás estaciones terrenas de la región próxima.

Las pruebas de aislamiento son una serie de pasos que consiste en mantener la posición correcta de la antena de forma que tenga un nivel de aislamiento de 30 dB y un factor de calidad (SQF: Signal Quality Factor) mínimo del 70%, principalmente. Esto da la garantía de que el equipo transmita la señal; y para realizar tales pruebas se debe tener conocimiento de los ángulos de acimut y elevación, por eso es importante definirlos y darle su importancia en un sistema satelital.

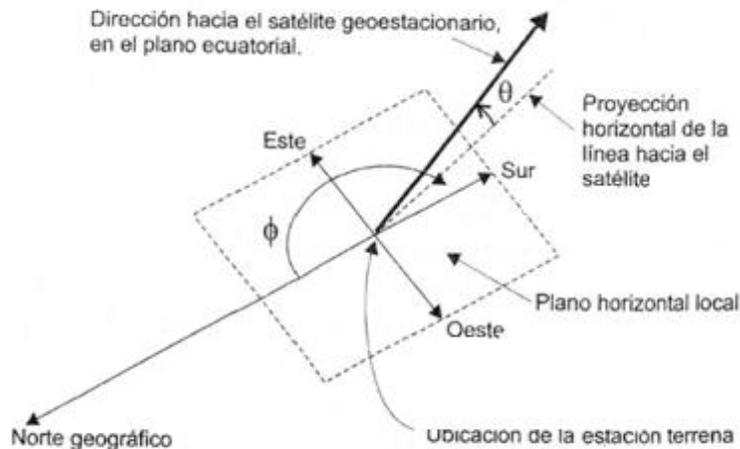


Figura 2.3. Definición del ángulo de acimut.

Del análisis de la [Figura 2.3](#) se puede llegar a un desarrollo para el cálculo de los ángulos de elevación y acimut. Las expresiones matemáticas para estos ángulos son:

$$\theta = \arctan \left\{ \frac{(\cos l)(\cos \Delta L) - \frac{R_t}{h}}{\text{sen}[\arccos(\cos l \cos \Delta L)]} \right\}, \tag{2.4}$$

donde, l es la latitud de la estación terrena, ΔL es la longitud del satélite menos la longitud de la estación terrena, R_t es el radio de la Tierra con un valor promedio de 6378km y h es el radio de la órbita geoestacionaria de 42,164km.

Y para el ángulo de acimut se tiene:

$$\phi = \arctang \left[\frac{\text{sen } \Delta L}{\text{sen} l \cos \Delta L} \right] = \arct \left[\frac{\tan \Delta L}{\text{sen} l} \right] \quad (2.5)$$

Dependiendo de la localización de la estación terrena con relación al satélite, el ángulo de acimut ϕ es:

- $\phi = 180^\circ - \phi'$ Hemisferio norte y al oeste del satélite.
- $\phi = 180^\circ + \phi'$ Hemisferio norte y al este del satélite.
- $\phi = \phi'$ Hemisferio sur y al oeste del satélite.
- $\phi = 360^\circ - \phi'$ Hemisferio sur y al este del satélite.

En la Figura 2.4. se ilustra en grados el ángulo de acimut y de elevación.

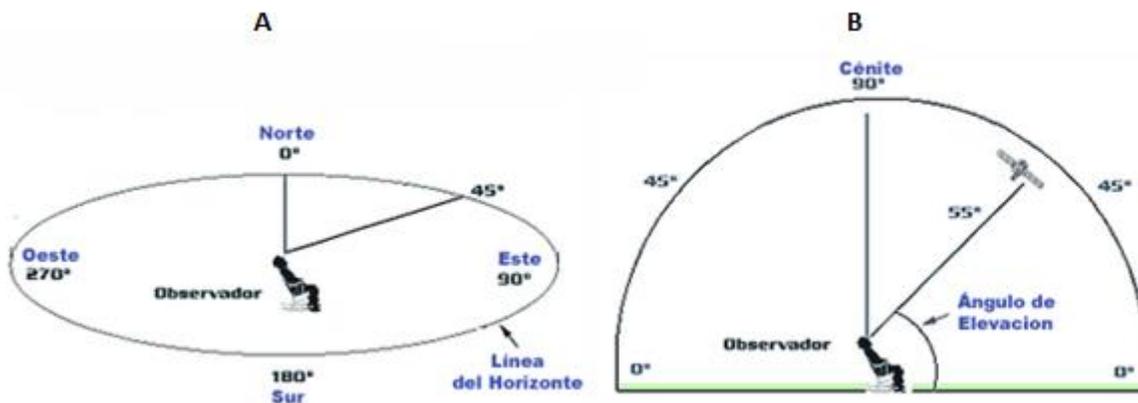


Figura 2.4. A) Acimut: Después de conocer dónde queda el punto Cardinal Norte, el observador dirige la mirada hacia el ángulo de acimut de 45 grados. B) Elevación: De frente al acimut deseado se inclina la cabeza hacia el ángulo de elevación.

2.5 Transpondedor.

Un transpondedor o transponder es un tipo de dispositivo utilizado en telecomunicaciones cuyo nombre viene de la fusión de las palabras inglesas Transmitter (Transmisor) y Responder (Contestador/Respondedor).

Se designa con este término (o con alguna de las abreviaturas XPDR, XPNDR, TPDR o TP) a equipos que realizan la función de:

- Recepción, amplificación y reemisión en una banda distinta de una señal (estos transpondedores se utilizan en comunicaciones espaciales para adaptar la señal del satélite entrante/saliente a la frecuencia de los equipos en banda base).
- Respuesta automática de un mensaje (predeterminado o no) a la recepción de una señal concreta de interrogación (estos transpondedores se utilizan en aeronáutica para sistemas de pseudo-radar).

Este dispositivo se utiliza principalmente como un nuevo transmisor debido a que recibe una señal en particular a partir de una fuente, entonces amplifica (refuerza) la señal antes de enviarla a un sitio predefinido (Figura 2.5). Estos dispositivos tienen un gran número de aplicaciones en la vida cotidiana. Los usos más comunes son: la televisión por satélite, la telefonía por satélite, el control del tráfico aéreo y en los automóviles. También son incorporados en los coches para abrir puertas automáticamente. Es importante mencionar que existen transpondedores activos y transpondedores pasivos.

Los transpondedores activos, como su nombre lo indica, son dispositivos que continuamente emiten señales de radio que son seguidos y controlados. Estos también pueden ser dispositivos automáticos que refuerzan las señales recibidas y transmitir las a otro lugar. Son empleados en sistemas de localización, navegación o posicionamiento. De manera más concreta, se puede decir que un transpondedor activo es toda cadena de unidades o equipos interconectados en serie en un canal, que modifican y adecuan la señal desde el receptor (habitualmente una antena receptora) hasta el emisor (habitualmente una antena emisora) con el fin de retransmitir la información recibida. Existen casos, se utiliza el término, de manera estrictamente incorrecta, para designar al amplificador de señal que se encuentra justo antes del elemento emisor. En estos sistemas, el transpondedor responde en una frecuencia distinta, y ambas frecuencias, la de entrada y la de salida de datos, están predefinidas de antemano. En estos casos los alcances son gigantescos; tanto, que se emplean sin problema alguno en toda la transmisión actual de equipos espaciales (televisión por satélite).

Los transpondedores pasivos son aquellos elementos que son identificados por escáneres, robots u ordenadores, tales como las tarjetas magnéticas, las tarjetas de crédito, o las etiquetas con forma de espiral que llevan los productos de los grandes almacenes. Para ello, es necesario que interactúe con un sensor que decodifique la información que contiene y la transmita al centro de datos. Generalmente, estos transpondedores tienen un alcance muy limitado, del orden de un metro.

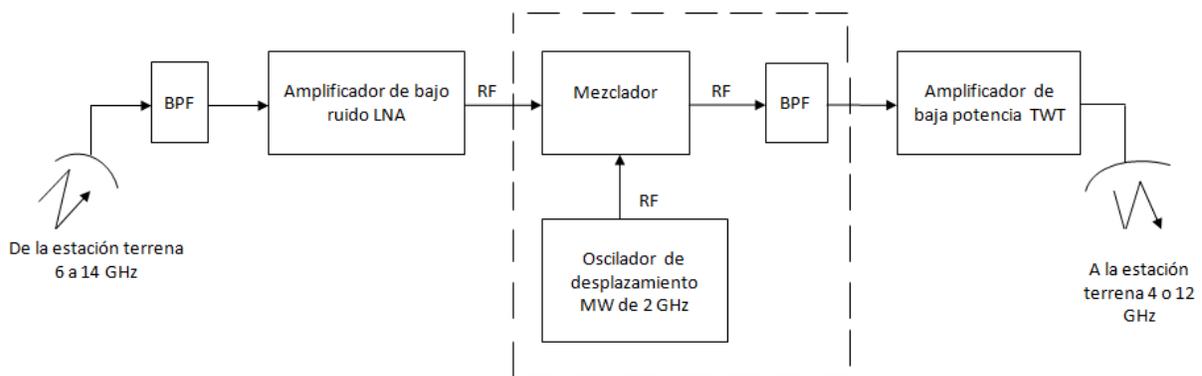


Figura 2.5. Transpondedor del satélite.

2.6 Estación Terrena.

Una estación terrena satelital es un conjunto de equipos de comunicaciones y de cómputo que puede ser terrestre (Fija y Móvil), marítima ó aeronáutica. Las estaciones terrenas pueden ser usadas en forma general para transmitir y recibir del satélite. Pero, en algunas aplicaciones especiales solo se pueden recibir o solo pueden transmitir (Figura 2.6).

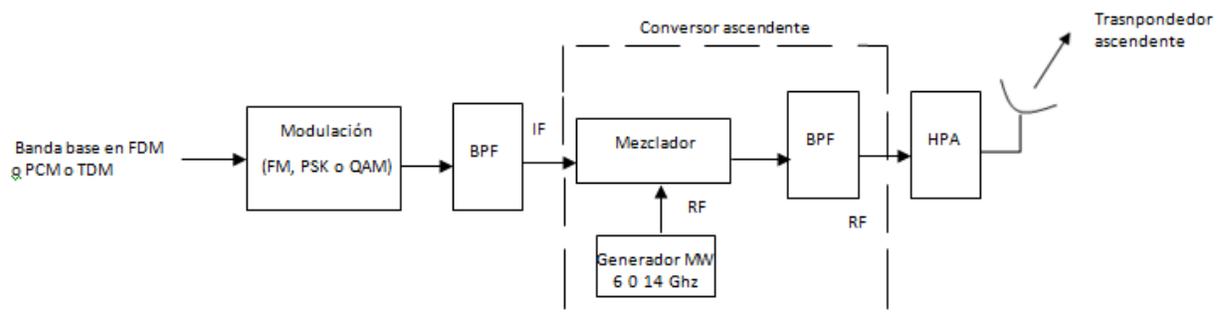


Figura 2.6. Modelo de subida del satélite.

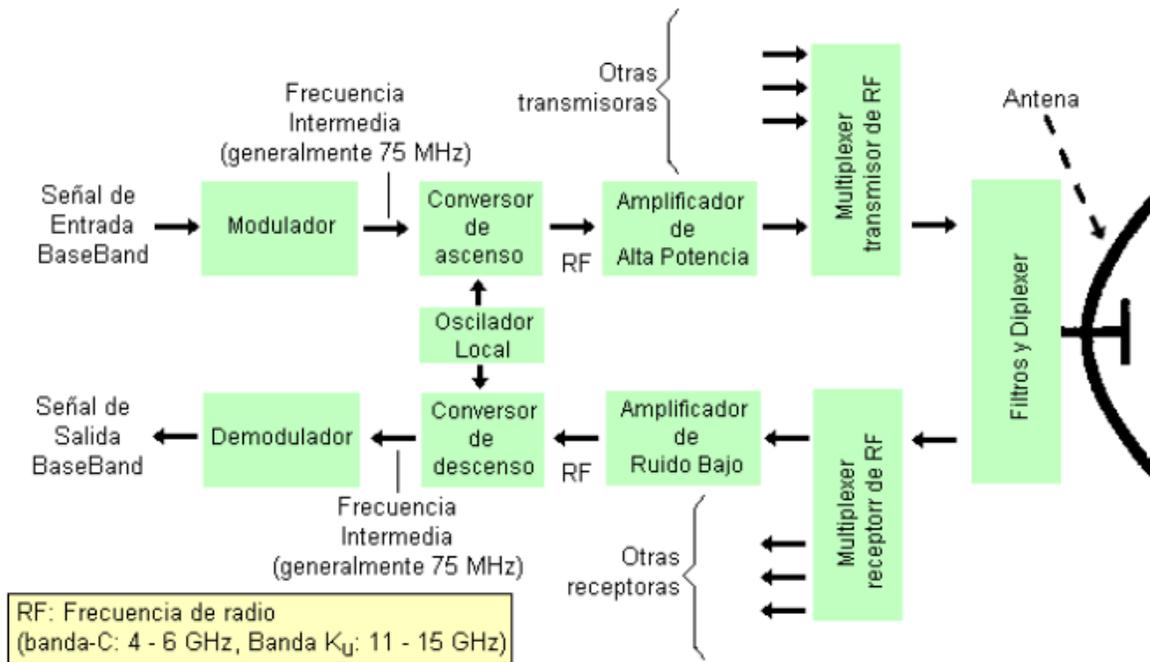


Figura 2.7. Elementos de una estación terrena.

El tamaño y la complejidad de una estación terrestre dependen del servicio que será previsto y la potencia radiada por el satélite (Figura 2.7). Las estaciones más simples permiten solo recepción y están equipadas con una antena parabólica que puede tener un diámetro de menos de 1 metro. Las antenas más grandes y de las series de las primeras construidas por INTELSAT llegaron a tener 32 metros de diámetro.

Desde el comienzo de la era de las comunicaciones satelitales, las estaciones terrenas se han desarrollado continuamente, aunque la arquitectura general ha permanecido inalterada (Figura 2.8). Este desarrollo ha sido evidenciado por una reducción del tamaño de las estaciones. Esta reducción también es evidente en el tamaño del equipamiento usado en las estaciones y ha sido posible por el uso de las técnicas digitales y la miniaturización de componentes electrónicos a gran escala.

Una estación terrena satelital debe tener la capacidad de realizar todas las funciones que permitan al usuario u operador conocer en todo momento la posición y el estado de funcionamiento de cada sistema a bordo del satélite, entre los cuales se puede mencionar: sistemas de potencia, de radiofrecuencia, de control de actitud y de computadores a bordo.

También es necesario que la estación terrena sea capaz de comandar los sistemas y cargas útiles.

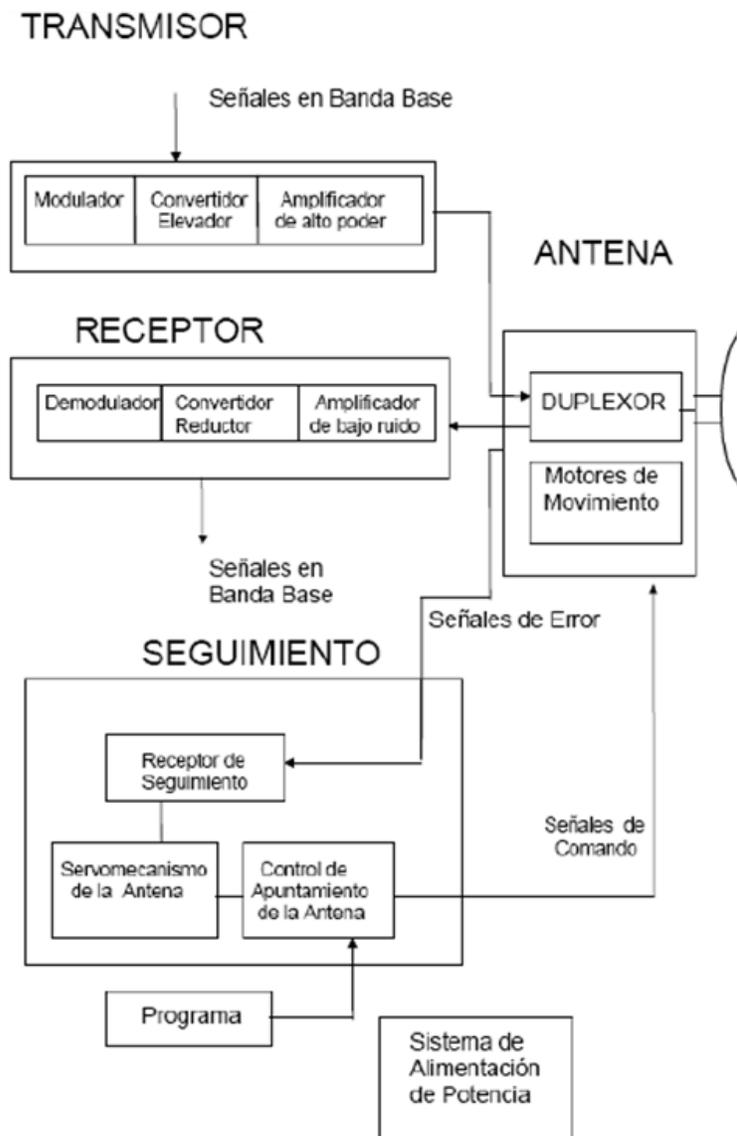


Figura 2.8. Etapas de una estación terrena.

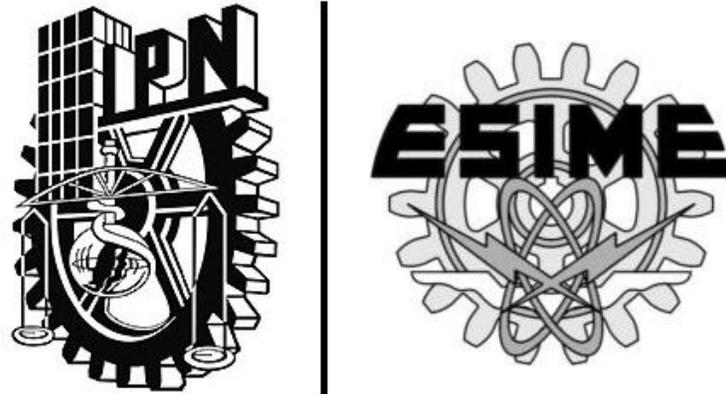
Las funciones principales ejecutadas por una estación terrena, en apoyo a un satélite operacional, involucran funciones de alta complejidad que usualmente abarcan las siguientes tareas:

- Seguimiento (tracking): para determinar la posición del satélite en su órbita.
- Operaciones de Telemetría: para adquirir y registrar el estado del satélite.

- Operaciones de Tele-instrucciones: para interrogar y controlar las diversas funciones del satélite.
- Operaciones de control: para determinar parámetros orbitales, para programar todas las pasadas del satélite y monitorear y cargar el computador a bordo.
- Operaciones de procesamiento de datos: para presentar todos los datos científicos de ingeniería en los formatos requeridos para el progreso exitoso de la misión.
- Enlaces de voz y datos a otras estaciones terrenas y centros de procesamiento.

De lista anterior, es claro que hay tres componentes principales de una estación terrena:

- Equipos.
- Programas computacionales.
- Personal.



CAPÍTULO 3 | FACTORES ATMOSFÉRICOS EN UN ENLACE SATELITAL

CAPITULO 3

ENLACE SATELITAL

Las señales llegan al satélite desde la estación en tierra por el "haz ascendente" y se envían a la tierra desde el satélite por el "haz descendente". Para evitar interferencias entre los dos haces, las frecuencias de ambos son distintas. Las frecuencias del haz ascendente son mayores que las del haz descendente, debido a que cuanto mayor sea la frecuencia se produce mayor atenuación en el recorrido de la señal, y por tanto es preferible transmitir con más potencia desde la tierra, donde la disponibilidad energética es mayor.

Para evitar que los canales próximos del haz descendente interfirieran entre sí, se utilizan polarizaciones distintas. En el interior del satélite los transpondedores, que tienen como misión recibir, cambiar y transmitir las frecuencias del satélite, a fin de que la información que se envía desde la base llegue a las antenas receptoras.

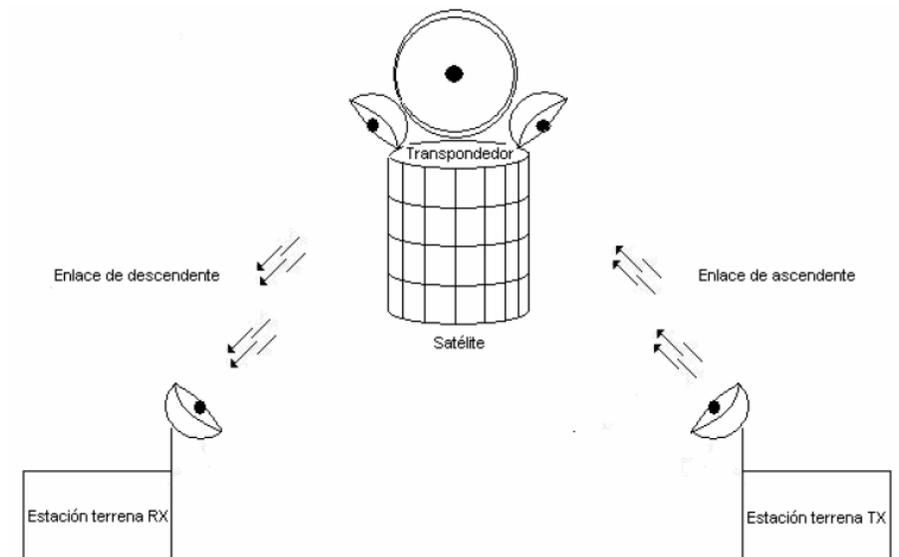


Figura 3.1. Modelo del enlace satelital.

3.1 Características y Efectos del Medio de Propagación.

El espacio exterior no es un lugar amigable para los satélites que todo el tiempo se ven afectados por distintos factores. Es importante conocer los factores que afectan directamente al satélite y a la propagación de las señales que pueden llegar a un ambiente interior.

En el espacio existen temperaturas extremas, intensas radiaciones, vacío y partículas que se mueven a velocidades enormes que pueden provocar daños y en casos extremos la destrucción de algún satélite.

Es necesario conocer todos los aspectos que afectan las señales de radio, desde que se transmiten hasta que se reciben.

3.1.1 Atenuación debido a nubes.

Para obtener la atenuación debida a las nubes para un valor de probabilidad determinado, debe conocerse las estadísticas del contenido de la columna total de agua líquida $J(\text{kg}/\text{m}^2)$ o de forma equivalente, milímetros de agua precipitable para un plazo determinado, lo que da:

$$A = \frac{J * K_l}{\text{sen } \theta} \text{ (dB)}, \quad \text{para } 5^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \quad (3.1)$$

siendo θ el ángulo de elevación y K_l coeficiente de la atenuación específica ((dB/km)/(g/m³)). Obsérvese que K_l es idéntico al coeficiente de absorción de masa L , de la Recomendación ITU-R P.836.

Las estadísticas del contenido de la columna total de agua líquida pueden obtenerse a partir de las mediciones radiométricas o mediante lanzamientos de radiosondas.

A falta de mediciones locales, deben utilizarse los valores del contenido de la columna total de agua líquida de nube (normalizado a 0° C), que se indican en [las Figuras 3.3 a 3.5](#) para obtener la atenuación debida a las nubes.

Los valores que aparecen en las [Figuras 3.2 a 3.5](#) se dan en kg/m² para cuatro niveles distintos de probabilidad de que rebase el nivel anualmente. Los mapas se han obtenido a partir de los datos recopilados durante dos años con una resolución espacial de 1.5° en latitud y longitud. Los ficheros de datos que contienen los datos para los niveles de probabilidad adicionales, pueden obtenerse en la oficina de Radiocomunicaciones de la ITU. La cuadrícula de latitudes de los ficheros de datos va de +90°N a -90°S en pasos de 1.5°; la cuadrícula de longitud va de 0° a 360° en pasos de 1.5°.

Para un emplazamiento distinto de los puntos de la cuadrícula, se obtiene el contenido de la columna total en el emplazamiento deseado mediante interpolación bilineal de los valores en los cuatro puntos de la cuadrícula más próximos.

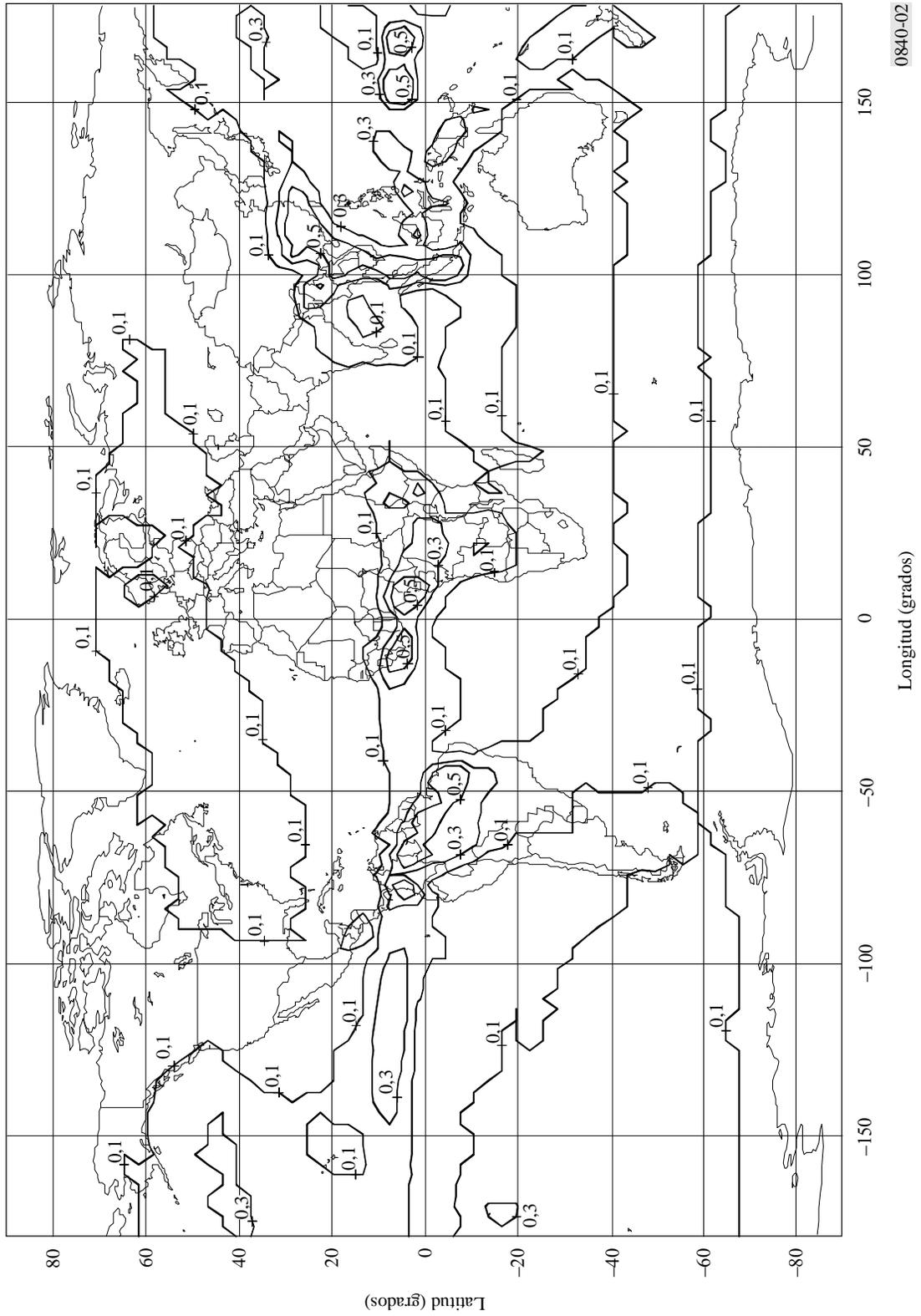


Figura 3.2. Contenido total normalizados de una columna de agua líquida de nube (kg/m²) rebasado durante el 20% del año.

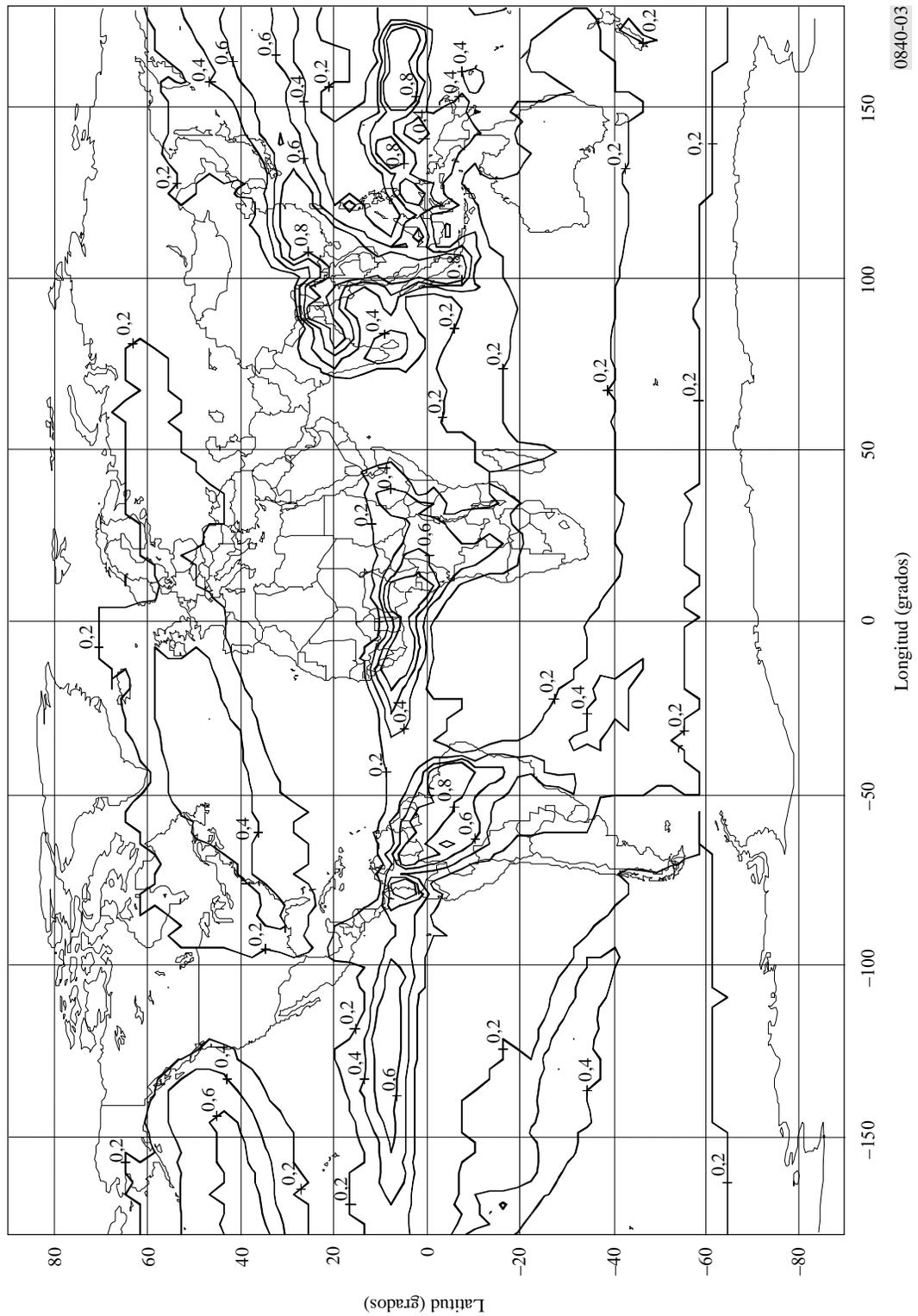


Figura 3.3. Contenido total normalizados de una columna de agua líquida de nube (kg/m^2) rebasado durante el 10% del año.

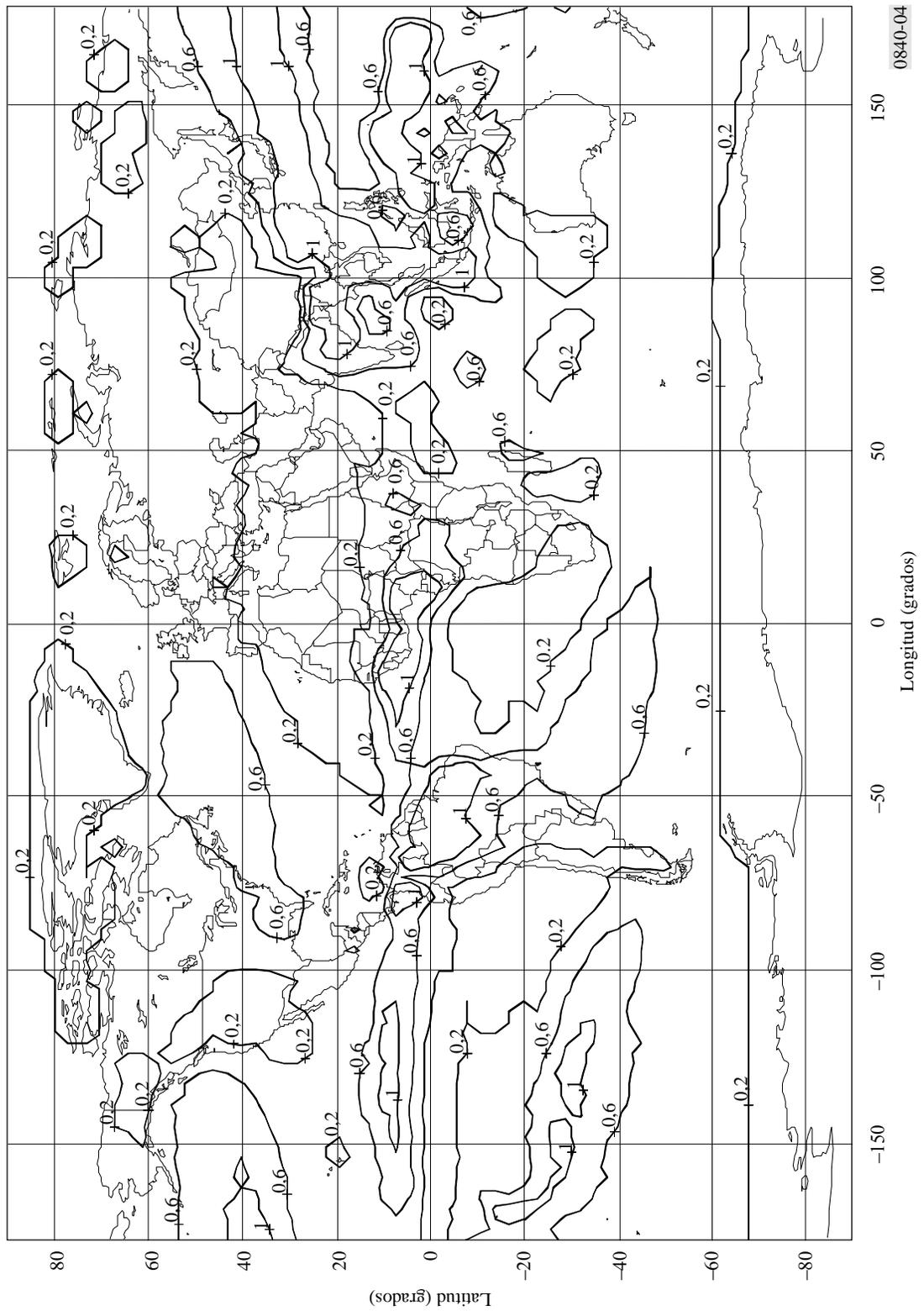
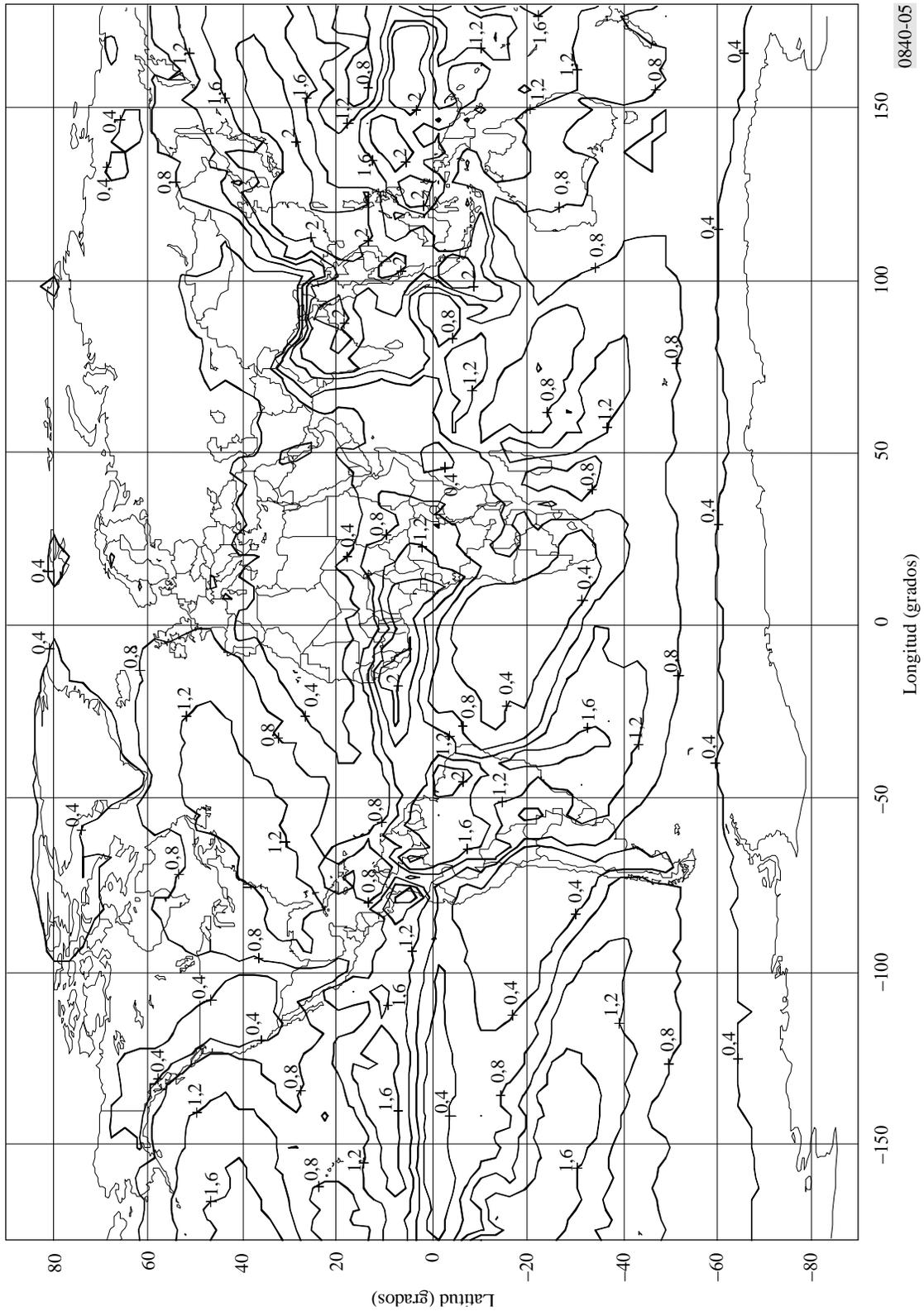


Figura 3.4. Contenido total normalizados de una columna de agua líquida de nube (kg/m^2) rebasado durante el 5% del año.



0840-05

Figura 3.5. Contenido total normalizados de una columna de agua líquida de nube (kg/m²) rebasado durante el 1% del año.

A fin de obtener el valor excedido para una probabilidad distinta de la que aparece en los ficheros de datos, se utiliza una interpolación semi-logarítmica (logarítmica sobre la probabilidad en porcentaje y lineal sobre el contenido de la columna total).

3.1.2 Atenuación debido a lluvia.

El modelo de atenuación por lluvia se basa en un modelo estadístico, donde la tasa de lluvia se mide en milímetros por hora. Por lo general, la probabilidad de lluvia se representa como p y la tasa de lluvia como R_p (esta probabilidad se mide como la cantidad de tiempo de lluvia en un tiempo determinado, generalmente un año).

La atenuación específica es:

$$\alpha = aR_p^b \text{ dB/km} \tag{3.2}$$

En donde a y b dependen de la frecuencia y la polarización.

$$a = \begin{cases} 4.21 * 10^{-5} f^{2.42}, & f \leq 54.09 \text{ GHz} \\ 4.09 * 10^{-2} f^{0.699}, & 54 < f \leq 180 \text{ GHz} \end{cases}$$

$$b = \begin{cases} 1.41 f^{-0.0779}, & f \leq 25 \text{ GHz} \\ 2.63 f^{-0.272}, & 25 < f \leq 164 \text{ GHz} \end{cases} \tag{3.3}$$

Aparte de estos rangos de frecuencia, los coeficientes son iguales a cero. Si los coeficientes son lineales polarizados horizontalmente o verticalmente, los coeficientes para una polarización circular deben ser calculados mediante:

$$a_c = 0.5(a_h + a_v)$$

$$b_c = \frac{a_h b_h + a_v b_v}{2a_c} \tag{3.4}$$

donde R_p es la tasa de lluvia en mm/hr, la cual puede obtenerse por medio del departamento meteorológico de cada país y L_R es la longitud geométrica de la lluvia dada en Km. La expresión geométrica que permite el cálculo de la longitud está dada por Ipólito y Lin [1]

$$L_R = \frac{L_0}{1 + \frac{L_0(r_r - 6.2)}{2636}} \tag{3.6}$$

donde:

$$L_0 = \frac{H_0 - H_g}{\text{sen } \theta} \tag{3.7}$$

θ es el ángulo de elevación desde la estación terrena, H_g es la altitud de la estación terrena en Km, H_o es la altura de lluvia en Km y l es la latitud de la estación terrena, de tal modo que:

$$H_0 = \begin{cases} 4.8, & l < 30^\circ \\ 7.8 - 0.1 * l, & l \geq 30^\circ \end{cases} \tag{3.8}$$

Tabla 3.1. Tabla general de los coeficientes de atenuación específica.

Frecuencia (GHz)	Ah	av	Bh	bv
1	0.0000387	0.0000352	0.912	0.88
2	0.00065	0.000138	0.963	0.923
4	0.00175	0.000591	1.121	1.075
6	0.00301	0.00155	1.308	1.265
8	0.00454	0.00265	1.332	1.31
10	0.0101	0.00395	1.327	1.264
12	0.0188	0.00887	1.276	1.2
15	0.0367	0.0168	1.217	1.128
20	0.0751	0.0335	1.154	1.065
25	0.124	0.0691	1.099	1.03
30	0.187	0.113	1.061	1

Referencia: Ippolito, 1986, pag. 46.

Nota: Más adelante se muestra una tabla similar, pero más específica y enfocada al modelo CCIR.

3.1.3 Atenuación por absorción atmosférica.

Las frecuencias altas hacen que las ondas electromagnéticas interactúen con las moléculas de los gases en la atmósfera. Con ello se reduce la potencia de la señal. Las bandas asignadas por la ITU (1 a 30 GHz) son las que menos absorción ofrecen a las señales del espectro electromagnético.

$$[A_{a.a}]_{dB} = [A_{cenit}]_{dB} \text{cosec } \theta \tag{3.9}$$

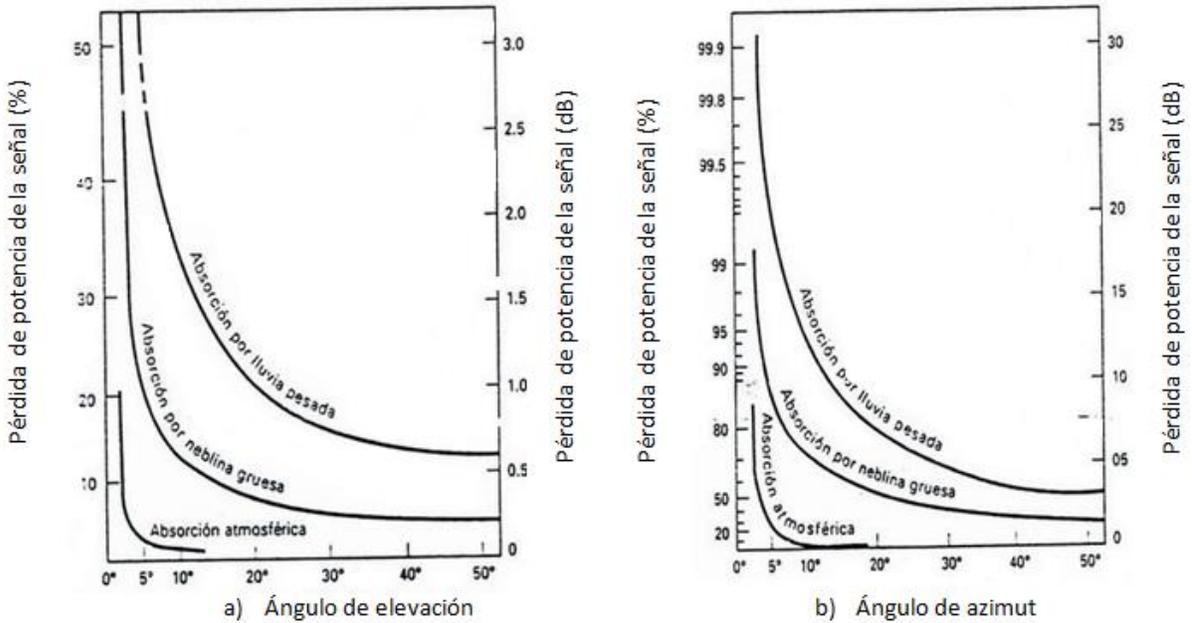


Figura 3.6. Atenuación debida a la absorción atmosférica para: (a) la banda de 6/4 GHz; (b) la banda 14/12 GHz.

3.1.4 Efecto Faraday.

Una onda polarizada linealmente se puede analizar como la suma de dos ondas de la misma frecuencia, polarizadas circularmente en sentidos opuestos. Al atravesar una región con campo magnético, las velocidades de propagación de las dos componentes cambian (una de ellas se adelanta con respecto a la otra) produciendo una rotación del plano de polarización de la onda compuesta.

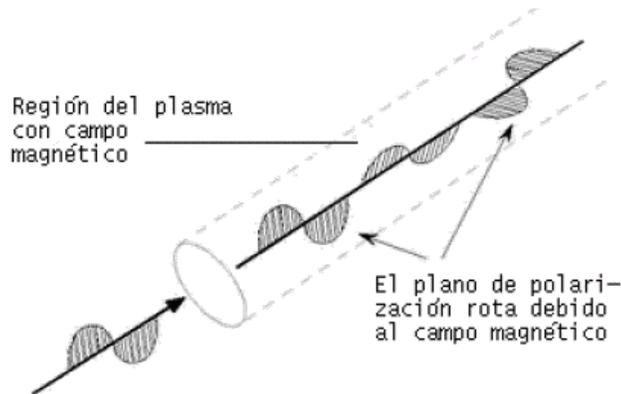


Figura 3.7. Rotación de Faraday.

Cuando las ondas radioeléctricas atraviesan la ionosfera, que están cargadas eléctricamente debido a la radiación solar, estas sufren una rotación del plano de

polarización, que puede volver a repetirse en su viaje de vuelta, al volver atravesarla. Este efecto depende del nivel de ionización existente en las capas altas de la atmósfera.

Las señales pueden rotar varias veces de polarización a una velocidad que depende mucho de la frecuencia de transmisión. Es muy rápida en la banda de 50MHz, y disminuye en sentido inverso de la frecuencia.

El cambio de dirección del campo eléctrico de una señal satelital desviada tiene dos consecuencias:

1. Pérdida de la señal co-polarizada, la cual consiste en la disminución de la potencia que llega a la antena receptora.
2. La creación de una componente de ruido con polarización cruzada.

La pérdida de potencia de la señal co-polarizada con campo eléctrico E depende del ángulo θ_f que sufre por la rotación de Faraday. El campo eléctrico está definido por la siguiente expresión:

$$E_{cop} = E \cos \theta_f \tag{3.10}$$

La pérdida de potencia está dada por:

$$A_{Faraday} = 10 \log (E_{cop}^2 / E^2) = 20 \log (\cos \theta_f) \text{ [dB]}. \tag{3.11}$$

Y la magnitud de la componente de polarización cruzada es la siguiente:

$$E_{polX} = E \sen \theta_f \tag{3.12}$$

3.1.5 Despolarización causada por lluvia.

Cuando llueve en la troposfera, las señales que pasan a través de ella son despolarizadas, es decir, hay pérdida de potencia de la señal.

El grado de despolarización está en función de la forma y la orientación de las gotas de lluvia, de la frecuencia y la polarización de la onda, y de la intensidad de la lluvia o número de gotas en el trayecto de propagación.

La fórmula más reciente para calcular la magnitud de la discriminación de polarización cruzada es:

$$D_{PX} = U - V (\log A_R), \tag{3.13}$$

donde:

$$U = 30 \log f - 40 \log (\cos \theta) - 20 \log (\sen (2\tau)),$$

$$V = 20, \text{ si } 8 \text{ GHz} < f < 15 \text{ GHz (Banda Ku),}$$

$$V = 23, \text{ si } 15 \text{ GHz} < f < 35 \text{ GHz (Banda Ka),}$$

teniendo en cuenta que f es la frecuencia de la señal en GHz, θ es el ángulo de elevación de la estación terrena, τ es el ángulo de inclinación del plano de polarización con relación al plano horizontal local (es 45° para polarización circular).

En general, los sistemas satelitales con polarización lineal funcionan mejor y son más confiables que los de polarización circular en presencia de lluvia. Finalmente, cabe decir que en América las transmisiones en banda Ku se efectúan con polarización circular, como es el caso de los satélites DirecTV.

3.2 Enlace Ascendente.

Un enlace de subida consiste en modular una señal de frecuencia intermedia (FI) con una señal banda base en FM, PSK y QAM, seguida por el convertidor elevador, el cual está constituido por un mezclador y un filtro pasa-banda, para convertir la señal de FI a RF. Por último, la señal pasa por un amplificador de potencia (HPA: High Power Amplifier), el cual le da la potencia necesaria para que la señal llegue hasta el satélite.

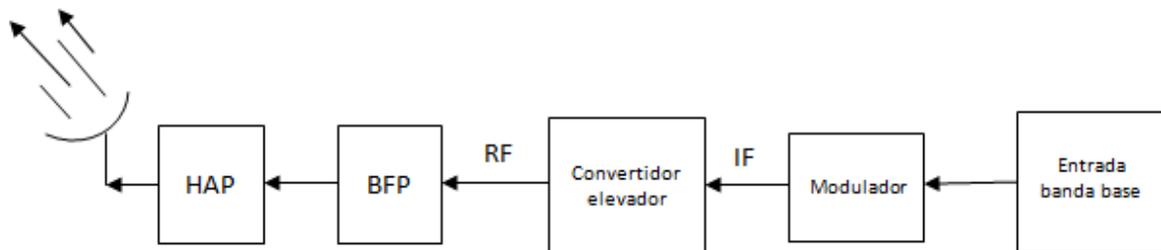


Figura 3.8 Modelo básico ascendente.

3.3 Enlace Descendente.

El receptor de la estación terrena tiene un filtro pasa-banda (BPF: Band-Pass Filter), el cual limita la potencia de entrada que recibe el amplificador de bajo ruido (LNA: Low-Noise Amplifier). Una vez amplificada la señal en bajo ruido, la señal es descendida de RF a frecuencias IF por medio de un convertidor descendente, después la señal es demodulada y entregada en banda base.

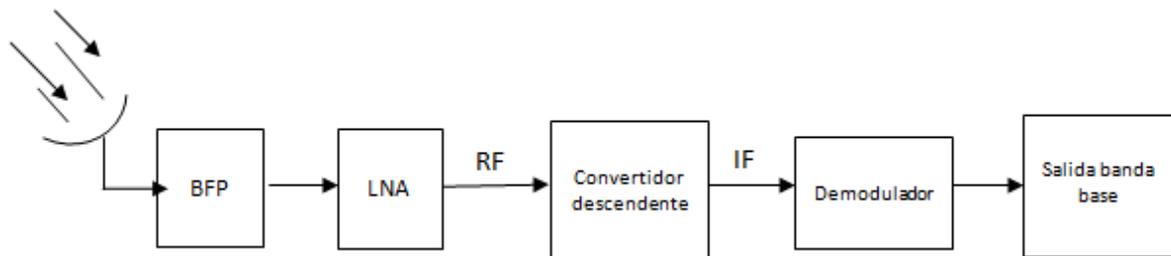


Figura.3.9. Modelo básico descendente.



CAPÍTULO 4 | MODELOS DE ATENUACIÓN POR LLUVIA

CAPITULO 4

MODELOS DE ATENUACIÓN POR LLUVIA

La atenuación producida por la lluvia en un trayecto puede calcularse integrando la atenuación específica en toda su longitud si se conoce la variación de la intensidad de lluvia a lo largo de él:

$$A = \int R(x)^{\alpha} dx \quad (4.1)$$

Sin embargo, generalmente se carece de esta información. En su defecto se han propuesto varios métodos de predicción estadística de la atenuación causada por la lluvia a partir de mediciones de la intensidad de precipitación sobre el propio trayecto o en sus cercanías. Las principales diferencias entre estos métodos radican en el modelo utilizado para describir la estructura espacial y temporal de la lluvia.

Debido a la enorme importancia de la predicción de la atenuación por lluvia en el diseño de sistemas de comunicaciones por satélite, se han elaborado numerosos modelos en las últimas décadas. De manera simplificada, los modelos pueden agruparse en dos categorías:

- Modelos físicos. Intentan definir la física del fenómeno y modelar la estructura horizontal y vertical de la lluvia. Suelen basarse en medidas de radares meteorológicos sobre las que se han extraído parámetros como la altura de la lluvia, la extensión horizontal y vertical de las precipitaciones y la distribución de intensidades en una célula de lluvia.
- Modelos semi-empíricos. Obtenidos mediante el ajuste a medidas experimentales de atenuación en varios emplazamientos, frecuencias y ángulos de elevación. Cuentan con una base física subyacente. Requieren de la utilización de parámetros estadísticos como la longitud de trayecto efectiva, coeficientes de reducción horizontal y vertical, etc.

Aunque, a priori, los modelos físicos son los más adecuados para la predicción de la atenuación, suele ser escasa la información acerca de muchos de los parámetros necesarios para obtener resultados fiables. Por ello, los modelos semi-empíricos se han utilizado más hasta ahora y han obtenido mejores resultados.

Casi todos los modelos requieren datos de entrada muy simples tales como:

- La distribución acumulada de intensidad de lluvia en el emplazamiento. $R(p)$. Esta distribución puede obtenerse a partir de medidas locales o mediante mapas globales de intensidad, como el que se recoge en la Recomendación 837-6, Existen modelos que sólo requieren puntos de la distribución, como la intensidad de lluvia rebasada el 0.01% del tiempo $R_{0.01}$.
- La altura de lluvia o la altura de la isoterma de 0°C. Este dato puede obtenerse a partir de medidas locales mediante sondeos o utilizando mapas globales como el que se recoge en la Recomendación 839-3.

4.1 Modelos Estadísticos para Atenuación por Lluvia.

Una de las grandes dificultades en el cálculo de la atenuación es la no presencia de lluvia durante todo el trayecto; por lo cual, no se puede asumir que ésta es constante y sencillamente calcular una atenuación distribuida (dB/km) y multiplicar la anterior atenuación por la longitud del enlace. De todas maneras, con el fin de facilitar los cálculos, normalmente casi todos los modelos calculan una atenuación específica en dB/km y la atenuación total es la atenuación específica por la distancia y lo anterior multiplicado por un factor de corrección de distancia; factor que tiene en cuenta el fenómeno que no llueve en todo el trayecto.

4.2 Modelo CCIR.

Cuando se da el caso en que llueve y hay una estación terrena, ya sea transmisora o receptora, las señales portadoras se van atenuando conforme estas se propagan a través de la región del aire en donde este lloviendo; en este caso se tendrá una distancia total d que las señales recorrerán a través del fenómeno meteorológico y que dependerá de la altura h de las nubes con relación al piso y del ángulo de elevación θ de la antena de la estación.

Con el paso del tiempo se han propuesto diversos modelos matemáticos para estimar la longitud d del trayecto en el que una señal satelital es afectada en forma efectiva por la lluvia. La CCIR en su Reporte 564-4 publicado en 1990, hace una recomendación para usar el método que a continuación se indica:

Paso 1: Determinar la intensidad de caída de lluvia $R_{0.01}$ excedido por 0.01% de promedio anual, cuando la estación terrena se tiene localizada; de [la Tabla 4.1](#).

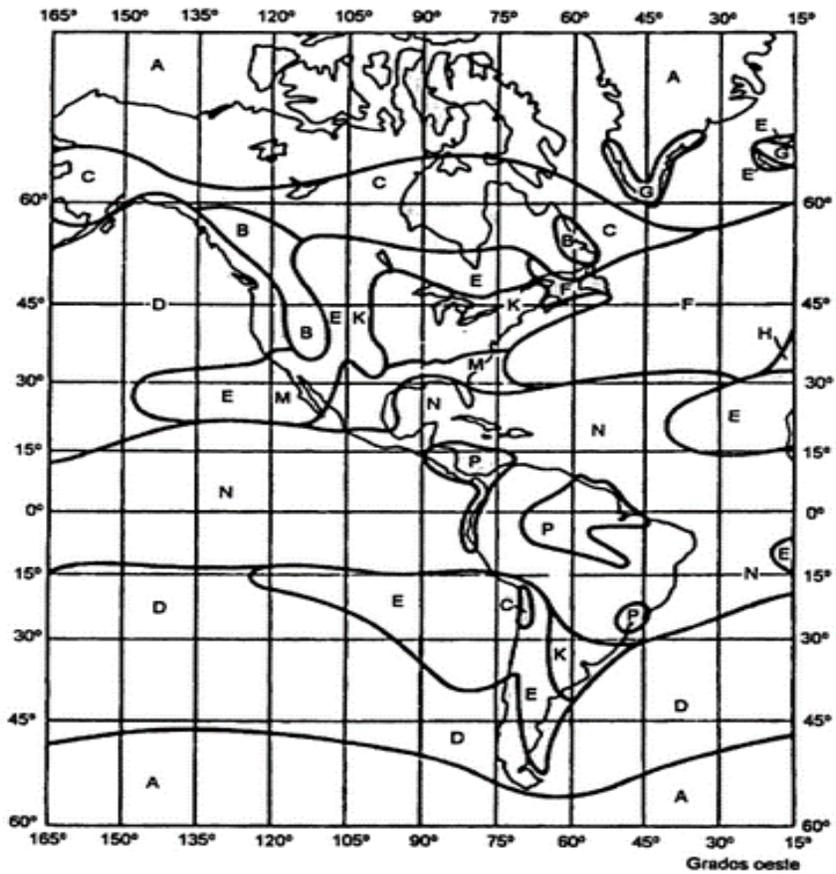


Figura 4.1. Regiones de América designadas con letras por la CCIR*, según la intensidad de lluvia que es excedida.

Tabla 4.1. Datos estadísticos por región para el mapa de la Figura 4.1.

Porcentaje del tiempo excedido en un año (%) y equivalencia en minutos acumulados	Intensidad de lluvia excedida (mm/h)														
	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	
0.1	526	2	3	5	8	6	8	12	10	20	12	15	22	35	65
0.01	53	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145
0.001	5.3	22	32	42	42	70	78	65	83	55	100	150	120	180	250

Paso 2: Calcular la altura de la lluvia h_r (km) con:

$$\begin{aligned} h_r &= 3 + 0.028 l & 0^\circ < l < 36^\circ [km] \\ h_r &= 4 - 0.075 (l - 36) & l > 36^\circ [km] \end{aligned} \quad (4.2)$$

En donde l es la latitud de la estación terrena en grados, ya sea norte o sur.

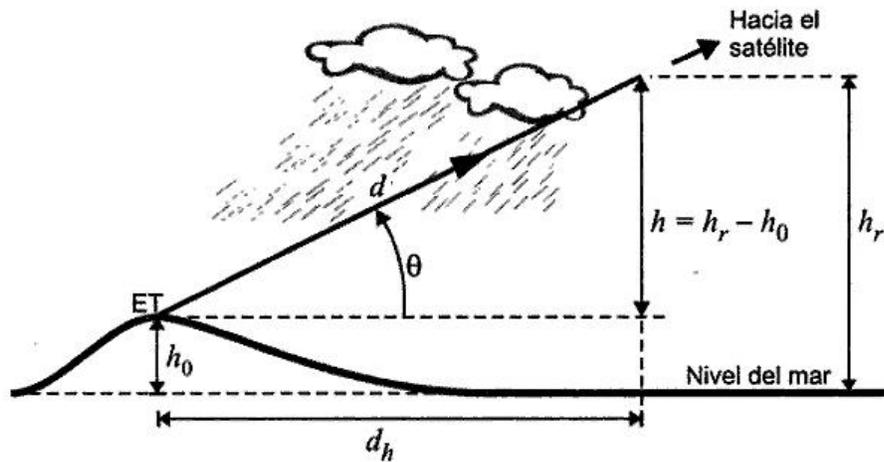


Figura 4.2. Cuando llueve, una señal portadora recorre una distancia d a través de la lluvia y se atenúa progresivamente.

Se observa que h tiene valores entre 3 y 4 km, con un punto máximo de 4 km para $l = 36^\circ$. Estas expresiones ya toman en cuenta, aproximadamente, la altura de la isoterma de cero grados en función de la latitud, que normalmente es el punto de arranque en los cálculos por otros métodos.

Paso 3: Calcular la inclinación de la longitud de la trayectoria:

$$L_s = \frac{(h_r - h_s)}{\text{sen}\theta} \quad (4.3)$$

la cual es válida para un ángulo de elevación $\theta > 5^\circ$ y donde h_s es la altura de la estación terrena sobre el nivel del mar (km).

Paso 4: Calcular $r_{0.01}$, el factor de reducción para 0.01% del tiempo que se desea, tomando en cuenta la no homogeneidad de la lluvia.

$$r_{0.01} = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{L_S}{L_0}\right) \cos\theta\right)} \quad (4.4)$$

donde

$$L_0(km) = 35^{(-0.015R_{0.01})}$$

Paso 5: Cálculo de L_e :

$$L_e = L_S r_{0.01} \quad (km) \quad (4.5)$$

Paso 6: Determinación de γ_R puede ser con los nomogramas de la [Figura 4.3](#) como función de $R_{0.01}$ y de la frecuencia (para una polarización circular toma valores de la atenuación obtenida para cada polarización lineal)

$$\gamma_R = k(R_{0.01})^\alpha \quad (dB/Km) \quad (4.6)$$

donde la frecuencia depende de los coeficientes k y α que son dados por:

$$k = \frac{[k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos E^2 \cos \tau]}{2} \quad (4.7)$$

$$\alpha = \frac{[k_h \alpha_H + k_v \alpha_V + (k_h \alpha_H - k_v \alpha_V) \cos E^2 \cos 2\tau]}{2k} \quad (4.8)$$

donde $k_H, k_V, \alpha_H, \alpha_V$ son dados en la [Tabla 5.4 \(página 68\)](#); θ es el ángulo de elevación y τ es la polarización del ángulo de inclinación.

El segundo método es más preciso, pero requiere cálculo computacional. Los valores han sido probados y encontrados para frecuencias de hasta 40 GHz.

Paso 7: El valor de la atenuación conveniente para la lluvia excedida de 0.01% del promedio anual es lo siguiente.

$$A_{RAIN(\rho=0.01)} = \gamma_R L_e \quad (dB) \quad (4.9)$$

Nótese que al usar estas últimas dos aproximaciones para las constante k y v se supone que los coeficientes valen lo mismo para polarización horizontal y vertical. El error es poco ya que, si se observan los valores de la Tabla 5.4 se ve que, en efecto, son casi iguales, y que son mucho más dependientes de la frecuencia que de la polarización.

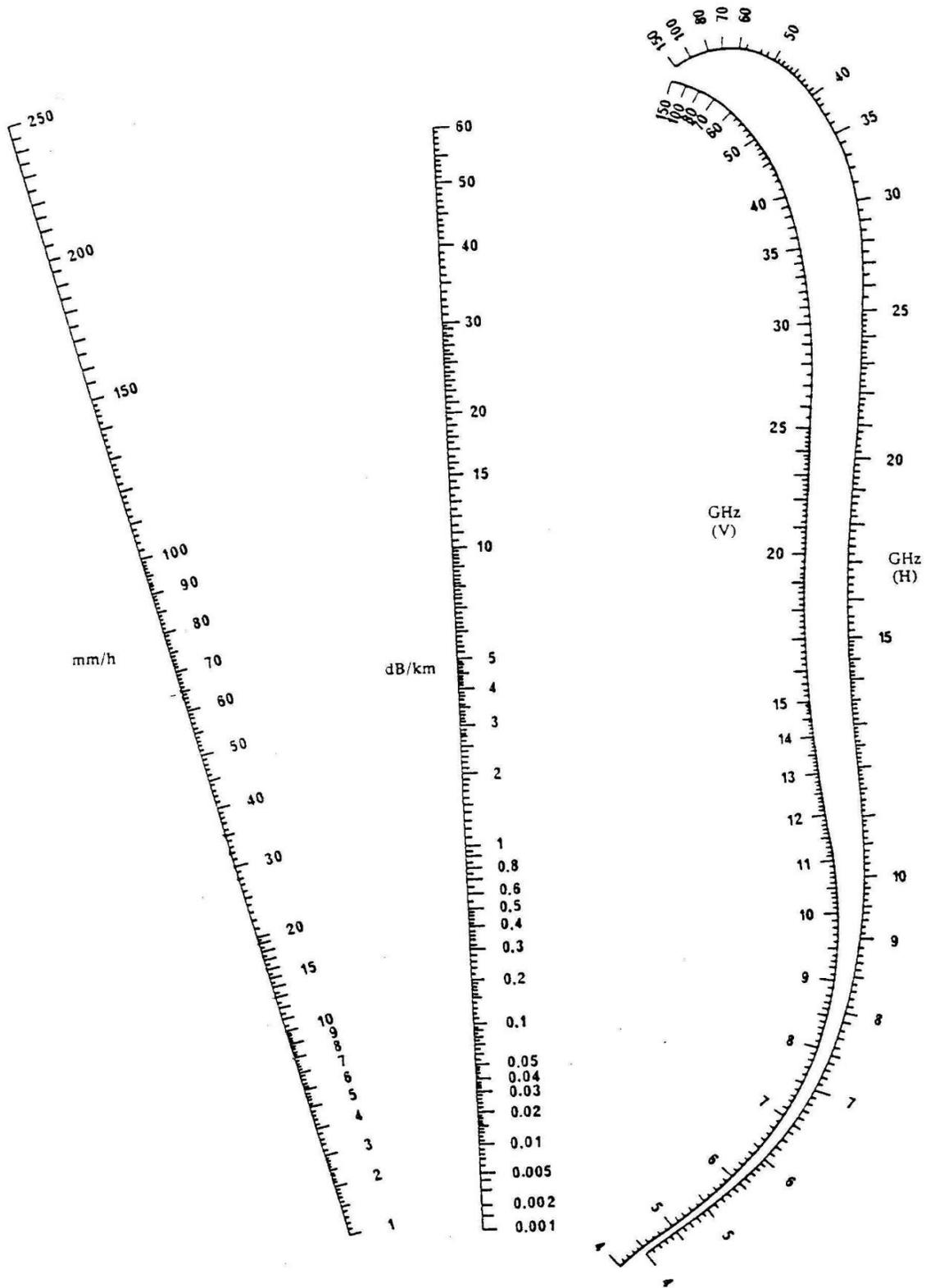


Figura 4.3. Nomograma de la CCIR del reporte 721 para calcular gráficamente el coeficiente γ de atenuación específica.

Otra forma alterna de calcular y es usando el nomograma publicado por la misma CCIR que se muestra en la [Figura 4.3](#). Auxiliándose con una regla o escuadra, se unen con una recta el punto de intensidad de la lluvia y el punto de la frecuencia de transmisión, según la polarización empleada; el valor de y se lee sobre la vertical central, donde cruza la recta trazada. Si la señal tiene polarización circular, se obtiene una buena aproximación promediando las atenuaciones específicas leídas con polarización horizontal y vertical a la misma frecuencia.

El valor de la atenuación excedida por un porcentaje p entre 0.001% y 1% está dada por:

$$A_{RAIN}(p) = A_{RAIN}(p = 0.01) \times 0.12 p^{-(0.546 + 0.043 \log p)} \quad (4.10)$$

4.3 Modelo ITU-R Rec. 618-10.

El método que sigue proporciona estimaciones a largo plazo de las estadísticas que facilitan la atenuación debida a la lluvia sobre trayectos oblicuos en un determinado punto para frecuencias de hasta 55 GHz. Se precisan conocer los parámetros siguientes:

- $R_{0.01}$: Intensidad de la lluvia en el punto de que se trate, para el 0,01% de un año medio (mm/h).
- h_s : Altura de la estación terrena sobre el nivel medio del mar (km).
- θ : Ángulo de elevación (grados).
- φ : Latitud de la estación terrena (grados).
- f : Frecuencia (GHz).
- R_e : Radio efectivo de la Tierra (8 500 km).

Si no se dispone de datos locales de la altura de la estación terrena sobre el nivel medio del mar, se puede obtener una estimación a partir de los mapas de altitud topográfica de la Recomendación ITU-R P.1511.

La configuración geométrica se muestra en la [Figura 4.4](#).

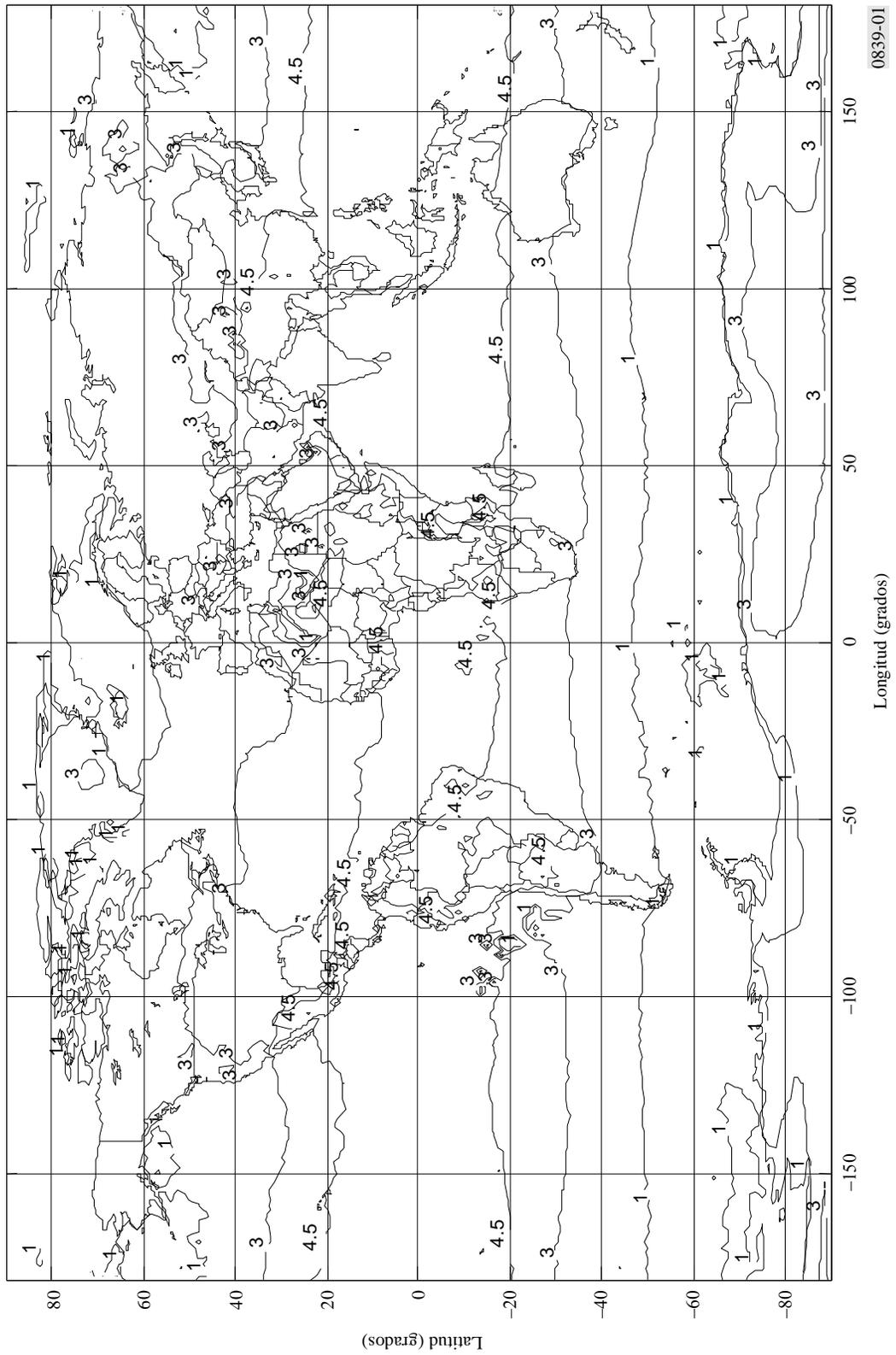


Figura 4.5. Altura media anual de la isoterma de 0° C por encima del nivel del mar.

Los datos van de 0° a 360° de longitud y de $+90^\circ$ a -90° de latitud. Para un emplazamiento diferente de los puntos de cuadrícula, la altura de la isoterma de 0°C por encima del nivel medio del mar en el emplazamiento deseado puede calcularse mediante interpolación bilineal de los valores en los cuatro puntos de cuadrícula más próximos.

Paso 2: Para $\theta \geq 5^\circ$, se calcula la longitud del trayecto oblicuo, L_S , en el espacio correspondiente a la altura de la lluvia mediante la fórmula:

$$L_S = \frac{(h_0 - h_S)}{\text{sen}\theta} \quad [km] \quad (4.12)$$

Para $\theta < 5^\circ$ se utiliza la fórmula siguiente:

$$L_S = \frac{2(h_0 - h_S)}{\left(\text{sen}^2\theta + \frac{2(h_0 - h_S)}{R_e}\right)^{\frac{1}{2}} + \text{sen}\theta} \quad [km] \quad (4.13)$$

Si $H_0 - h_S$ es menor o igual a cero, la atenuación debida a la lluvia prevista para cualquier porcentaje de tiempo es cero y no son necesarios los pasos siguientes.

Paso 3: Se determina la proyección horizontal, L_G , de la longitud del trayecto oblicuo aplicando la siguiente ecuación:

$$L_G = L_S \cos\theta \quad [km] \quad (4.14)$$

Paso 4: Se obtiene la intensidad de la lluvia, $R_{0.01}$ rebasada durante el 0,01% de un año medio (con un tiempo de integración de 1 min). Si no pueden obtenerse datos estadísticos a largo plazo a partir de fuentes locales de información, puede hacerse una estimación utilizando los mapas de intensidad de lluvia que aparecen en la Recomendación ITU-R P.837. Si $R_{0.01}$ es cero, la atenuación debida a la lluvia prevista para cualquier porcentaje de tiempo es cero y no son necesarios los pasos siguientes.

Paso 5: Se halla la atenuación específica, γ_R , utilizando los coeficientes dependientes de la frecuencia que aparecen en la Recomendación ITU-R P.838 y el índice de intensidad de la lluvia, $R_{0.01}$, determinado según el Paso 4, aplicando la ecuación:

$$\gamma_R = k(R_{0.01})^\alpha \quad [dB/km] \quad (4.15)$$

Paso 6: Se calcula el factor de reducción horizontal, $r_{0.01}$ para el 0,01% del tiempo:

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f} - 0.38(1 - e^{-2L_G})}} \quad (4.16)$$

Paso 7: Se calcula el factor de ajuste vertical, $v_{0.01}$ para 0,01% del tiempo:

$$\xi = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{h_0 - h_S}{L_G r_{0.01}} \right) \quad [\text{grados}]. \quad (4.17)$$

Para $\xi > \theta$,

$$L_R = \frac{L_G r_{0.01}}{\cos \theta} \quad [km]. \quad (4.18)$$

De otro modo,

$$L_R = \frac{(h_0 - h_S)}{\operatorname{sen} \theta} \quad [km]. \quad (4.19)$$

Si $|\varphi| < 36^\circ$

$$X = 36 - |\varphi| \quad [km]. \quad (4.20)$$

De otro modo,

$$X = 0 \quad [\text{grados}],$$

$$v_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\operatorname{sen} \theta} \left(31 \left(1 - e^{-\left(\frac{\theta}{(1+X)} \right)} \right) \sqrt{\frac{L_R \gamma_R}{f^2} - 0.45} \right)} \quad (4.21)$$

Paso 8: La longitud de trayecto efectiva es:

$$L_E = L_R v_{0.01} \quad [km]. \quad (4.22)$$

Pasó 9: La atenuación que rebasa el nivel pluvial previsto para el 0.01% de un año $A_{0.01}$ se obtiene mediante:

$$A_{0.01} = \gamma_R L_E \quad [dB]. \quad (4.23)$$

Pasó 10: La atenuación que rebasa el nivel pluvial estimada para otros porcentajes de un año medio, en el margen del 0.001% al 5%, se determina a partir de la atenuación que rebasa el nivel pluvial para el 0.01% de un año medio:

$$\text{Si } p \geq 1\% \text{ o } |\varphi| \geq 36^\circ: \quad \beta = 0. \quad (4.24)$$

$$\text{Si } p < 1\% \text{ y } |\varphi| < 36^\circ \text{ y } \theta \geq 25^\circ: \quad \beta = -0.005(|\varphi| - 36^\circ). \quad (4.25)$$

De otro modo:

$$\beta = -0.005(|\varphi| - 36^\circ) + 1.8 - 4.25 \text{ sen}\theta, \quad (4.26)$$

$$A_p = A_{0.01} \frac{p}{0.01}^{-(0.655+0.033 \ln(p)-0.045 \ln(A_{0.01})-\beta(1-p)\text{sen}\theta)} \quad [dB]. \quad (4.27)$$

Este método proporciona una estimación de las estadísticas a largo plazo de la atenuación debida a la lluvia. Si se comparan los datos obtenidos con los datos previstos, habrá de tenerse en cuenta la importante variación anual que registran las estadísticas de intensidad de lluvia (véase la Recomendación ITU-R P.678).

4.4 Modelo ITU-R mejorado para zonas tropicales (Brasil).

En el 2008, mediante el documento 3J/23, Brasil presentó a la ITU-R un nuevo modelo el cual introduce un nuevo concepto: lluvia efectiva. La lluvia efectiva es una tasa que se puede asumir igual para todo el trayecto del enlace, el modelo se describe en la (4.28); la anterior ecuación se ha simplificado para enlaces terrestres.

$$A_p = k \left[1.763 R_p^{0.753 + \frac{0.197}{d}} \right]^a \frac{d}{1 + \frac{d}{119 R^{-0.244}}} \quad (4.28)$$

El anterior modelo tiene un punto de inflexión en 1km lo que hace que su comportamiento no sea correcto para distancias inferiores a 1km. Por lo anterior, no se recomienda su uso para distancias inferiores a 1km. En la [Figura 4.6](#) se presenta el comportamiento del modelo Brasil para una frecuencia de 10 GHz con polarización horizontal.

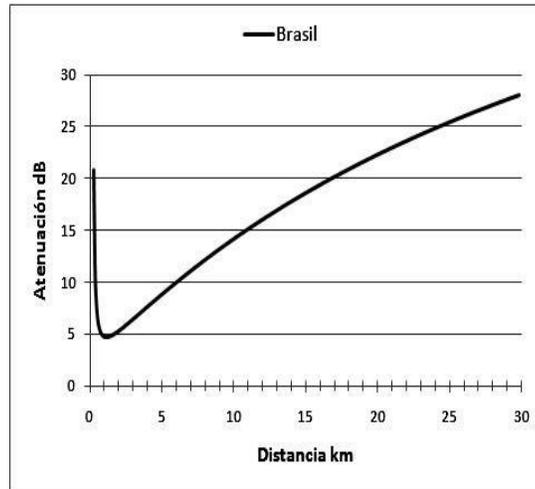


Figura 4.6. Atenuación por lluvia en función de la distancia al aplicar el modelo Brasil.

4.5 Modelo de Bryant.

El modelo de Bryant se basa en el comportamiento físico del medio de propagación y utiliza tres parámetros de entrada para el cálculo de atenuación: la distribución completa de intensidades de lluvia, una altura de lluvia variable en función de la intensidad de lluvia y el ángulo de elevación de la estación. Ha sido elaborado mediante la comparación simultánea de medidas experimentales de atenuación a 12 GHz en zonas tropicales y registros pluviómetros. Se han comprobado sus prestaciones con la base de datos de la ITU. Obteniéndose resultados satisfactorios en todo el rango de probabilidades y frecuencias hasta 50 GHz.

El modelo asume que la lluvia ocurre en forma de células de diámetro D con una lluvia constante R en todo su volumen. Estos parámetros se han obtenido a partir de la correlación con los pluviómetros. Las medidas experimentales en zonas tropicales, al realizarse con ángulos de elevación altos, presentan algunas ventajas, ya que se asegura una estructura horizontal de la lluvia muy simple.

Los pasos que deben seguirse para implementar el modelo son:

Paso 1: La altura de lluvia depende de la intensidad de la lluvia para cada probabilidad, R_p y viene dada por:

$$H_0 = 4.5 + 0.0005 R_p^{1.65} \quad [km] \tag{4.29}$$

Paso 2: El diámetro de la célula de lluvia también es función de la intensidad:

$$D = 540 R_p^{-12} \quad [km] \quad (4.30)$$

Paso 3: El diámetro medio de la célula de lluvia es:

$$D_m = \left(\frac{2}{\pi}\right) \cdot D \quad [km] \quad (4.31)$$

Pasó 4: La atenuación a lo largo del trayecto de propagación se obtiene como:

$$A = 1.57 D_m k_n \gamma_p \frac{L_s}{\eta L_G + D} \quad [dB] \quad (4.32)$$

Donde γ_p es la atenuación específica, $k_n = \exp(0.00tR_p)$ es el número de células, L es la proyección horizontal del trayecto, $L = h_R / \tan\theta$, L_s es la longitud del trayecto y η es el parámetro que mide la dependencia con la elevación:

$$\eta = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} \exp(\text{sen}\theta) & \theta \leq 55^\circ \\ 1.1 \tan\theta & \theta > 55^\circ \end{cases} \quad (4.33)$$

4.6 Modelo Empírico con una Aproximación Analítica.

Debido a su simplicidad, la relación empírica $A = aR^b$ y lo que es la atenuación específica A y la tasa de lluvia R se utiliza a menudo en el cálculo de las estadísticas de atenuación de lluvia. La relación aR^b demuestra que es una aproximación a una relación más general, excepto en los límites de baja frecuencia y en los límites ópticos.

Una cantidad fundamental en el cálculo de las estadísticas de atenuación de lluvia para trayectos terrestres y Tierra-espacio es la atenuación específica A , o la atenuación por unidad de distancia. Dos enfoques generales normalmente han sido usados para calcular A :

1) El empleo de un método teórico de distribución uniformemente aleatoria de las gotas de lluvia, modelados como esferas de agua.

2) Un procedimiento empírico basado en la relación aproximada entre A y la tasa de lluvia R ,

$$A = aR^b \quad (4.34)$$

Donde a y b son funciones de la frecuencia f y la temperatura de lluvia T . En el artículo [13] se presenta una relación teórica más general entre A y R , y se demuestra que (4.34) es una aproximación a esta relación, excepto en los límites de baja frecuencia.

Los autores de [13] trabajan con un método teórico que es bastante aceptable y los cálculos los llevaron a cabo para una amplia gama de frecuencias. Los cálculos para la obtención de valores de a y b para diferentes temperaturas lo realizan con algunas expresiones que son útiles para los estudios de sistemas que utilizan un ordenador y los cálculos requeridos en muchas frecuencias, Estas expresiones son simple, analíticas para A , y proporcionan resultados aproximados a los cálculos rigurosos de Mie.

Por esta razón la regresión logarítmica es utilizada para determinar las relaciones de aproximación entre los parámetros, a y b , y frecuencia. Obviamente, las relaciones de potencia individuales no son válidos en toda la gama de frecuencias de 1 a 1000 GHz. Por lo tanto, se establecieron cuatro relaciones de la ley de potencias, tanto para a y b , con una validez por un segmento de frecuencias estrecha. Esto representa una solución que asegura la simplicidad y precisión. Los puntos finales de cada segmento se determinaron bajo el criterio de mínimo error cuadrático medio en toda la gama de frecuencias. Los resultados de este procedimiento, tal como se aplica a los valores de a y b obtenidos a partir de la regresión LP_L (Laws y Parsons), a 0°C son:

$$a = G_a f^{E_a} \tag{4.35}$$

Donde

$$\begin{aligned} G_a &= 6.39 \times 10^{-5}, & E_a &= 2.03, & \text{para } f < 2.9 \text{ GHz} \\ G_a &= 4.21 \times 10^{-5}, & E_a &= 2.42, & \text{para } 2.9 \leq f < 54 \text{ GHz} \\ G_a &= 4.09 \times 10^{-2}, & E_a &= 0.699, & \text{para } 54 \leq f < 180 \text{ GHz} \\ G_a &= 3.38, & E_a &= -0.151 & \text{para } 180 \text{ GHz} \leq f \end{aligned}$$

Y la siguiente constante:

$$b = G_b f^{E_b} \tag{4.36}$$

Donde

$$\begin{aligned} G_b &= 0.851, & E_b &= 0.851 & \text{para } f < 8.5 \text{ GHz} \\ G_b &= 1.41, & E_b &= 1.0779, & \text{para } 8.5 \leq f < 25 \text{ GHz} \end{aligned}$$

$$G_b = 2.63, \quad E_b = -0.272, \quad \text{Para } 25 \leq f < 164 \text{ GHz}$$

$$G_b = 0.616, \quad E_b = 0.0126, \quad \text{para } 164\text{GHz} \leq f$$

4.7 Modelo Excell.

EXCELL (Exponential Cell Model) es un modelo físico que describe el proceso de la precipitación mediante una población de células de lluvia, Se ha elaborado mediante el análisis de imágenes de radares meteorológicos en Italia. Las células propuestas en el modelo poseen simetría circular y la intensidad de lluvia decrece de manera exponencial con respecto al valor máximo. La población de células se define por la densidad espacial de células con un determinado radio. Los valores de intensidad máxima se calculan a partir de expresiones empíricas tomando como datos de entrada los valores predichos por la ITU P.837-6,

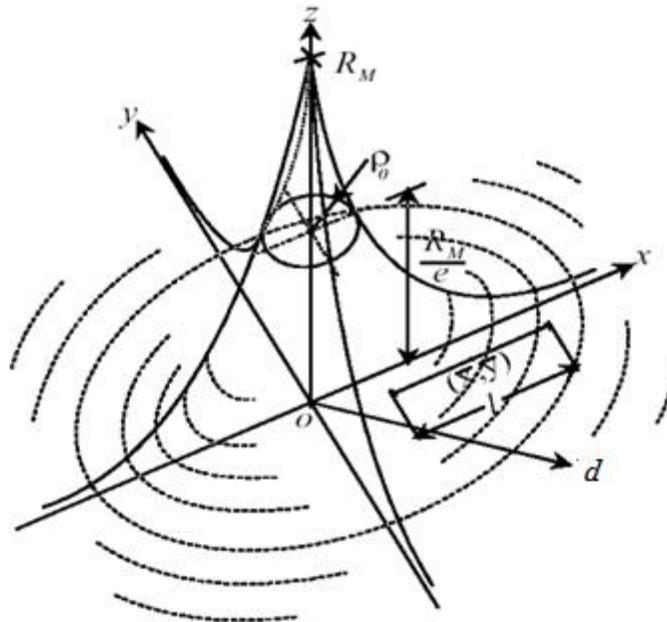


Figura 4.7. Representación esquemática de una célula de lluvia exponencial según el modelo Excell.

El procedimiento para el cálculo de la distribución de atenuación es relativamente complejo. A continuación, se realiza una breve descripción del mismo.

Al considerar células exponenciales, la intensidad de lluvia R a una distancia d desde el centro de la célula viene dada por (Figura 4.7):

$$R = R_M \exp\left(\frac{-\rho}{\rho_0}\right) \quad [mm/h] \quad (4.37)$$

donde R_M es la intensidad de lluvia máxima y ρ_0 es el radio de la célula, es decir, la distancia a la cual la intensidad de lluvia decrece por un factor $1/e$.

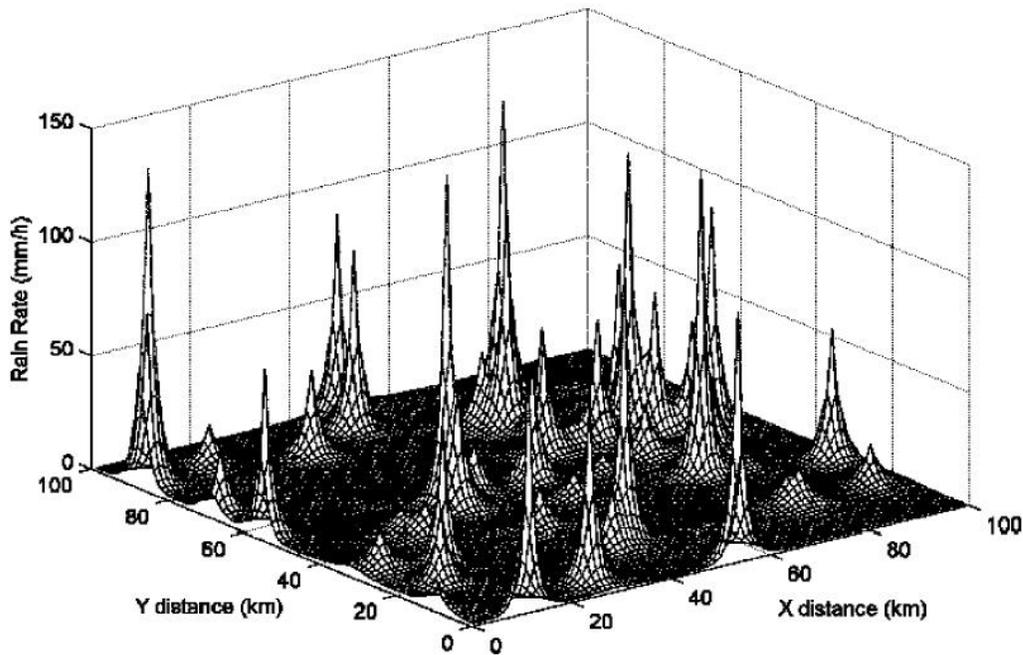


Figura 4.8. Ejemplo de campo de células de lluvia bidimensional obtenido mediante el método Excell.

El modelo se caracteriza por dos parámetros de las células, R_M y ρ_0 , y por la densidad espacial de población de células $N(R_M, \rho_0)$. Puesto que se ha observado que, para un R_M dado, las dimensiones de la célula ρ_0 , se distribuyen exponencialmente, el número de células por kilómetro cuadrado viene dado por:

$$N(\ln R_M, \rho_0) = N_0(\ln R_M) \exp\left(\frac{-\rho_0}{\rho_0}\right) \quad (4.38)$$

Donde $\bar{\rho}_0$ es el radio medio condicionado a que $R_M > 5 \text{ mm/h}$.

$$\bar{\rho}_0 = 1.7 \left[\left(\frac{R_M}{6}\right)^{-10} + \left(\frac{R_M}{6}\right)^{-0.26} \right] \quad R_M > 5 \text{ mm/h} \quad (4.39)$$

La densidad espacial, $N_0(\ln R_M)$, puede derivarse a partir de la distribución acumulada de intensidad de lluvia local mediante la fórmula:

$$N_0(\ln R_M) = -\left(\frac{1}{4}\pi\overline{\rho_0^2}\right)P(R_M)''' \quad (4.40)$$

Donde $P(R_M)'''$ es la tercera derivada de la función distribución acumulada de la intensidad de lluvia $P(R)$ con respecto a $\ln R$, evaluada en $R = R_M$.

Se asume que la atenuación es generada por el movimiento de traslación de las células de lluvia en el trayecto de propagación. Por lo tanto, la atenuación en la célula viene definida por:

$$A_c = kR_E^\alpha L_s \quad [dB] \quad (4.41)$$

donde L_s es la longitud del trayecto inclinado:

$$L_s = \frac{H_0}{\sin \theta} \quad [km] \quad (4.42)$$

y R_E es la intensidad de lluvia equivalente, que tiene en cuenta la distribución del perfil de lluvia cuando el trayecto de propagación atraviesa la celda por diferentes puntos.

Además, hay que sumar un término de atenuación A_p , correspondiente a la lluvia estratiforme de intensidad R_p que suele estar presente entre las células de lluvia de elevada intensidad:

$$\begin{cases} A_p = k \cdot 2^\alpha & p \leq P_p \\ A_p = K \cdot R_p^\alpha & p > P_p \end{cases} \quad (4.43)$$

donde P_p es el porcentaje de tiempo para el que se excede un valor de intensidad de lluvia de mm/h.

4.8 Modelo García-López.

El modelo de García-López de atenuación por lluvia para trayecto inclinado es una extensión del propuesto por el mismo autor para enlaces terrestres. Emplea una distribución completa de intensidades de lluvia para el año medio y coeficientes de ajuste para diversos tipos de clima. La configuración de la geometría del trayecto es similar al modelo de la ITU.

La atenuación se calcula según la siguiente ecuación:

$$A = \frac{kR_p^\alpha L_s}{a' + L_s \frac{b'R + c'L_s + d'}{e}} \quad [dB]. \quad (4.44)$$

Donde L_s (km) es la longitud equivalente de trayecto:

$$L_s = \frac{(H_0 - h_s)}{\sin \theta}. \quad (4.45)$$

Y la altura de lluvia. h_r (km), es:

$$\begin{cases} 4 & 0 < |\varphi| < 36^\circ, \\ 4 - 0.075(|\varphi| - 36^\circ) & |\varphi| \geq 36^\circ. \end{cases} \quad (4.46)$$

Los coeficientes a , b , c y d son constantes que dependen, en general, de la región geográfica y pueden determinarse fácilmente mediante técnicas de regresión basadas en medidas simultáneas de atenuación por lluvia e intensidad de lluvia. El coeficiente e es sólo un factor de escala. Para Europa toman los siguientes valores:

a'	b'	c'	d'	e'
0.53	23.76	-35.76	307	8000

4.9 Modelo Global de Crane.

El modelo global de Crane se basa en el cálculo de la atenuación específica, de igual manera que el modelo ITU, con cierta diferencia en el modo de calcular la distancia efectiva. Eventualmente, al calcular la atenuación como la multiplicación de la atenuación específica por la distancia del enlace se está sumiendo que la atenuación por lluvia es constante en todo el trayecto. De lo propuesto por Crane, la lluvia proviene de fenómenos conectivos y estratiformes². Por lo cual, se pretende encontrar un fórmula -de manera empírica- que se ajuste a las mediciones de la atenuación promedio.

La fórmula de la atenuación propuesta por Crane, en su modelo global, se da por la (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.57) para $\delta R < d < 22.5$ km:

² Estratiformes: Referente a la cubierta de nubes bajas sobre la tierra, de constitución física líquida, color gris y forma de banda ancha paralela al horizonte que puede producir llovizna.

$$A(R, d) = \gamma_R \left(\frac{e^{\mu\alpha d} - 1}{\mu\alpha} + \frac{e^{c\alpha d} e^{c\alpha\delta_R}}{c\alpha} e^{\alpha B} \right). \quad (4.47)$$

Y por la (ecuación 4.58) para $0 < d < \delta R$ km:

$$A(R, d) = \gamma_R \left(\frac{e^{\mu\alpha d} - 1}{\mu\alpha} \right). \quad (4.48)$$

Donde R es la tasa de lluvia en mm/h, d es la distancia del enlace en km y γ_R es la atenuación específica (calculada por recomendación de la ITU):

$$B = \ln(b) = 0.83 - 0.17 \ln(R). \quad (4.49)$$

4.10 Modelo Australiano.

En el 2001, Australia solicitó una variación a la recomendación P.530. Básicamente existen dos modificaciones: la forma de calcular la distancia efectiva y la atenuación A_p a partir de la tasa de lluvia de 0.01%.

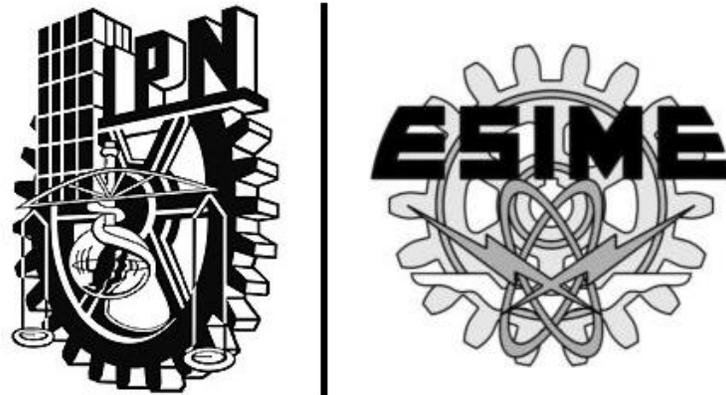
En las ecuaciones (4.60) y (4.61) se presenta la forma de calcular la distancia efectiva:

$$d_0 = 67e^{-0.0111R_{0.01}}, \quad \text{sí } R_{0.01} \leq 100 \text{ mm/h}, \quad (4.50)$$

$$d_0 = 67e^{-1.11}, \quad \text{sí } R_{0.01} > 100 \text{ mm/h}. \quad (4.51)$$

El cálculo de la atenuación para cualquier probabilidad se puede estimar a partir de la atenuación de 0.01%. En la ecuación (4.62), d es la distancia en km del enlace.

$$A_p = kR_{0.01}^\infty (0.12p^{-(0.546+0.043 \log p)}) \frac{d_0}{d_0+d} d. \quad (4.52)$$



CAPÍTULO 5 | DESARROLLO DEL PROYECTO

CAPITULO 5 DESARROLLO DEL PROYECTO

En este capítulo, se lleva a cabo el cálculo de la atenuación por lluvia utilizando principalmente dos diferentes modelos. El modelo CCIR es utilizado como base y es comparado con un modelo empírico con aproximación analítica. El satélite que se está considerando, a manera de ejemplo, para realizar los cálculos es el MEXSAT 3.

A continuación se dan las especificaciones técnicas del satélite seleccionado, el cual cubre las necesidades requeridas y es uno de los más actuales. Uno de los principales puntos para considerar al satélite es que pertenece a la sociedad mexicana.

Tabla 5.1. Especificaciones del MEXSAT III.

DATOS DEL SATÉLITE	
Nombre del satélite	Mexsat Bicentenario (Mexsat 3).
Posición	114° W (114.9°).
Norad	39035.
Número Cospar	2012-075B.
Operador	Secretaría de Comunicaciones y Trasportes.
Fecha de Lanzamiento	19-Diciembre-2012.
Lugar de Lanzamiento	Guiana Space Center.
Vehículo de Lanzamiento	Ariane 5 ECA.
Peso (kg)	2900.
Fabricante	Orbital Sciences Corporation (OSC).
Modelo	GOEStar-2.4 Bus
Orbita	Geo-estacionario.
Tiempo de vida estimado	15 años.
Guías	3673, 3675.
BANDAS	Banda C, Banda Ku.
Detalles	12 transpondedores expandidos activos en banda Ku y 12 transpondedores expandidos activos en banda C para proporcionar el completo Fixed Satellite Services (FSS) de segmentos del sistema satelital MEXSAT para el Gobierno de México.



Figura 5.1. Localización de la estación terrestre en la Sonda de Campeche. El sitio está marcado con la flecha.

Las estaciones terrenas fueron elegidas con la intención de observar los efectos de la atenuación por lluvia en condiciones atmosféricas distintas. Estas estaciones terrenas se encuentran actualmente operando.

La ubicación de las estaciones terrenas se está considerando en dos diferentes localidades de la República Mexicana. Estas localidades están en: el Estado de Campeche (enlace ascendente) y la Ciudad de México (enlace descendente). Las coordenadas de un punto sobre la tierra están determinadas por la longitud (E: Este o W: Oeste) y la latitud (N: Norte o S: Sur). Las coordenadas y la frecuencia de operación de estos dos puntos se muestran en la [Tabla 5.2](#) y en la [Figura 5.1](#) y [Figura 5.2](#), respectivamente.

Tabla 5.2. Coordenadas de las estaciones terrestres.

Estación Golfo – Sonda de Campeche	Estación Maestra – NOC Azcapotzalco México
Latitud = 18°24' N. Longitud = 99°11' W Altura sobre el nivel del mar = 0 Km. $f_c = 14147.88$ Mhz (Banda Ku)	Latitud = 19.28° N Longitud = 99°11' W Altura sobre el el nivel del mar = 2.240 Km. $f_c = 12126.200$ Mhz (Banda Ku)

5.1 Cálculo del Ángulo de Elevación y Acimut.

Para orientar una antena desde la estación terrestre hacia la posición del satélite es necesario calcular primeramente el ángulo de elevación (θ) y el ángulo de acimut (ϕ) para cada localidad. Los principales datos del satélite que se utilizan para los cálculos se muestran a continuación:

Posición Orbital: 114.9° W.

Altitud del satélite sobre el ecuador: $h = 35,786$ km.

Radio promedio de la tierra: $R_c = 6378$ km.

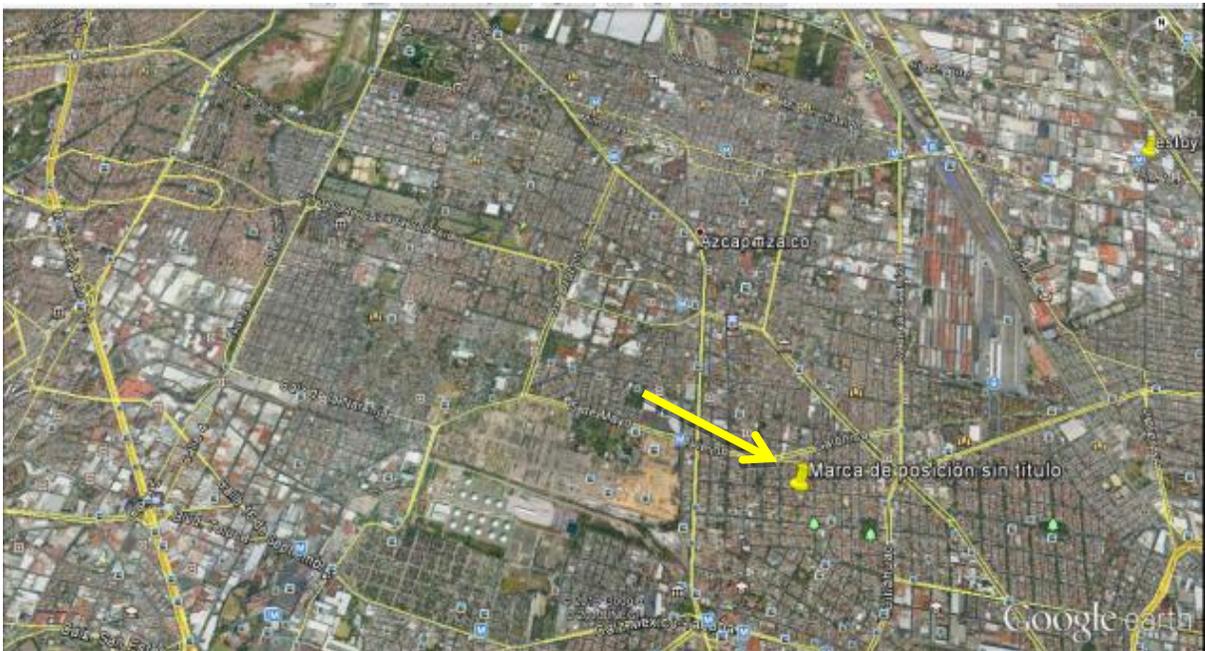


Figura 5.2. Localización de la estación terrestre en la ciudad de México. El sitio está marcado con la flecha amarilla

5.1.1 Ángulo de elevación y acimut para la Sonda de Campeche.

Primeramente, se calcula la diferencia de longitud ΔL . Donde, la longitud de la Sonda de Campeche es 99.11° W y la longitud del punto sub-satelital del MEXSAT 3 es 114.9° W. De aquí se tiene lo siguiente:

$$114.9^\circ\text{W} \quad (\text{Longitud del Mexsat 3})$$

$$\frac{-99.11^{\circ}W}{\Delta L = 15^{\circ}43'} \quad \begin{array}{l} \text{(Longitud de la Sonda de Campeche)} \\ \text{(Diferencia de longitud)} \end{array}$$

Para el ángulo de elevación se tiene lo siguiente:

$\theta = \text{ángulo de elevación}$

$$\theta = \text{angtang} \left\{ \frac{\cos(l) \cos(\Delta L) - \frac{R_c}{h}}{\text{sen}[\text{angcos}(\cos(l)\cos(\Delta L))]} \right\}$$

$$\theta = \text{angtang} \left\{ \frac{\cos(18^{\circ}24') \cos(15^{\circ}43') - 0.1782}{\text{sen}[\text{angcos}(\cos(18^{\circ}24')\cos(15^{\circ}43'))]} \right\}$$

$$\theta = \text{arctang} \left(\frac{0.9134 - 0.1782}{\text{sen}(24.0204)} \right)$$

$$\theta = \text{arctang} \left(\frac{0.7352}{0.4070} \right)$$

$$\theta = 61.02^{\circ}$$

Para el cálculo del ángulo de acimut se tiene:

$\phi' = \text{Ángulo de Azimut}$

$$\phi' = \text{arctan} \left[\frac{\text{sen}(\Delta L)}{\text{sen}(l)\cos(\Delta L)} \right] = \text{arctang} \left[\frac{\tan(\Delta L)}{\text{sen}(l)} \right]$$

$$\phi' = \text{arctang} \left[\frac{\tan(15^{\circ}43')}{\text{sen}(18^{\circ}24')} \right]$$

$$\phi' = \text{arctang}[0.8915]$$

$$\phi' = 41.7170^{\circ}$$

$$\Delta L = 15^{\circ}43'$$

$$\phi = 180^{\circ} - \phi' = 180^{\circ} - 41.7170^{\circ} = 138.2829^{\circ}$$

Otra forma de obtener los ángulos de elevación y de acimut es por el método de curvas, de esta manera se comprobaron y compararon los valores antes calculados por fórmula matemática.

- 195° W → Longitud del Satélite.
- 99°11' → Longitud de la Estación Terrena.
- 18°24' → Latitud de la Estación Terrena.

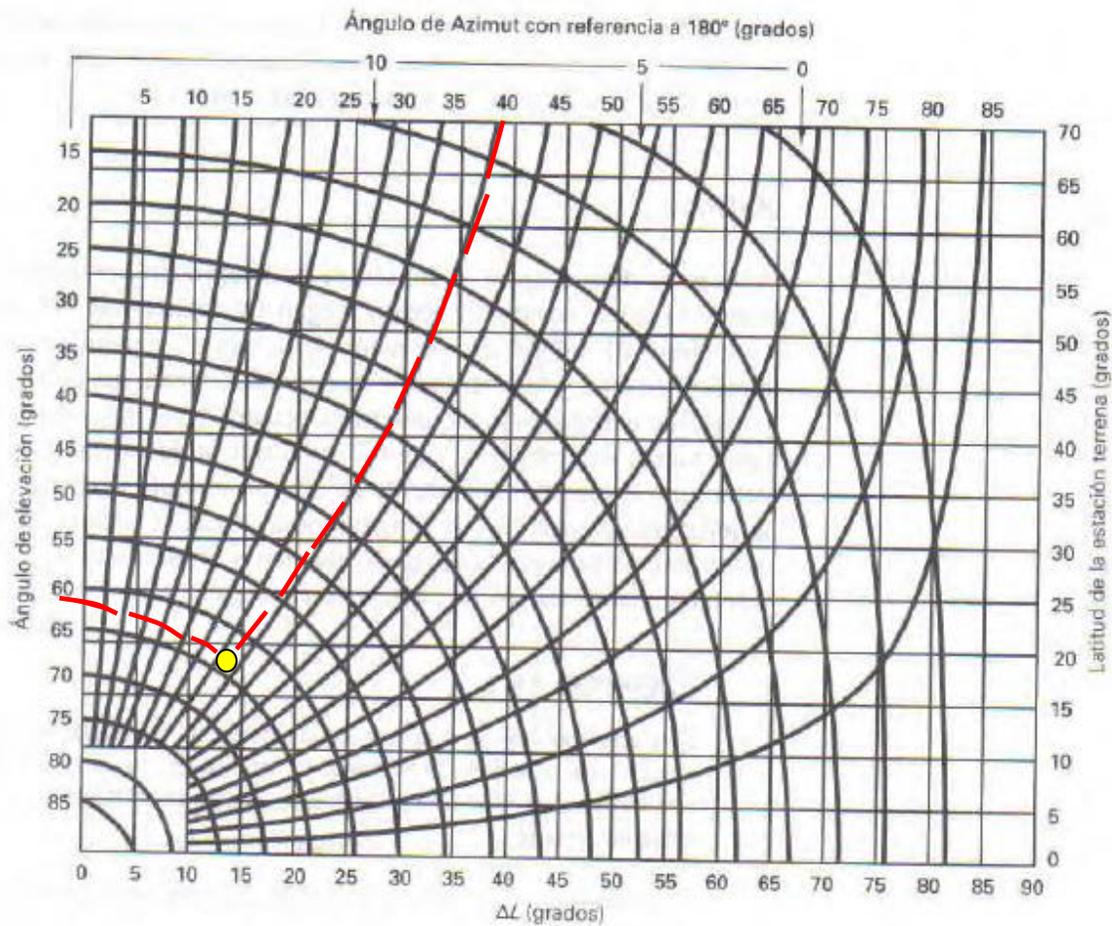
Primero se determina la diferencia entre la longitud del satélite y la estación terrena

$$\Delta L = 114.9 - 99.11 = 15.79$$

Se localiza la intersección ΔL y la latitud de la estación terrena en la gráfica.

$$\Delta L = 15.79^\circ$$

18°24' → Latitud de la Estación Terrena.



Ángulo de Elevación= 61°

Ángulo de Acimut= 41.7°

Figura 5.3. Calculo del ángulo de elevación y acimut mediante curvas para el enlace ascendente.

El ángulo de acimut real ϕ que determina la orientación de la antena hacia el satélite se calcula con la relación que se muestra en la [Figura 5.4](#). Este valor depende del cuadrante en donde se ubica la estación terrena.

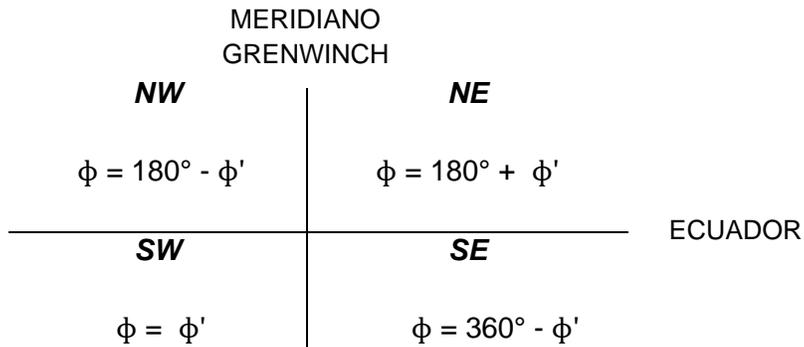


Figura 5.4. La relación entre el ángulo de acimut real ϕ y el ángulo de acimut parcial ϕ' dependen del cuadrante en donde se ubica la estación terrena.

Las coordenadas de la estación terrena es latitud 18.24°N y longitud es 99.11°W . De estos datos se establece que la Sonda de Campeche se ubica en el cuadrante Noroeste. Por lo tanto, el ángulo de acimut real está definido de la siguiente manera:

$$\phi = 180^\circ - \phi' = 180^\circ - 41.7^\circ = \mathbf{138.3^\circ}$$

5.1.2 Ángulo de elevación y acimut para la Ciudad de México.

Nuevamente, se calcula la diferencia de longitud ΔL . Donde, la longitud de la ciudad de México es 99.11°W y la longitud del punto sub-satelital del MEXSAT 3 es 114.9°W . De aquí, se tiene para el enlace descendente lo siguiente:

114.9°W	(Longitud del Mexsat 3)
- 99.11°W	(Longitud de la Sonda de Campeche)
$\Delta L = \mathbf{15.79^\circ}$	(Diferencia de longitud)

Para el ángulo de elevación se tiene lo siguiente:

$\theta = \text{ángulo de elevación}$

$$\theta = \text{angtang} \left\{ \frac{\cos(l) \cos(\Delta L) - \frac{R_c}{h}}{\text{sen}[\text{angcos}(\cos(l) \cos(\Delta L))]} \right\}$$

$$\theta = \text{angtang} \left\{ \frac{\cos(19^\circ 28') \cos(15^\circ 43') - 0.1782}{\text{sen}[\text{angcos}(\cos(19^\circ 28') \cos(15^\circ 43'))]} \right\}$$

$$\theta = \text{arctang} \left(\frac{0.9075(0.9626) - 0.1782}{\text{sen}(24.8261)} \right)$$

$$\theta = \text{arctang} \left(\frac{0.6953}{0.4198} \right)$$

$$\theta = \mathbf{60.0734^\circ}$$

Para el cálculo del ángulo de acimut se tiene:

$$\phi' = \text{Ángulo de Acimut}$$

$$\phi' = \text{arctan} \left[\frac{\text{sen}(\Delta L)}{\text{sen}(l) \cos(\Delta L)} \right] = \text{arctang} \left[\frac{\tan(\Delta L)}{\text{sen}(l)} \right]$$

$$\phi' = \text{arctang} \left[\frac{\tan(15^\circ 43')}{\text{sen}(19^\circ 28')} \right]$$

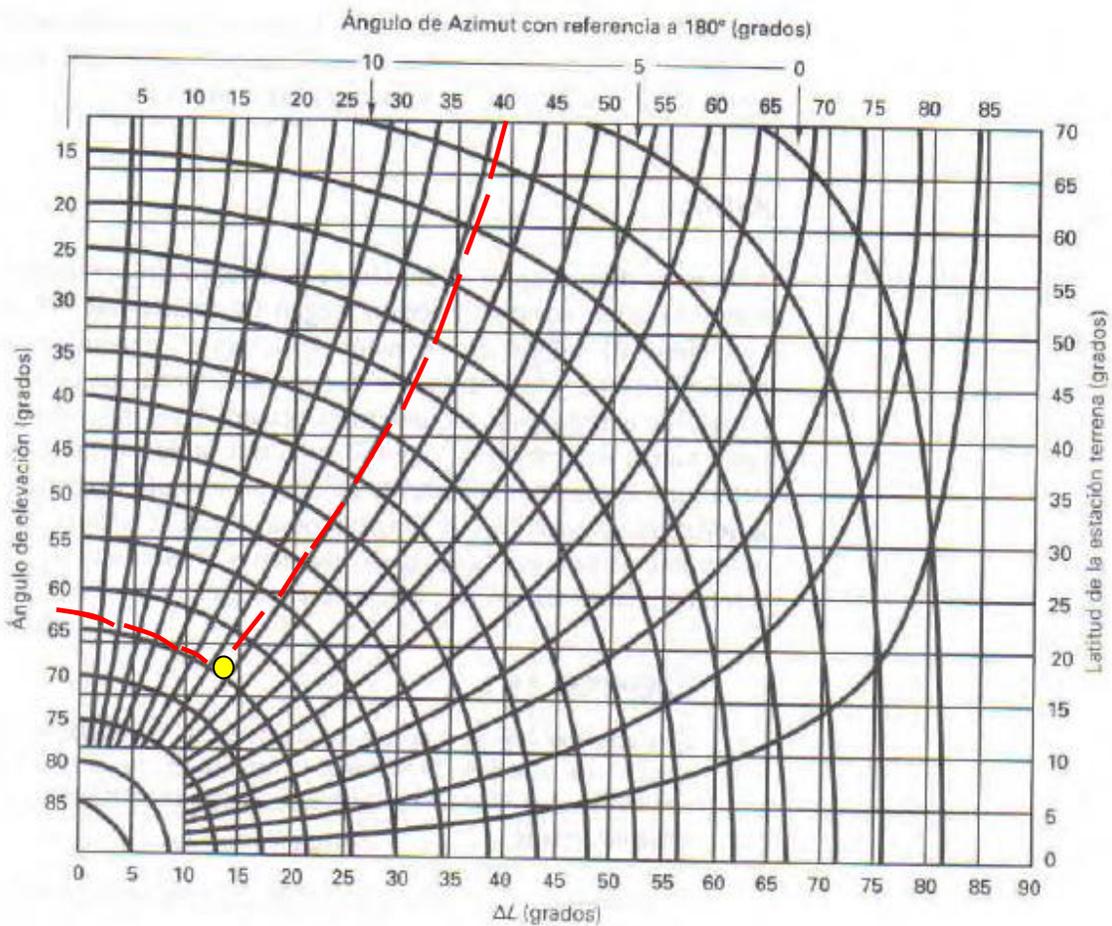
$$\phi' = \text{arctang}[0.8443]$$

$$\phi' = \mathbf{40.1775^\circ}$$

$$\Delta L = 15^\circ 43'$$

$$\phi = 180^\circ - \phi' = 180^\circ - 41.7170^\circ = \mathbf{139.8225^\circ}$$

19°28' → Latitud de la Estación Terrena.



Ángulo de Elevación= 60.6°

Ángulo de Acimut= 40.5°

Figura 5.5. Cálculo del ángulo de elevación y acimut mediante curvas para el enlace descendente.

Cálculo de ángulo de elevación y de ángulo de acimut por curvas.

114.9°W → Longitud del Satélite.

99°11' → Longitud de la Estación Terrena.

19°28' → Latitud de la Estación Terrena.

Primero se determina la diferencia entre la longitud del satélite y la estación terrena.

$$\Delta L = 114.9 - 99.11 = 15.79$$

Se localiza la intersección ΔL y la latitud de la estación terrena en la gráfica.

$$\Delta L = 15.79^\circ$$

Las coordenadas de la estación terrena es latitud 19.28°N y longitud es 99.11°W. De estos datos se establece que la ciudad de México se ubica en el hemisferio Noroeste. Por lo tanto, el ángulo de acimut real está definido de la siguiente manera:

$$\phi = 180^\circ - \phi' = 180^\circ - 40.578^\circ = 139.4^\circ.$$

5.2 Cálculo de la Atenuación por Lluvia.

En esta parte del trabajo se llevan a cabo los cálculos de atenuación por lluvia tanto para el enlace ascendente (desde la Sonda de Campeche al MEXSAT 3) así como para el enlace descendente (desde el MEXSAT 3 a la ciudad de México). En el desarrollo de los cálculos se utilizó el modelo CCIR aplicado en la banda Ku asignada para el satélite MEXSAT 3.

5.2.1 Enlace ascendente (Sonda de Campeche a MEXSAT 3).

El cálculo de A_{RAINS} procede de los siguientes pasos:

Paso 1) Determinar la intensidad de precipitación pluvial $R_{0.01}$ excedida para un porcentaje de tiempo de 0.01% observado durante un año en promedio, donde la estación local está localizada según la [Figura 5.6](#) en la zona pluvial N, la cual le corresponde la siguiente tasa de lluvia (obtenida de la [Tabla 5.3](#)):

$$R_{0.01} = 95 \text{ mm/h.}$$

Paso 2) Cálculo de la altura de la lluvia h_r (Km):

$$h_r = 3 + (0.038 \times \text{latitud}) \quad \text{si } 0 < \text{latitud} < 36^\circ$$

$$\text{Latitud de la estación: } 18^\circ 24'$$

$$h_r(\text{km}) = 3 + (0.038 \times 18^\circ 24') = 3.5152$$

Tabla 5.3. Datos estadísticos por región para el mapa de la Figura 5.6.

Porcentaje del tiempo excedido en un año (%) y equivalencia en minutos acumulados	Intensidad de lluvia excedida (mm/h)														
	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	
0.1	526	2	3	5	8	6	8	12	10	20	12	15	22	35	65
0.01	53	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145
0.001	5.3	22	32	42	42	70	78	65	83	55	100	150	120	180	250

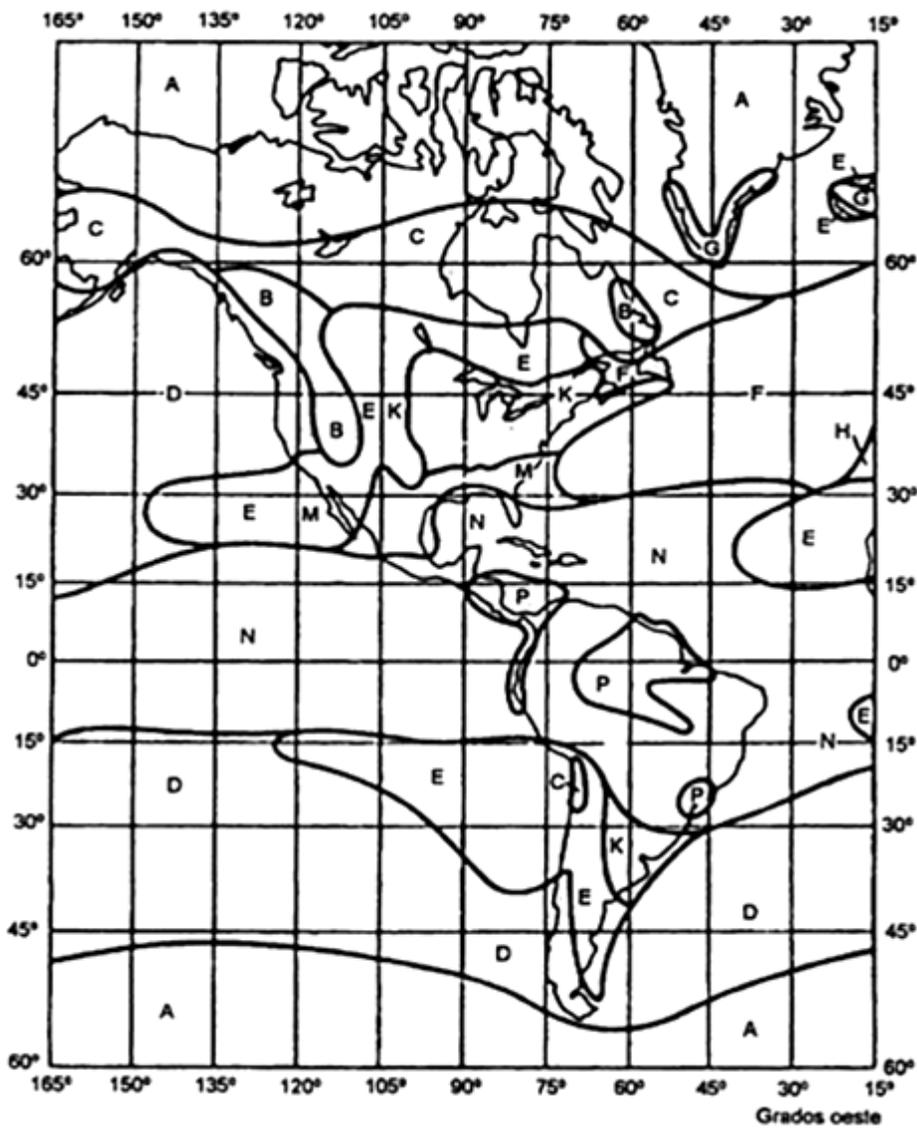


Figura 5.6. Regiones de América designadas con letras por la CCIR según la intensidad de lluvia que es excedida.

Tabla 5.4 Coeficientes de atenuación específica para polarización horizontal (subíndice h) y polarización vertical (subíndice v).

Frecuencia (GHz)	k_h	k_v	a_h	a_v
1	0.0000387	0.0000352	0.912	0.88
1<f<2	$(3.870 \times 10^{-5}) * f_{GHz}^{1.9925}$	$(3.520 \times 10^{-5}) f_{GHz}^{1.9710}$	$0.1694 \log f_{GHz} + 0.9120$	$0.1428 \log f_{GHz} + 0.8800$
2	0.000154	0.000138	0.963	0.923
2<f<4	$(3.649 \times 10^{-5}) f_{GHz}^{2.0775}$	$(3.222 \times 10^{-5}) f_{GHz}^{2.0985}$	$0.5249 \log f_{GHz} + 0.8005$	$0.5049 \log f_{GHz} + 0.7710$
4	0.00065	0.000591	1.121	1.075
4<f<6	$(2.199 \times 10^{-5}) f_{GHz}^{2.4426}$	$(2.187 \times 10^{-5}) f_{GHz}^{2.3780}$	$1.0619 \log f_{GHz} + 0.4816$	$1.0790 \log f_{GHz} + 0.4254$
6	0.00175	0.00155	1.308	1.265
6<f<7	$(3.202 \times 10^{-6}) f_{GHz}^{3.5181}$	$(3.041 \times 10^{-6}) f_{GHz}^{3.4791}$	$0.3585 \log f_{GHz} + 1.0290$	$0.7021 \log f_{GHz} + 0.7187$
7	0.00301	0.00265	1.332	1.312
7<f<8	$(7.542 \times 10^{-6}) f_{GHz}^{3.0778}$	$(7.890 \times 10^{-6}) f_{GHz}^{2.9892}$	$-0.0862 \log f_{GHz} + 1.4049$	$-0.0347 \log f_{GHz} + 1.3411$
8	0.00454	0.00395	1.327	1.31
8<f<10	$(2.636 \times 10^{-6}) f_{GHz}^{3.5834}$	$(2.102 \times 10^{-6}) f_{GHz}^{3.6253}$	$-0.5263 \log f_{GHz} + 1.8023$	$-0.4747 \log f_{GHz} + 1.7387$
10	0.0101	0.00887	1.276	1.264
10<f<12	$(3.929 \times 10^{-6}) f_{GHz}^{3.4078}$	$(2.785 \times 10^{-6}) f_{GHz}^{3.5032}$	$-0.7451 \log f_{GHz} + 2.0211$	$-0.8083 \log f_{GHz} + 2.0723$
12	0.0188	0.0168	1.217	1.2
12<f<15	$(1.094 \times 10^{-5}) f_{GHz}^{2.9977}$	$(7.718 \times 10^{-6}) f_{GHz}^{3.0929}$	$-0.6501 \log f_{GHz} + 1.9186$	$-0.7430 \log f_{GHz} + 2.0018$
15	0.0367	0.0335	1.154	1.128
15<f<20	$(4.339 \times 10^{-5}) f_{GHz}^{2.2890}$	$(3.674 \times 10^{-5}) f_{GHz}^{2.5167}$	$-0.4402 \log f_{GHz} + 1.6717$	$-0.5042 \log f_{GHz} + 0.17210$
20	0.0751	0.0691	1.099	1.065
20<f<25	$(8.951 \times 10^{-5}) f_{GHz}^{2.2473}$	$(3.674 \times 10^{-5}) f_{GHz}^{2.2041}$	$-0.3921 \log f_{GHz} + 1.6092$	$-0.3612 \log f_{GHz} + 1.5349$
25	0.124	0.1113	1.061	1.03
25<f<30	$(8.779 \times 10^{-5}) f_{GHz}^{2.2533}$	$(1.143 \times 10^{-4}) f_{GHz}^{2.2414}$	$-0.5052 \log f_{GHz} + 1.7672$	$-0.3789 \log f_{GHz} + 1.5596$
30	0.187	0.167	1.021	1
30<f<35	$(1.009 \times 10^{-4}) f_{GHz}^{2.2124}$	$(1.075 \times 10^{-4}) f_{GHz}^{2.1605}$	$-0.6274 \log f_{GHz} + 1.9477$	$-0.5527 \log f_{GHz} + 1.8164$
35	0.263	0.233	0.979	0.963
35<f<40	$(1.304 \times 10^{-4}) f_{GHz}^{2.1402}$	$(1.163 \times 10^{-4}) f_{GHz}^{2.1383}$	$-0.6898 \log f_{GHz} + 2.0440$	$-0.5863 \log f_{GHz} + 1.8683$
40	0.35	0.31	0.939	0.929

Paso 3). El cálculo de la trayectoria de inclinación de la lluvia.

$$L_s = \frac{(h_R - h_S)}{\text{sen}(\theta)} \text{ valido para un ángulo de elevación } \theta > 5^\circ.$$

$h_S = \text{Elevación de la estación terrena sobre el nivel del mar (km)}$.

$$h_S = 0 \text{ km}$$

$$\text{Mexsat3} = 114.9^\circ$$

$$\Delta L = 114.9^\circ - 99^\circ 11' = 15^\circ 43'$$

$$\theta = \text{angtang} \left\{ \frac{\cos(18^\circ 24') \cos(15^\circ 43') - 0.1782}{\text{sen}[\text{angcos}(\cos(18^\circ 24') \cos(15^\circ 43'))]} \right\}$$

$$\theta = \text{arctang} \left(\frac{0.9134 - 0.1782}{\text{sen}(24.0204)} \right)$$

$$\theta = \text{arctang} \left(\frac{0.7352}{0.4070} \right)$$

$$\theta = \mathbf{61.02^\circ}$$

Por lo tanto

$$L_s = \frac{(h_R - h_S)}{\text{sen}(\theta)} = \frac{(3.5152 - 0)}{\text{sen}(61.0278^\circ)}$$

$$L_s = \mathbf{4.0180 \text{ km}}$$

Paso 4) Cálculo de $r_{0.01}$ del factor de reducción para 0.01% de tiempo, que tomar en cuenta la falta de homogeneidad de la lluvia.

$$r_{0.01} = 1 / \left(1 + \left(\frac{L_s}{L_0} \right) \cos E \right)$$

Donde:

$$L_0(\text{km}) = 35e^{-0.015R_{0.01}}$$

$$L_0(\text{km}) = 35e^{-0.015(95)}$$

$$L_0 = 8.4177 \text{ km}$$

$$r_{0.01} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{4.0180}{8.4177} \right) \cos(61.0278^\circ) \right]}$$

$$r_{0.01} = 0.8122$$

Paso 5) Cálculo de L_E :

$$L_E = L_S r_{0.01} \text{ (Km)}$$

$$L_E = L_S r_{0.01} = 4.0180 \text{ km}(0.8122) = 3.2634 \text{ km}$$

Paso 6) Determinación γ_R ya sea desde el nomograma como una función de $R_{0.01}$ y frecuencia (para polarización circular tomar el valor principal de la atenuación obtenida para cada polarización lineal) ó de:

$$\gamma_R = k(R_{0.01})^\alpha \left(\frac{dB}{Km} \right).$$

Donde la frecuencia depende de los coeficientes K y α que son dados por:

$$K = \frac{[K_H + K_V + (K_H - K_V)\cos^2 E \cos 2\tau]}{2}$$

$$\alpha = [K_{H\alpha H} + K_{V\alpha V} + (K_{H\alpha H} - K_{V\alpha V})\cos^2 \cos 2\tau]/2K$$

$$k_h = (1.094 \times 10^{-5})(14.147)^{2.9977} = 0.03078$$

$$k_v = (7.718 \times 10^{-6})(14.147)^{3.0929} = 0.02795$$

$$\alpha_H = -0.6501 \log[14.14] + 1.9186 = 1.1706$$

$$\alpha_v = -0.7430 \log[14.14] + 2.0018 = 1.1470$$

$$K = \frac{[0.03078 + 0.02795 + (0.03078 - 0.02795)\cos^2(61.0278)\cos 0]}{2} = 0.0297$$

$$\alpha = \frac{[0.03603 + 0.032 + (0.03603 - 0.032)\cos^2(61.0278)\cos 0]}{2(0.0297)} = 1.1611$$

$$\gamma_R = 0.0297(95)^{1.1611} = 5.8776 \left(\frac{dB}{km} \right)$$

Y $K_H, K_V, \alpha_H, \alpha_V$, son dados: θ es el ángulo de elevación y τ es el ángulo de inclinación de polarización, relativo al plano horizontal de la estación terrena ($\tau = 45^\circ$ para polarización circular). El segundo método es más exacto, pero requiere más esfuerzo computacional. Los valores han sido probados y encontrados para frecuencias superiores a los 40GHz.

Paso 7) El valor de la atenuación debido al excedente de lluvia de 0.01% en un promedio anual es el siguiente:

$$A_{RAIN}(p = 0.01) = \gamma_R L_E \text{ (dB)}$$

$$A_{RAIN}(p = 0.01) = 5.877(3.2634) \text{ (dB)}$$

$$A_{RAIN}(p = 0.01) = 19.1817 \text{ dB}$$

5.2.2 Enlace descendente (MEXSAT 3 a Ciudad de México).

La determinación de A_{RAINS} procede de varios pasos:

Paso 1) Determinar la intensidad de precipitación pluvial $R_{0.01}$ excedida para un porcentaje de tiempo de 0.01% observado durante un año en promedio, donde la estación descendente está localizada según la [Figura 5.6](#) en la zona pluvial M, la cual le corresponde la siguiente tasa de lluvia (obtenida de la [Tabla 5.3](#)):

$$R_{0.01} = 63 \text{ mm/h.}$$

Paso 2) Cálculo de la altura de la lluvia h_r (Km):

$$h_r = 3 + (0.038 \times \text{latitud}) \quad \text{si } 0 < \text{latitud} < 36^\circ$$

$$\text{Latitud de la estación: } 19^\circ 28'$$

$$h_r(\text{km}) = 3 + (0.028 \times 19^\circ 28') = 3.5450 \text{ km}$$

Paso 3) El cálculo de la trayectoria de inclinación de la lluvia.

$$L_s = \frac{(h_r - h_s)}{\text{sen}(\theta)} \quad \text{valido para un ángulo de elevación } \theta > 5^\circ$$

$$h_s = \text{Elevación de la estación terrena sobre el nivel del mar (km)}$$

$$h_s = 2240 \text{ metros}$$

$$\text{Mexsat3} = 114.9^\circ$$

$$\Delta L = 114.9^\circ - 99^\circ 11' = 15^\circ 43'$$

$$\theta = \text{arctang} \left\{ \frac{\cos(19^\circ 28') \cos(15^\circ 43') - 0.1782}{\text{sen}[\text{angcos}(\cos(19^\circ 28') \cos(15^\circ 43'))]} \right\}$$

$$\theta = \text{arctang} \left(\frac{0.9075(0.9626) - 0.1782}{\text{sen}(24.8261)} \right)$$

$$\theta = \text{arctang} \left(\frac{0.6953}{0.4198} \right)$$

$$\theta = 60.0734^\circ$$

Por lo tanto

$$L_s = \frac{(h_R - h_S)}{\text{sen}(\theta)} = \frac{(3.5450 - 2.240 \text{ km})}{\text{sen}(60.0734^\circ)}$$

$$L_s = 1.5057 \text{ km}$$

Paso 4) Cálculo de $r_{0.01}$ del factor de reducción para 0.01% de tiempo, que tomar en cuenta la falta de homogeneidad de la lluvia.

$$r_{0.01} = 1 / \left(1 + \left(\frac{L_s}{L_0} \right) \cos E \right)$$

Donde:

$$L_0(\text{km}) = 35e^{-0.015R_{0.01}}$$

$$L_0(\text{km}) = 35e^{-0.015(63)}$$

$$L_0 = 13.6037 \text{ km}$$

$$r_{0.01} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{41.5057}{13.6037} \right) \cos(60.0734^\circ) \right]}$$

$$r_{0.01} = 0.9477$$

Paso 5) Cálculo de L_E :

$$L_E = L_s r_{0.01} \text{ (Km)}$$

$$L_E = L_s r_{0.01} = 1.5057 \text{ km}(0.9477) = 1.4269 \text{ km} .$$

Paso 6) Determinación γ_R ya sea desde el nomograma como una función de $R_{0.01}$ y frecuencia (para polarización circular tomar el valor principal de la atenuación obtenida para cada polarización lineal) ó de:

$$\gamma_R = k(R_{0.01})^\alpha \left(\frac{dB}{Km} \right)$$

Donde frecuencia depende de los coeficientes K y α que son dados por:

$$K = \frac{[K_H + K_V + (K_H - K_V)\cos^2 E \cos 2\tau]}{2}$$

$$k_h = (1.094 \times 10^{-5})(14.147)^{2.9977} = 0.0188$$

$$k_v = (7.718 \times 10^{-6})(14.147)^{3.0929} = 0.0169$$

$$\alpha_H = -0.6501 \log[14.14] + 1.9186 = 1.2170$$

$$\alpha_v = -0.7430 \log[14.14] + 2.0018 = 1.2$$

$$K = \frac{[0.03078 + 0.02795 + (0.03078 - 0.02795)\cos^2(61.0278)\cos 0]}{2} = 0.0176$$

$$\alpha = \frac{[0.03603 + 0.032 + (0.03603 - 0.032)\cos^2(61.0278)\cos 0]}{2(0.0297)} = 1.2068$$

$$\gamma_R = 0.0176(63)^{1.2068} = 2.6119 \left(\frac{dB}{km} \right)$$

Y $K_H, K_V, \alpha_H, \alpha_V$, son dados: θ es el ángulo de elevación y τ es el ángulo de inclinación de polarización, relativo al plano horizontal de la estación terrena ($\tau = 45^\circ$ para polarización circular). El segundo método es más exacto, pero requiere más esfuerzo computacional. Los valores han sido probados y encontrados para frecuencias superiores a los 40GHz.

Paso 7) El valor de la atenuación debido al excedente de lluvia de 0.01% en un promedio anual es el siguiente:

$$A_{RAIN}(p = 0.01) = \gamma_R L_E \text{ (dB)}$$

$$A_{RAIN}(p = 0.01) = 2.6119(1.4269) \text{ (dB)}$$

$$A_{RAIN}(p = 0.01) = 3.7269 \text{ dB}$$

5.3 Comparación entre el Modelo CCIR y el Modelo Empírico.

El siguiente paso que realizamos es comparar los valores de atenuación por lluvia específica que proporciona el modelo CCIR con un modelo empírico más sencillo con aproximación analítica. Este último modelo es más sencillo aunque menos exacto.

Para cada modelo se ha desarrollado un programa en Matlab para obtener algunas gráficas de atenuación por lluvia específica en función de la frecuencia. Cada gráfica está formado por un juego de curvas que describe la atenuación específica para cuatro diferentes valores de la tasa de lluvia excedida a un porcentaje de tiempo de 0.01%.

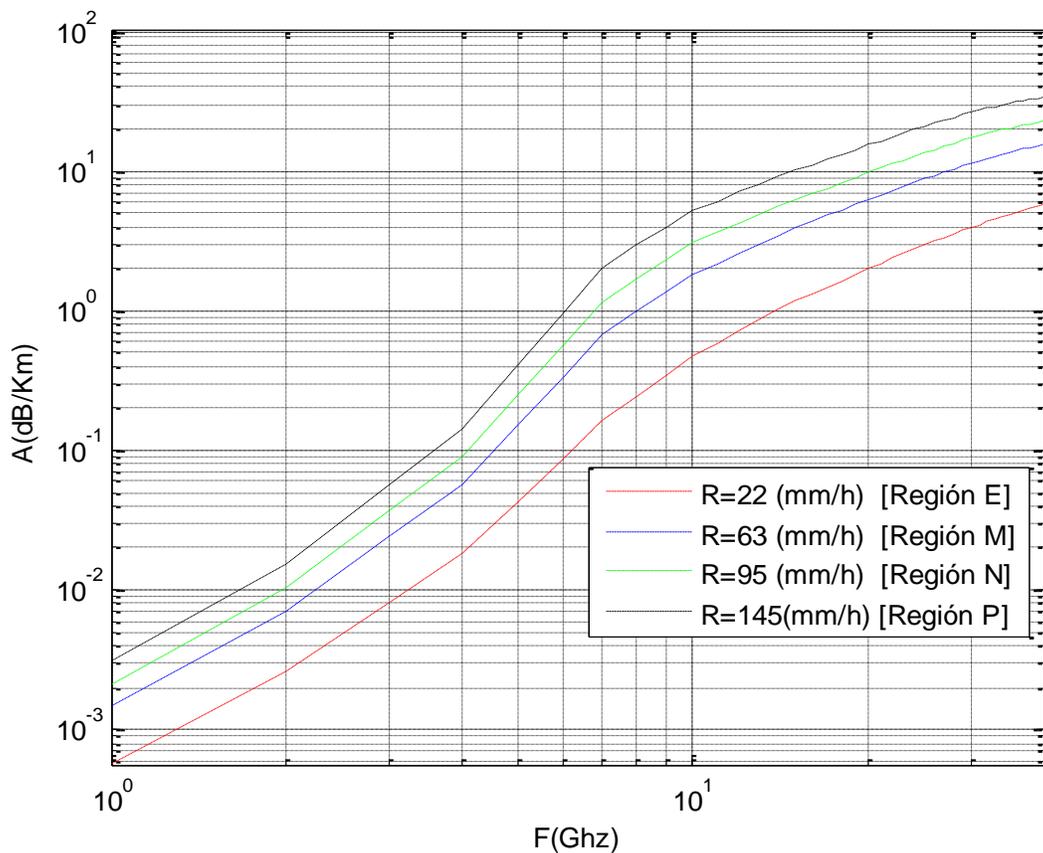


Figura 5.7. Curvas de atenuación específica α [dB/Km], obtenidos con el modelo CCIR para diferentes tasas de lluvia en cuatro diferentes zonas.

Estas tasas de lluvia están definidas para cuatro diferentes zonas. Estas tasas de lluvia $R_{0.01}$ son para: la zona E, la zona M, la zona N y la zona P. En la [Figura 5.6](#) se observa que estas zonas abarcan por completo el territorio de la República Mexicana y en gran parte del territorio de Centroamérica, Sudamérica y de los Estados Unidos.

En la **Figura 5.7** se muestran las curvas que representan la atenuación por lluvia específica α [dB/Km] en función de la frecuencia de transmisión obtenidos con el modelo CCIR. Los valores de la atenuación y de la frecuencia están en escala logarítmica. Como se indica en la **Figura 5.7** y en la **Tabla 5.3** los valores que se utilizaron en los cálculos de la tasa de lluvia en cada zona son: $R_{0.01} = 22$ mm/h para la zona E, $R_{0.01} = 63$ mm/h para la zona M, $R_{0.01} = 95$ mm/h para la zona N y $R_{0.01} = 145$ mm/h para la zona P.

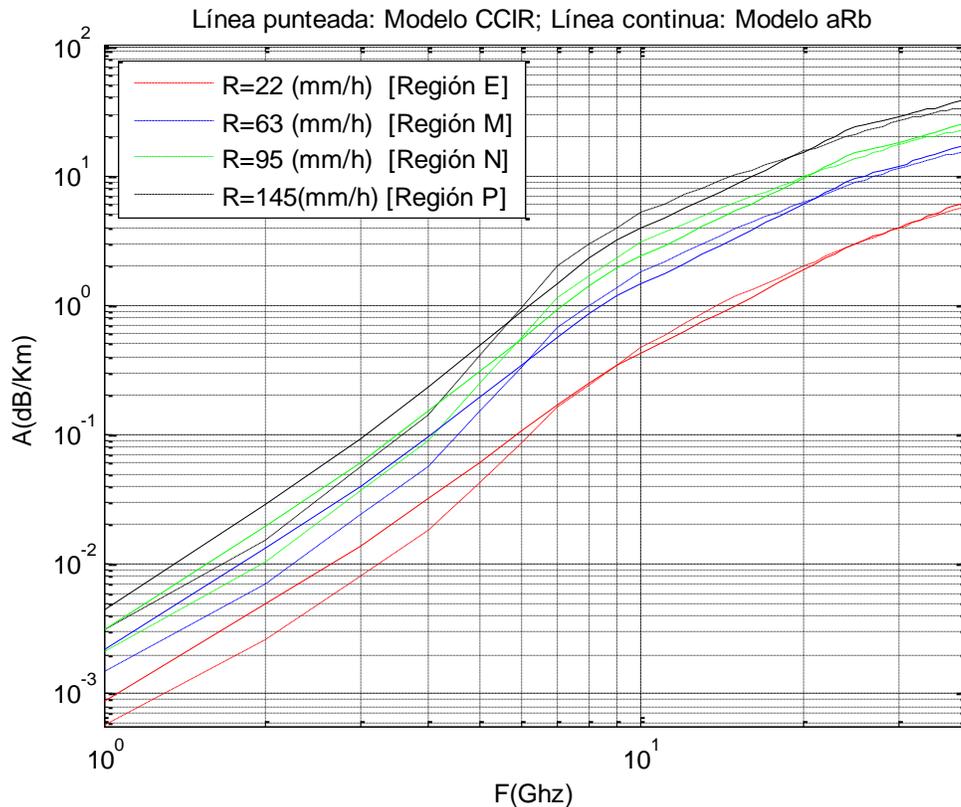


Figura 5.8. Curvas de atenuación específica α [dB/Km], usando el modelo CCIR y el modelo empírico aproximado.

En la **Figura 5.7** se observa que en el intervalo de frecuencias que van de 1 a 40 GHz la atenuación por lluvia específica α [dB/Km] tiende a aumentar. Por otra parte, cuando la tasa de lluvia R es mayor, la atenuación por lluvia específica α [dB/Km] también tiende a ser mayor. Este tipo de curvas son muy importantes para estimar de una manera rápida el valor de la atenuación por lluvia excedida en un porcentaje de tiempo de 0.01% en los enlaces satelitales en diferentes zonas de la superficie terrestre. Ya que con estos valores únicamente resta conocer la longitud efectiva de la trayectoria de la onda L_E que atraviesa a la lluvia para una determinada estación terrena hacia un determinado satélite.

Por otra parte, en la [Figura 5.8](#) se comparan los valores de la atenuación por lluvia específica obtenidos con el modelo CCIR y el modelo aproximado. El modelo empírico es mucho más sencillo pero presenta mayor error con respecto al modelo CCIR, principalmente a frecuencias menores a 200 GHz. Los resultados del modelo aproximado se muestran en líneas punteadas. El modelo empírico puede servir para obtener una estimación rápida de la atenuación por lluvia.

5.4 Cartas de Diseño para Atenuación por Lluvia.

Por último, en este trabajo se presenta una serie de gráficas que puede servir como herramienta de diseño para estimar de una manera rápida la atenuación por lluvia en un enlace satelital cuando los parámetros necesarios para su cálculo varían. Los parámetros que se consideran son por ejemplo: la frecuencia, la tasa de lluvia, la longitud efectiva y el porcentaje de tiempo de la lluvia. Estas gráficas son válidas principalmente para cuatro diferentes zonas, las cuales están asignadas por las siguientes letras: la zona E, la zona M, la zona N y la zona P.

La [Figura 5.9](#) representa la atenuación por lluvia $A_{0.01}$ excedida en un porcentaje de tiempo de 0.01% en función de la longitud efectiva L_E que existe entre la estación terrena y el satélite. Este cálculo se lleva a cabo con la ayuda de la [ecuación \(4.9\)](#):

$$A_{0.01} [\text{dB}] = \alpha L_E.$$

De manera específica los resultados de la [Figura 5.9](#) son particularmente para la frecuencia de operación de 14 GHz en diferentes zonas pluviales. A manera de ejemplo hemos estado trabajando con el MEXSAT 3 y con las frecuencias de 4, 6, 12 y 14 GHz. Esta gráfica es útil cuando se trabaja para una frecuencia fija y la ubicación de las estaciones terrenas se ubica en diferentes zonas. Las gráficas que muestran los resultados para las demás frecuencias se encuentran en el [Anexo C](#).

Con la [Figura 5.9](#) podemos confirmar el resultado de la atenuación por lluvia $A_{0.01}$ excedida en un porcentaje de tiempo de 0.01% que se obtuvo en los cálculos del *enlace de subida*. Por ejemplo, si tomamos en cuenta que la frecuencia de transmisión fue de 14 GHz, que la zona pluvial es la que está designada con la letra N ($R_{0.01} = 95\text{mm/h}$) y que la longitud efectiva es de 3.2506 Km. Al proyectar el valor del eje horizontal en 3.25 (Km) hacia la curva

correspondiente a la zona N encontramos que el valor de la atenuación por lluvia se ubica cerca de 18 dB.

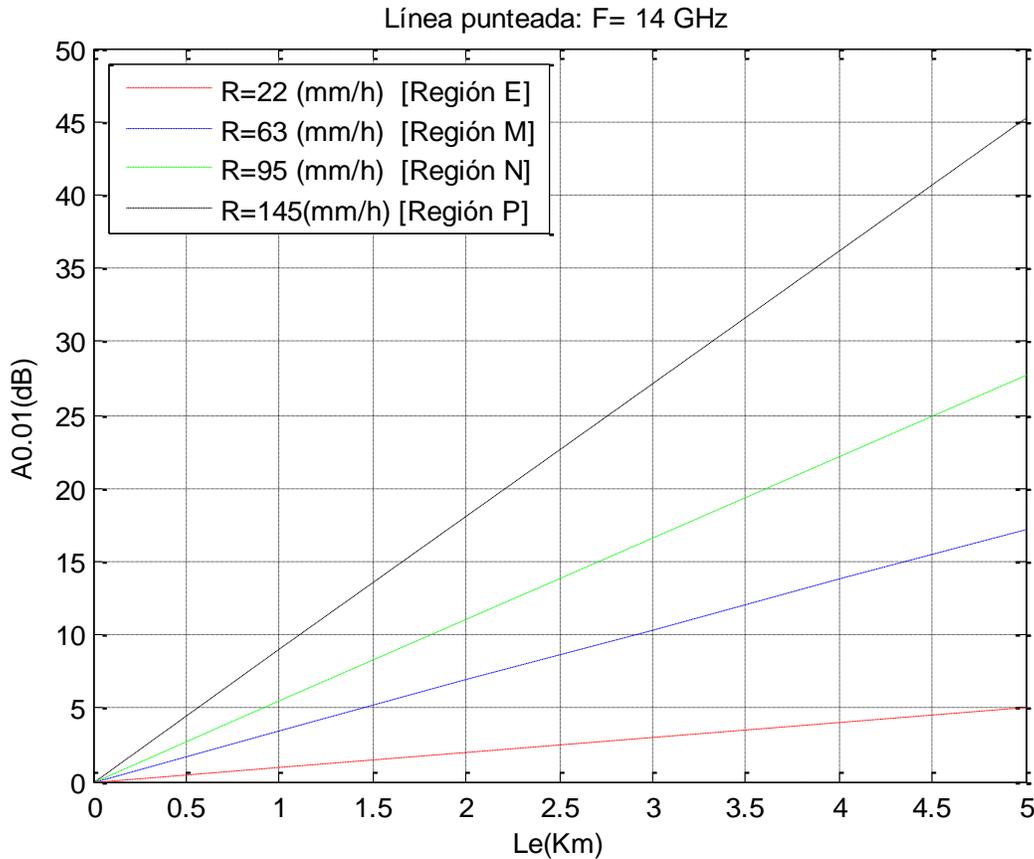


Figura 5.9. Gráfica de atenuación por lluvia $A_{0.01}$ en función de la longitud efectiva en diferentes zonas pluviales, usando una frecuencia de 14 GHz.

La [Figura 5.10](#) también proporciona información sobre la atenuación por lluvia $A_{0.01}$ excedida en un porcentaje de tiempo de 0.01% en función de la longitud efectiva L_E . La principal diferencia con la [Figura 5.9](#) es que en este caso los cálculos están determinados exclusivamente para una de las zonas que se indican en la [Figura 5.6](#). Los resultados de la [Figura 5.10](#) son específicamente para la zona M (donde $R_{0.01} = 63 \text{ mm/h}$) y cada curva está relacionada con las diferentes frecuencias de operación de la banda C y banda Ku del satélite MEXSAT 3. Esta gráfica es muy favorable cuando la estación terrena está en la zona M especificada, tal como sucede con la estación terrena del enlace descendente, y es posible cambiar o realizar los cálculos con diferentes frecuencias de transmisión. Las gráficas que corresponden a otras zonas pluviales se presentan en el [Anexo D](#).

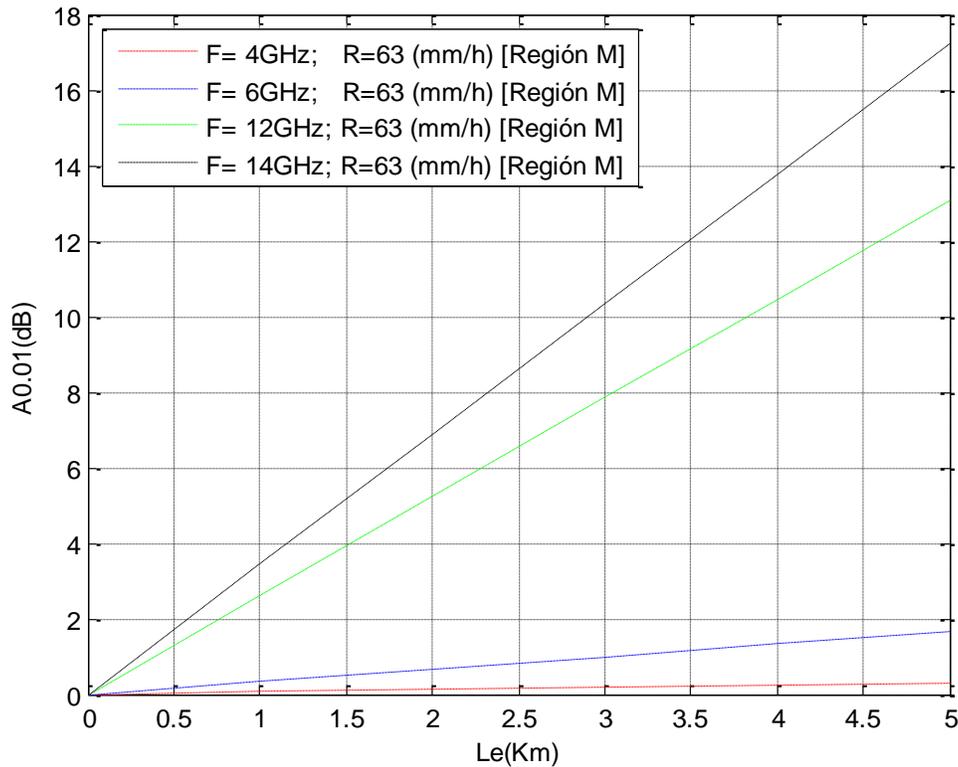


Figura 5.10. Gráfica de atenuación por lluvia $A_{0.01}$ en función de la longitud efectiva L_E para cuatro diferentes frecuencias de operación y específicamente para la zona M (63mm/h).

Con la ayuda de la [Figura 5.10](#) podemos corroborar el cálculo de la atenuación por lluvia $A_{0.01}$ excedida en un porcentaje de tiempo de 0.01% que se obtuvo en los cálculos del *enlace descendente*. Para el enlace descendente se consideraron los siguientes datos: la zona pluvial está determinada por la zona M ($R_{0.01} = 63$ mm/h), la frecuencia de trabajo es 12 GHz y la longitud efectiva que existe entre la ciudad de México y el MEXSAT 3 es de 1.4125 Km. Por lo tanto, si proyectamos en la [Figura 5.10](#) el valor de la longitud efectiva de 1.41 Km sobre la curva que corresponde a la frecuencia de 12 GHz tenemos que la atenuación por lluvia tiene como resultado el valor de aproximado de 4 dB, tal como se obtuvo al desarrollar los cálculos manualmente.

La [Figura 5.11](#) es muy importante, ya que en ella aparece una serie de curvas que definen la atenuación por lluvia específica α [dB/Km] en función de la tasa de lluvia $R_{0.01}$ [mm/h] con un porcentaje de tiempo excedido de 0.01% y es válida para cualquier zona. En la [Figura 5.11](#), aparecen principalmente cuatro diferentes curvas que corresponden a la atenuación por lluvia específica para las frecuencia de transmisión $f = 4, 6, 12$ y 14 GHz.

Con la ayuda de estas curvas podemos reafirmar los valores obtenidos para el cálculo de la atenuación de lluvia específica α [dB/Km] tanto para el enlace ascendente y el enlace descendente, que se desarrollaron anteriormente. Por ejemplo, el enlace ascendente se lleva a cabo en la zona N donde la tasa de lluvia excedida en un porcentaje de tiempo de 0.01% $R_{0.01}$ para esta zona es de 95 mm/h y la frecuencia de operación es de 14 GHz. Por lo tanto, sí en la **Figura 5.11** proyectamos el valor de 95 mm/h desde el eje x hasta la curva que corresponde a la frecuencia de 14 GHz obtenemos que el valor de la atenuación por lluvia específica se aproxima a 5.9 dB/Km.

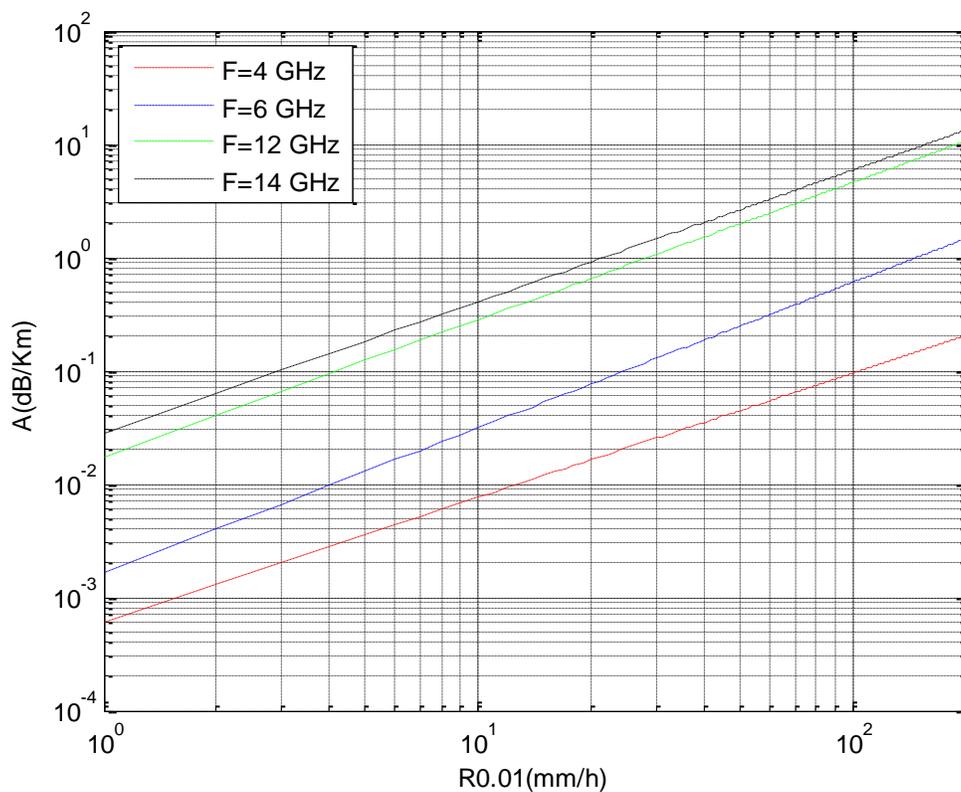


Figura 5.11 Cálculo de atenuación por lluvia específica α [dB/Km], para las frecuencias de 4, 6, 12 y 14 GHz en diferentes zonas pluviales.

Por otra parte, en el enlace descendente se trabaja con la zona M ($R_{0.01} = 63$ mm/h) y una frecuencia de 12 GHz. Así, si proyectamos desde el eje x el valor de 63 mm/h hacia que corresponde a la frecuencia de 12 GHz, en la **Figura 5.11**, se encontró que el valor de la atenuación por lluvia específica está alrededor de 2.8 dB/km. Los valores obtenidos por estas curvas son cercanos a los derivados por los cálculos desarrollados manualmente.

La [Figura 5.12](#) y [Figura 5.13](#) presentan los resultados obtenidos de los cálculos de la atenuación específica $A_{RAIN}(p)$ para un porcentaje de tiempo p diferente al de 0.01% dado en dB/Km. Este cálculo se deriva de la [ecuación \(4.10\)](#), aunque existe una pequeña diferencia. En este caso la expresión no queda en función de la atenuación por lluvia absoluta $A_{0.01}$ [dB] si no de la atenuación por lluvia específica α [dB/km]. Por lo tanto, la expresión resulta de la siguiente manera:

$$A_{RAIN}(p) = A_{RAIN}(p = 0.01) \times 0.12 p^{-(0.546 + 0.043 \log p)}$$

La [Figura 5.12](#) es válida únicamente para la frecuencia de operación de 14 Ghz en las cuatro diferentes zonas pluviales. Las graficas que corresponden a otras frecuencias se presentan en el [Anexo E](#).

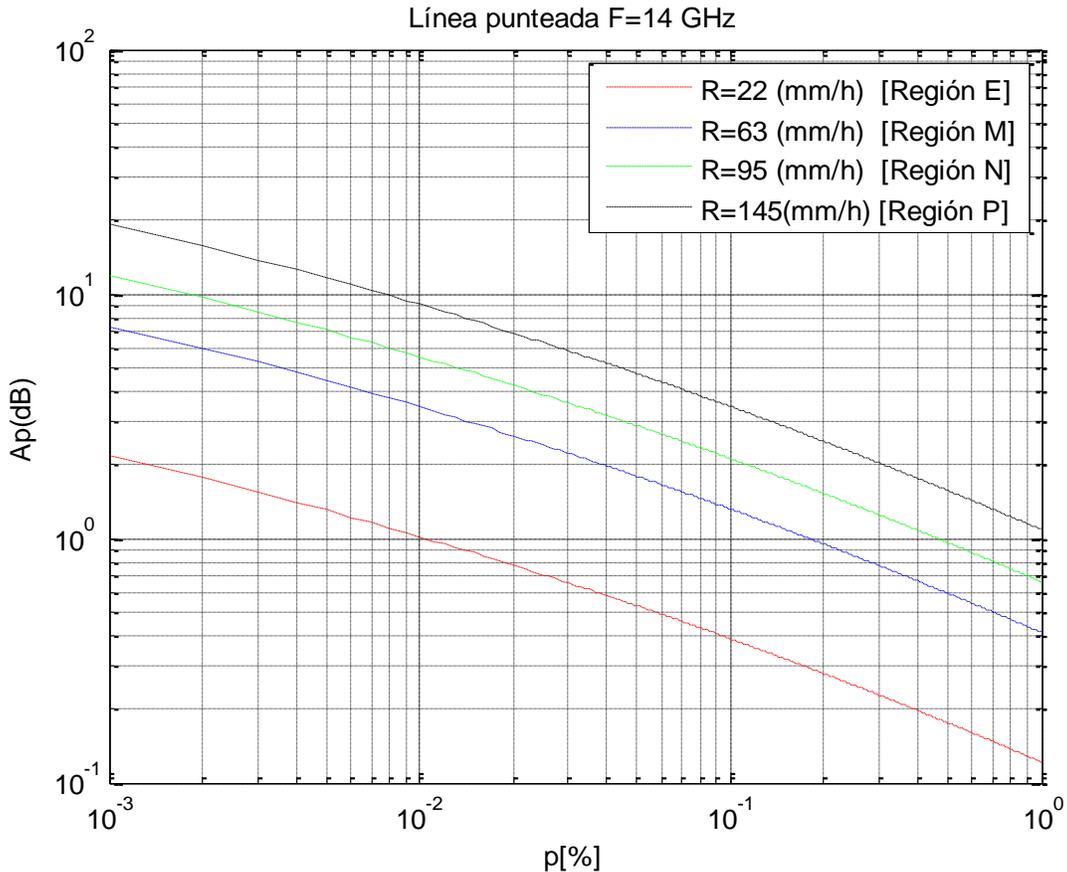


Figura 5.12. Gráfica de atenuación específica $A_{RAIN}(p)$ para la frecuencia de 14 GHz en las cuatro diferentes zonas pluviales

Por otra parte, [la Figura 5.13](#) es efectiva para la zona pluvial definida con la letra M en cuatro diferentes frecuencias de transmisión. Las gráficas que definen la atenuación específica $A_{RAIN}(p)$ para un porcentaje de tiempo p diferente al de 0.01% en otras zonas

pluviales se muestran en el [Anexo F](#). Las curvas obtenidas en las [Figuras 5.12 y 5.13](#) son muy importantes cuando se conoce con exactitud el porcentaje de tiempo en que llueve durante un año en una determinada zona y para una determinada frecuencia de operación.

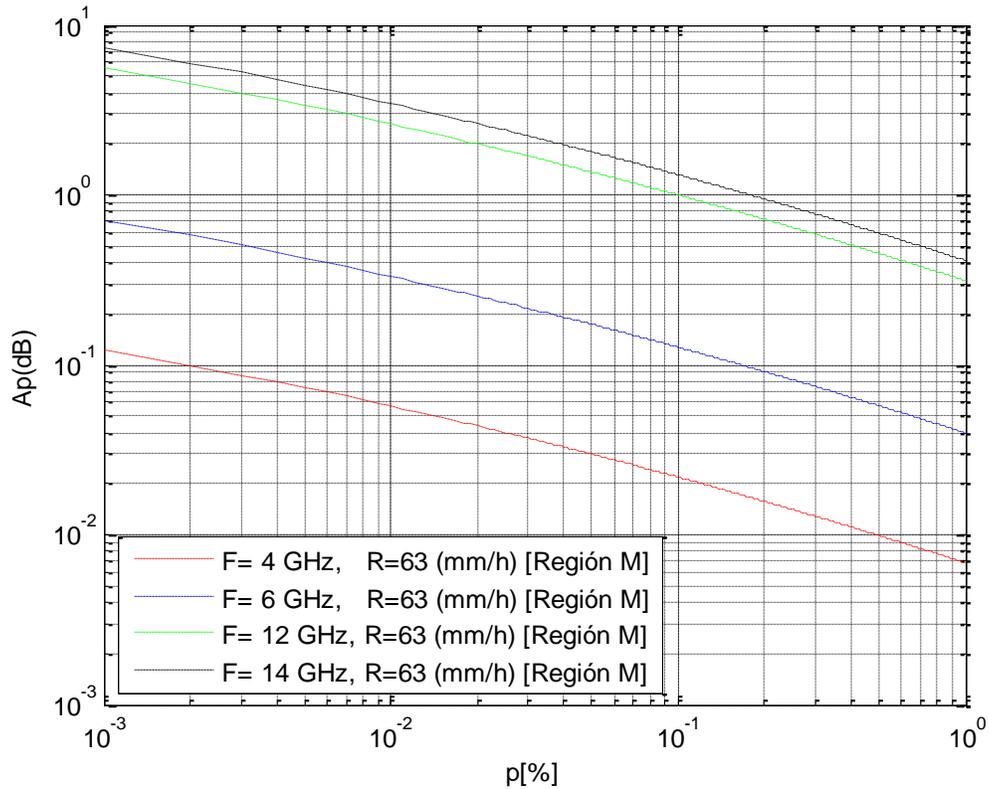
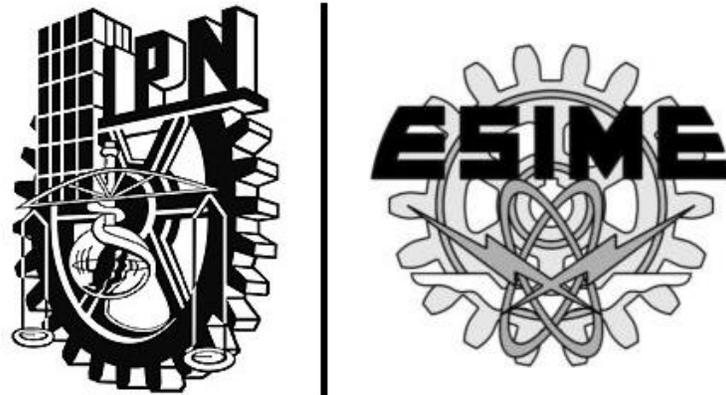


Figura 5.13. Gráfica la atenuación específica $A_{RAIN}(p)$ para un porcentaje de tiempo p para la zona pluvial M (63 mm/h) en cuatro diferentes frecuencias de transmisión.



CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

En este trabajo se lleva a cabo la estimación de la atenuación por lluvia aplicado principalmente para uno de los nuevos satélites, el MEXSAT 3, que conforman al nuevo sistema satelital mexicano (MEXSAT), el cual es operado por Telecomunicaciones de México (Telecomm-Telégrafos).

La estimación de la atenuación por lluvia es realizada principalmente aplicando el modelo CCIR, ya que este modelo ha servido de base para diferentes métodos de predicción y del cual se han derivado otros modelos con algunas mejoras para aplicarla a alguna determinada zona.

La estimación de la atenuación por lluvia es de gran importancia porque permite deducir los efectos que sufre la propagación de las ondas debido a la lluvia y disponer de alternativas para mejorar el rendimiento en los medios de transmisión entre un satélite y sus estaciones terrenas ante condiciones adversa.

De los resultados y las gráficas obtenidas, se concluye, de manera general que cuando aumenta la tasa de lluvia, las ondas electromagnéticas sufren una mayor atenuación debido a que estas encuentran un mayor número de obstáculos en su trayectoria, que en este caso son las gotas de agua. Además, se presenta una mayor atenuación en las altas frecuencias debido a que la longitud de onda de la señal disminuye con respecto al tamaño de las gotas de lluvia, por lo que aumenta la pérdida de energía.

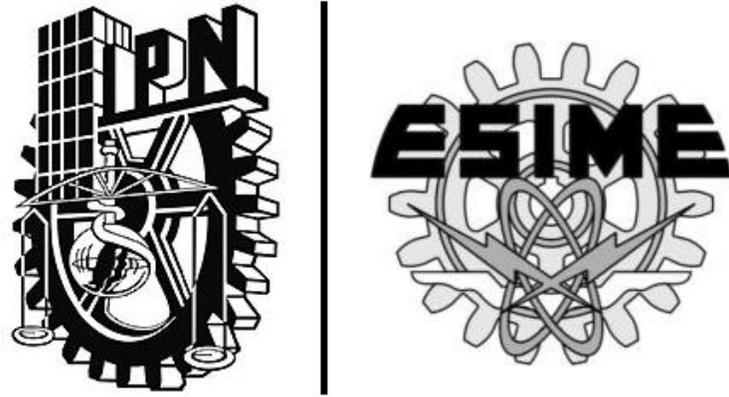
El modelo CCIR se vuelve un poco complicado porque está definido por una serie de pasos para el cálculo de la atenuación específica con respecto a la frecuencia. El cálculo de la atenuación específica depende de la intensidad de lluvia R (mm/h) y el cálculo de los coeficientes K y α . El cálculo de los coeficientes también es un poco pesado, ya que las expresiones matemáticas o sus valores cambian prácticamente para cada frecuencia por lo que aumenta el número de cálculos.

El modelo CCIR fue comparado con un método empírico más sencillo con aproximaciones analíticas. La principal ventaja es que este segundo método requiere un menor número de procesamiento de datos para las diferentes frecuencias. Sin embargo, el segundo modelo presenta algunas diferencias de hasta 0.2 dB con respecto al modelo CCIR para frecuencias menores a los 5 GHz. El segundo modelo puede considerarse como una alternativa para el cálculo de atenuación por lluvia si se requiere sólo una estimación rápida.

Pero, si se desea una estimación más precisa entonces el modelo CCIR es el modelo más conveniente.

A través del modelo CCIR se obtuvo un conjunto de curvas. En alguna de ellas se deja fija una determinada frecuencia y se obtiene una serie de curvas que representan a diferente tasa de lluvia, permitiendo el cálculo de la atenuación debido a lluvia en diferentes regiones. En otros casos se deja fija la tasa de lluvia y se obtienen resultados para diferentes frecuencias, y así proporcionar el cálculo de la atenuación por lluvia en una misma región pero para enlaces con diferentes frecuencias. Entre este conjunto de curvas es posible estimar la atenuación debido a lluvia en función de la tasa de lluvia, es decir, que se puede extender el cálculo para otras regiones que no están contempladas en el trabajo y además se puede tomar en cuenta la estimación con diferentes porcentajes de tiempo excedido y no sólo el de 0.01%.

En este trabajo, las curvas obtenidas estiman la atenuación debido a lluvia para las regiones que cubren principalmente a la República Mexicana, tomando en cuenta la órbita del satélite SATMEX 3 y para dos bandas de frecuencia, la banda C y banda Ku. Pero, es posible extender la estimación de la atenuación por lluvia a otras regiones con diferentes tasas de lluvia, otras orbitas satelitales y para cualquier banda de frecuencia.



ANEXOS

ANEXO A

LISTA DE SÍMBOLOS

Descripción de las variables utilizadas

Variable	Descripción
A	Atenuación
dB	Que está dado en decibeles
f	Frecuencia
GHz	Giga Hertz
F	Fuerza de atracción
G	Constante de gravitación fundamental (m/s^2)
M_m	Masa de un cuerpo mayor (Kg)
m	Masa de un cuerpo menor (Kg)
r	Distancia entre los cuerpos M y m (metros)
dv/dt	Aceleración de m con respecto a un sistema de coordenadas con origen en el centro de M (m/s^2)
μ	Producto de G y $M_m \approx 398601 \text{ km}^3/s^2$
θ	Ángulo de elevación (grados)
ϕ	Ángulo de acimut (grados)
$\phi\phi'$	Angulo de acimut relativo a la ubicación de la estación terrena con respecto a la ubicación del satélite (grados)
ΔL	Diferencia entre la longitud del satélite y la longitud de la estación terrena (grados)
l	Latitud de la estación terrena (grados)
L	Longitud de la estación terrena
R_t	Radio de la tierra = 6,378 km

r_r	Radio de la Tierra
H	Altura de la órbita geoestacionaria = 42,164 Km
J	Coefficiente de absorción de masa (kg/m ²)
Kl	coeficiente de la atenuación específica ((dB/km)/(g/m ³)).
α	Atenuación específica (dB/Km)
a, b	Coefficientes dependientes de la frecuencia y la polarización de la onda portadora. Adimensionales
a_h, b_h	Coefficientes a y b para polarización horizontal
a_v, b_v	Coefficientes a y b para polarización vertical
a_c, b_c	Coefficientes a y b para polarización circular.
R_p	Intensidad de lluvia sobrepasada en un porcentaje p en un tiempo determinado (generalmente un año). Para p≤1 (mm/hr)
$R_{0.01}$	R(p=0.01) Intensidad de lluvia sobrepasada en 0.01% en un cierto tiempo. (mm/hr)
L_R	Longitud geométrica de la lluvia (Km)
H_g	Altitud de la estación terrena (Km)
H_0	Altura de la lluvia (Km)
$A_{a,a}$	Atenuación por absorción atmosférica (dB)
A_{cenit}	Atenuación por punto cenit (Interactuación de las ondas electromagnéticas con las partículas de gas) (dB)
E	Campo eléctrico
E_{cop}	Campo eléctrico de la señal co-polarizada
Θ_f	Ángulo de rotación de Faraday (grados)
$A_{Faraday}$	Pérdida de potencia (Atenuación) causado por el efecto Faraday
E_{polX}	Magnitud de la componente de polarización cruzada
D_{PX}	Magnitud de la discriminación de polarización cruzada
τ	Ángulo de inclinación del plano de polarización, con respecto a la estación

	terrena (Para polarización circular, el valor de $\tau = 45^\circ$)
L_s	Inclinación de la longitud de la trayectoria
h_s	Altura de la estación terrena sobre el nivel del mar
$r_{0.01}$	Factor de reducción para 0.01% del tiempo que se desea
γ_R	Atenuación por kilómetro (dB/Km)
K, α	Coefficientes de atenuación por polarización específicos para el modelo CCIR
K_h, α_h	Coefficientes de atenuación por polarización horizontal, específicos para el modelo CCIR
K_v, α_v	Coefficientes de atenuación por polarización vertical, específicos para el modelo CCIR
A_{RAIN}	Atenuación por lluvia
R_e	Radio efectivo de la Tierra
h_0	Valor medio de la altura de la isoterma
L_G	Proyección horizontal de la longitud del trayecto
$V_{0.01}$	Factor de ajuste vertical
X, ξ	Ángulos de ajuste vertical
L_E	Longitud del trayecto efectivo
A_p	Atenuación para una probabilidad R_p
$A_{0.01}$	Atenuación para un factor $R_{0.01}$
d	Distancia del enlace para el modelo presentado por Brasil
D	Diámetro de la célula de lluvia
R_M	Intensidad de lluvia maxima
ρ_0	Distancia a la cual la intensidad de lluvia decrece en un factor de 1/e
$N(\ln R_M, \rho_0)$	Número de células por kilómetro (Modelo Excell)
$N_0(\ln R_M)$	Densidad espacial (modelo Excell)
$\bar{\rho}_0$	Radio medio condicionado a que $R_M \geq 5\text{mm/h}$

$P(R)$	Función de distribución acumulativa de la intensidad de lluvia
$P(R_M)'''$	Tercera derivada de la función $P(R)$ evaluada en R_M
A_C	Atenuación en la célula de lluvia
R_E	Intensidad de lluvia equivalente
$a' b' c' d'$	Constantes dependientes de la región geográfica
d_0	Distancia efectiva
$A(R,d)$	Atenuación propuesta por el modelo Crane
h_r	Altura de la lluvia

ANEXO B

ALGORITMOS UTILIZADOS

Códigos de Matlab

Códigos usados para la obtención de las diferentes graficas expuestas en el trabajo.

Para la obtención de la gráfica de atenuación por lluvia usando el modelo CCIR en el apartado gráfica A, se uso el siguiente código:

```
clear
clc
% Parametros de la antena
longitud=(99+(11/60));
latitud=(18+(24/60));
% 1)Determinacion de la intensidad de lluvia
R=22;
R1=63;
R2=95;
R3=145;

% 2)Calculo de la altura de la lluvia
if (latitud<36)
hr= 3+(0.028*latitud);
else
hr= 4-(0.075*(latitud-36));
end

% 3)Calculo de la longitud de la trayectoria inclinada de la lluvia.
hs=0.001;
E=atand((cosd(latitud)*cosd(13.8166)-
0.1512)/(sind(acosd(cosd(latitud)*cosd(13.8166)))));
Ls =(hr-hs)/sind(E);

% 4) Calculo de r
L0=35^(-0.015*R);
r=1/(1+(Ls/L0)*cosd(E));

% 5) Calculo de Le
Le=Ls*r;
tau=90;

for i=1:40
    f(i)=i;

    if (i==1)
        kh=0.0000387;
        kv=0.0000352;
        ah=0.912;
        av=0.880;
    elseif (i<2)
```

```
kh=(3.870e-005)*(f(i)^1.9925);
kv=(3.520e-005)*(f(i)^1.9710);
ah=0.1694*log10(f(i))+0.9120;
av=0.1428*log10(f(i))+0.880;
elseif (i==2)
kh=0.000154;
kv=0.000138;
ah=0.963;
av=0.923;
elseif (i<4)
kh=(3.649e-005)*(f(i)^2.0775);
kv=(3.222e-005)*(f(i)^2.0985);
ah=0.5249*log10(f(i))+0.8050;
av=0.5049*log10(f(i))+0.7710;
elseif (i==4)
kh=0.000650;
kv=0.000591;
ah=1.121;
av=1.075;
elseif (i<6)
kh=(2.199e-005)*(f(i)^2.4426);
kv=(2.187e-005)*(f(i)^2.3780);
ah=1.0619*log10(f(i))+0.4816;
av=1.0790*log10(f(i))+0.4254;
elseif (i==6)
kh=0.00175;
kv=0.00155;
ah=1.308;
av=1.265;
elseif (i<7)
kh=(3.202e-006)*(f(i)^3.5181);
kv=(3.041e-006)*(f(i)^3.4791);
ah=0.3585*log10(f(i))+1.0290;
av=0.7021*log10(f(i))+0.7187;
elseif (i==7)
kh=0.00301;
kv=0.00265;
ah=1.332;
av=1.312;
elseif (i<8)
kh=(7.542e-006)*(f(i)^3.0778);
kv=(7.890e-006)*(f(i)^2.9892);
ah=-0.0862*log10(f(i))+1.4049;
av=-0.0347*log10(f(i))+1.2411;

elseif (i==8)
kh=0.00454;
kv=0.00395;
ah=1.327;
av=1.310;
elseif (i<10)
kh=(2.636e-006)*(f(i)^3.5834);
kv=(2.102e-006)*(f(i)^3.6253);
ah=-0.5263*log10(f(i))+1.8023;
```

```
    av=-0.4747*log10(f(i))+1.7387;
elseif (i==10)
    kh=0.0101;
    kv=0.00887;
    ah=1.276;
    av=1.264;
elseif (i<12)
    kh=(3.929e-006)*(f(i)^3.4078);
    kv=(2.785e-006)*(f(i)^3.5032);
    ah=-0.7451*log10(f(i))+2.0211;
    av=-0.8083*log10(f(i))+2.0723;
elseif (i==12)
    kh=0.0188;
    kv=0.0168;
    ah=1.217;
    av=1.200;
elseif (i<15)
    kh=(1.094e-005)*(f(i)^2.9977);
    kv=(7.718e-006)*(f(i)^3.0929);
    ah=-0.6501*log10(f(i))+1.9186;
    av=-0.7430*log10(f(i))+2.0018;
elseif (i==15)
    kh=0.0367;
    kv=0.0335;
    ah=1.154;
    av=1.128;
elseif (i<20)
    kh=(4.339e-005)*(f(i)^2.4890);
    kv=(3.674e-005)*(f(i)^2.5167);
    ah=-0.4402*log10(f(i))+1.6717;
    av=-0.5042*log10(f(i))+1.7210;
elseif (i==20)
    kh=0.0751;
    kv=0.0691;
    ah=1.099;
    av=1.065;
elseif (i<25)
    kh=(8.951e-005)*(f(i)^2.2473);
    kv=(9.373005468e-005)*(f(i)^2.2041);
    ah=-0.3921*log10(f(i))+1.6092;
    av=-0.3612*log10(f(i))+1.5349;
elseif (i==25)
    kh=0.124;
    kv=0.113;
    ah=1.061;
    av=1.030;
elseif (i<30)
    kh=(8.779e-005)*(f(i)^2.2533);
    kv=(1.143e-004)*(f(i)^2.1424);
    ah=-0.5052*log10(f(i))+1.7672;
    av=-0.3789*log10(f(i))+1.5596;
elseif (i==30)
    kh=0.187;
    kv=0.167;
    ah=1.021;
```

```
        av=1.000;
elseif (i<35)
    kh=(1.009e-004)*(f(i)^2.2124);
    kv=(1.075e-004)*(f(i)^2.1605);
    ah=-0.6274*log10(f(i))+1.9477;
    av=-0.5527*log10(f(i))+1.8164;
elseif (i==35)
    kh=0.263;
    kv=0.233;
    ah=0.979;
    av=0.963;
elseif (i<40)
    kh=(1.304e-004)*(f(i)^2.1402);
    kv=(1.163e-004)*(f(i)^2.1383);
    ah=-0.6898*log10(f(i))+2.0440;
    av=-0.5863*log10(f(i))+1.8683;
else
    kh=0.350;
    kv=0.310;
    ah=0.939;
    av=0.929;
end

% 6) Determinacion de la atenuación específica

k=(kh+kv+((kh-kv)*((cosd(E))^2)*cosd(2*tau)))/2;
a=((kh*ah)+(kv*av)+((kh*ah-kv*av)*((cosd(E))^2)*cosd(2*tau)))/(2*k);
yr(i)=k*(R^a);
yr1(i)=k*(R1^a);
yr2(i)=k*(R2^a);
yr3(i)=k*(R3^a);
% 7) Valor de la atenuacion

At(i)=yr(i)*Le;

end

loglog(f,yr,'r--',f,yr1,'b--',f,yr2,'g--',f,yr3,'k--')
% hold on
% loglog(f,At,'r-')

%     title('Atenuación específica');
%     xlabel('F (Ghz) ');
%     ylabel('A (dB/Km) ');
%     legend('R=22 (mm/h) [Región E]','R=63 (mm/h) [Región M]','R=95 (mm/h)
[Región N]','R=145 (mm/h) [Región P]');
%     grid on
%     axis([0 40 0.000562 100])
%     plot(f(14),At(14),'ro')
```

Para la obtención de las gráficas de atenuación por lluvia usando el modelo por aproximación aR^b se utilizaron las siguientes líneas de código en Matlab.

```
clear
clc
% Diversas tasas de lluvia:
R=22;
R1=63;
R2=95;
R3=145;

%Haciendo uso de las constantes para la obtencion de la atenuación
for i=1:1000
    f(i)=i;

    if (i<2.9)
        a=(6.39*(10^-5))*(f(i)^(2.03));
    elseif (i<54)
        a=(4.21*10^-5)*(f(i)^2.42);
    elseif (i<180)
        a=(4.09*(10^-2)*(f(i)^0.699));
    else
        a=3.38*(f(i)^-0.151);
    end

    if (i<8.5)
        b=0.851*(f(i)^0.158);
    elseif (i<25)
        b=1.41*(f(i)^-0.0779);
    elseif (i<164)
        b=2.63*(f(i)^-0.272);
    else
        b=0.616*(f(i)^0.0126);
    end

    %Obtención de la atenuación
    At(i)=a*(R^b);
    At1(i)=a*(R1^b);
    At2(i)=a*(R2^b);
    At3(i)=a*(R3^b);

end
At2(14)

loglog(f,At,'r-',f,At1,'b-',f,At2,'g-',f,At3,'k-');
% title('Atenuación específica');
xlabel('F (Ghz)');
ylabel('A (dB/Km)');
% title('Linea punteada')
legend('R=22 (mm/h) [Región E]', 'R=63 (mm/h) [Región M]', 'R=95 (mm/h) [Región N]', 'R=145 (mm/h) [Región P]');
grid on
axis([0 100 0.000794 100])
```

ANEXO C

ATENUACIÓN POR LLUVIA EN FUNCIÓN DE LA LONGITUD EFECTIVA (FRECUENCIA FIJA Y TASA DE LLUVIA VARIABLE)

La atenuación por lluvia excedida en 0.01% con respecto a la longitud efectiva para frecuencias de 4 GHz, 6 GHz, 12 GHz, 14GHz en las diferentes regiones, usando el modelo CCIR son las siguientes:

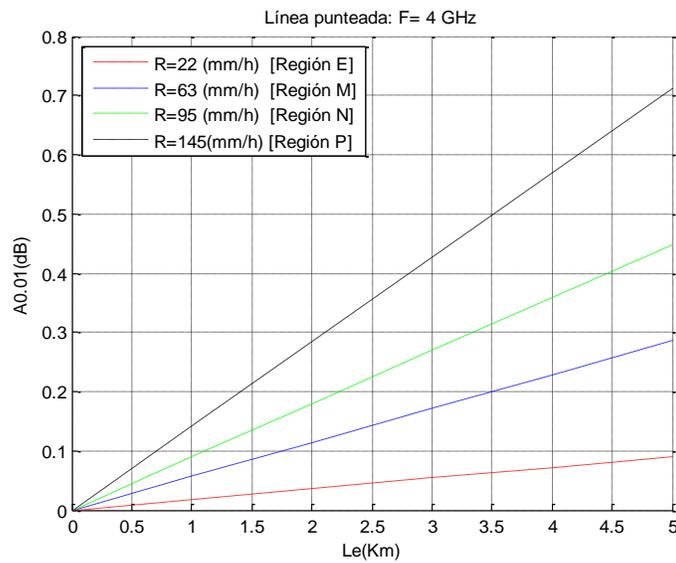


Figura C.1. Gráfica de atenuación por lluvia $A_{0.01}$ en función de la longitud efectiva en diferentes regiones pluviales, usando una frecuencia de 4 GHz.

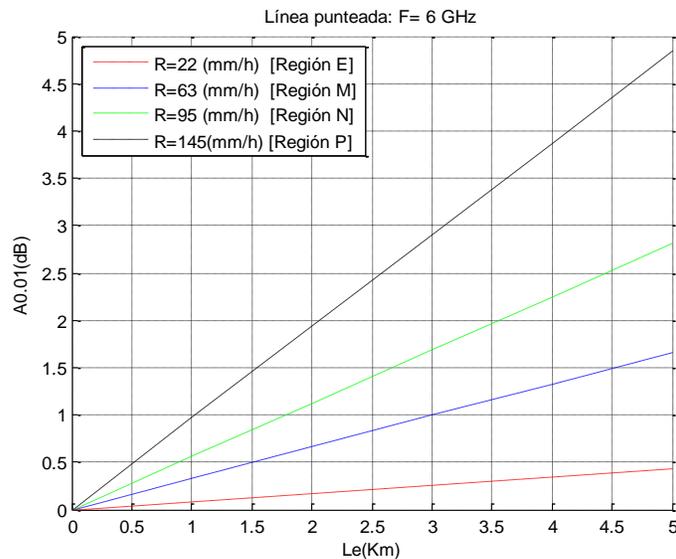


Figura C.2. Gráfica de atenuación por lluvia $A_{0.01}$ en función de la longitud efectiva en diferentes regiones pluviales, usando una frecuencia de 6 GHz.

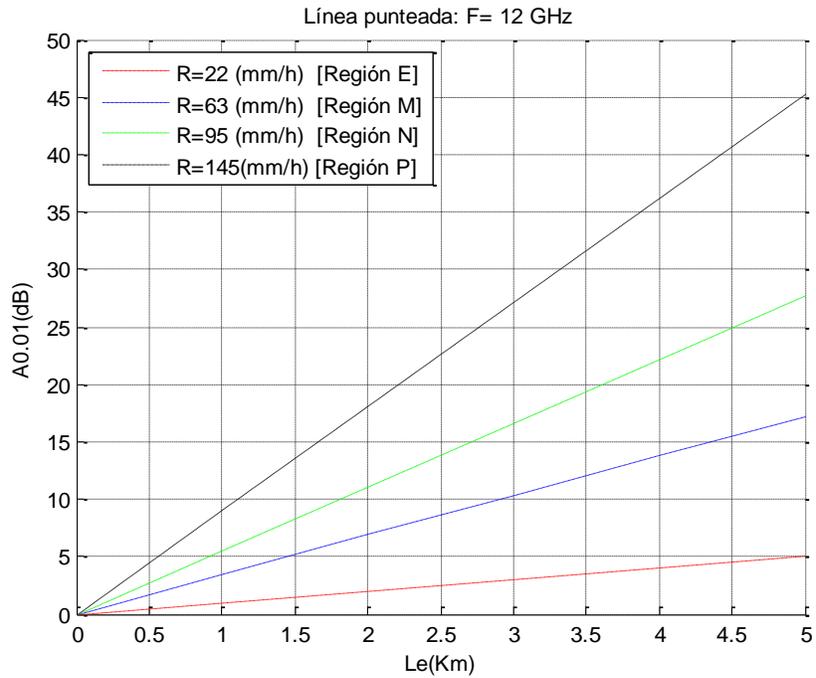


Figura C.3. Gráfica de atenuación por lluvia $A_{0.01}$ en función de la longitud efectiva en diferentes regiones pluviales, usando una frecuencia de 12 GHz.

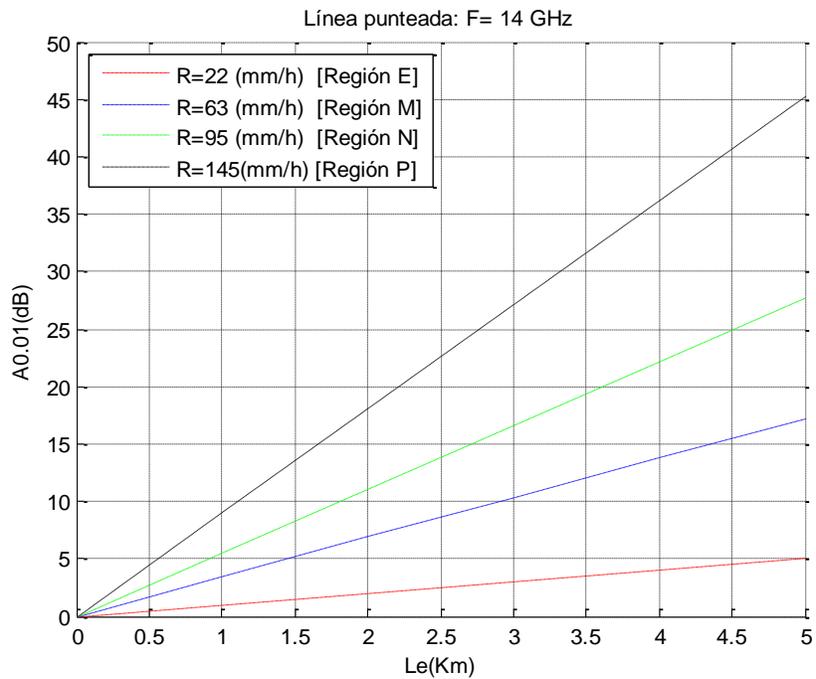


Figura C.4. Gráfica de atenuación por lluvia $A_{0.01}$ en función de la longitud efectiva en diferentes regiones pluviales, usando una frecuencia de 14 GHz.

ANEXO D

ATENUACIÓN POR LLUVIA EN FUNCIÓN DE LA LONGITUD EFECTIVA (TASA DE LLUVIA FIJA Y FRECUENCIA VARIABLE)

Se especifica una región pluvial en función de la longitud efectiva y se calcula la atenuación para las frecuencias de 4ghz, 6ghz, 12ghz, 14ghz.

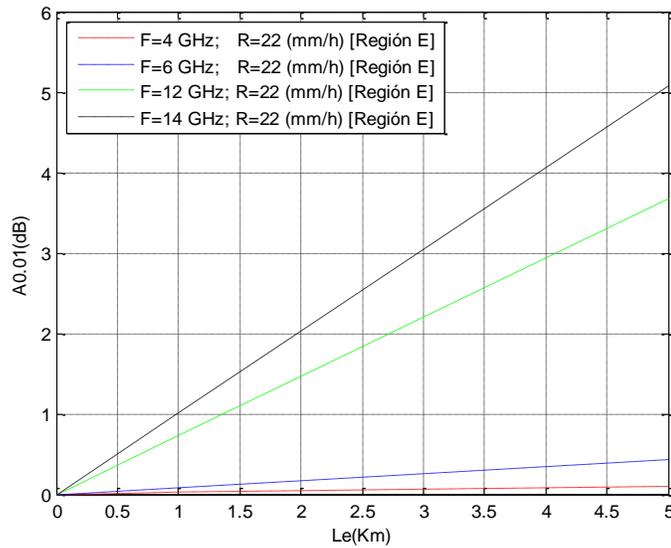


Figura D.1. Gráfica de atenuación por lluvia $A_{0.01}$ en función de la longitud efectiva L_e para cuatro diferentes frecuencias de operación y específicamente para la región E (22mm/h).

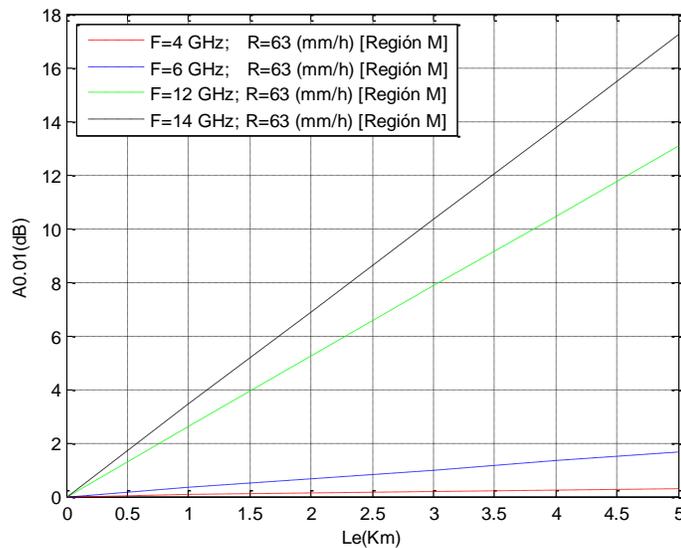


Figura D.2. Gráfica de atenuación por lluvia $A_{0.01}$ en función de la longitud efectiva L_e para cuatro diferentes frecuencias de operación y específicamente para la región M (63mm/h).

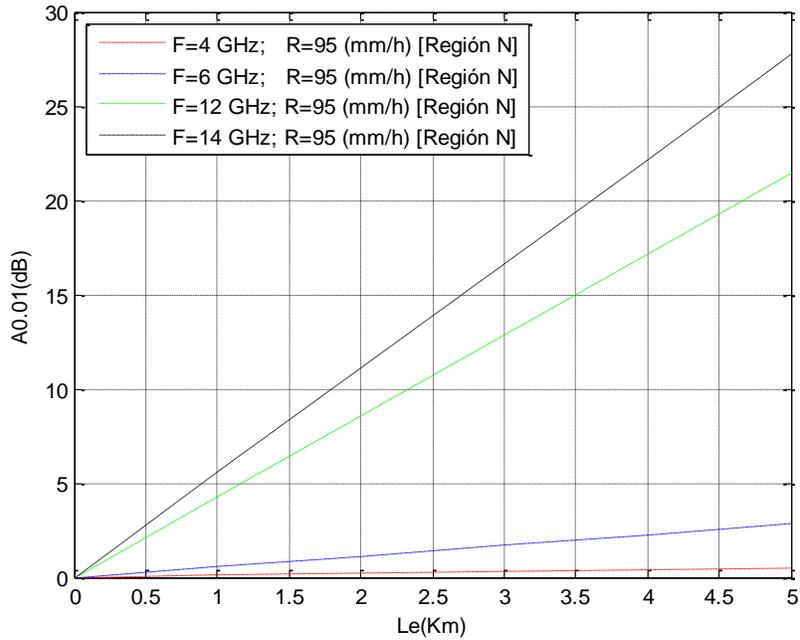


Figura D.3. Gráfica de atenuación por lluvia $A_{0.01}$ en función de la longitud efectiva L_e para cuatro diferentes frecuencias de operación y específicamente para la región N (95mm/h).

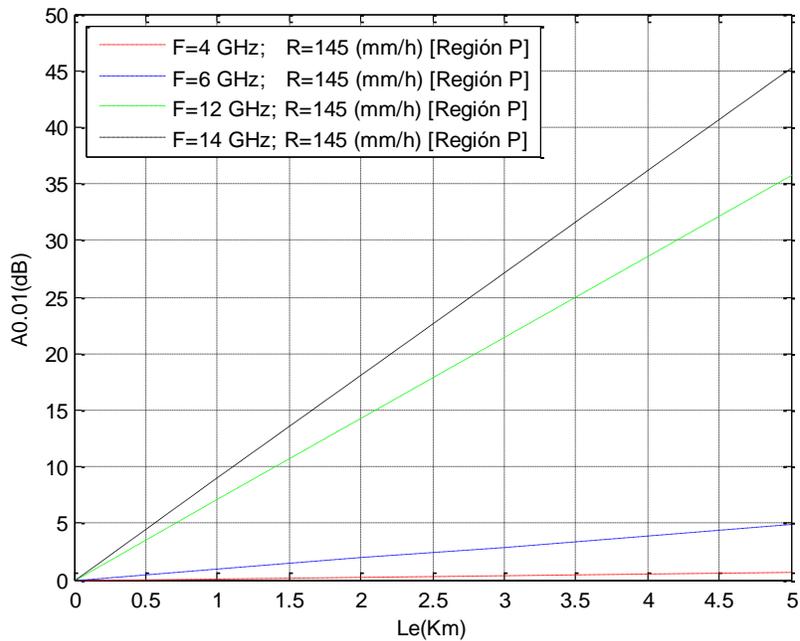


Figura D.4. Gráfica de atenuación por lluvia $A_{0.01}$ en función de la longitud efectiva L_e para cuatro diferentes frecuencias de operación y específicamente para la región P (145mm/h).

ANEXO E

ATENUACIÓN POR LLUVIA EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DEL TIEMPO (FRECUENCIA FIJA Y TASA DE LLUVIA VARIABLE)

Se calcula la atenuación específica en función de porcentaje de tiempo. Se especifica una frecuencia para las diferentes regiones pluviales.

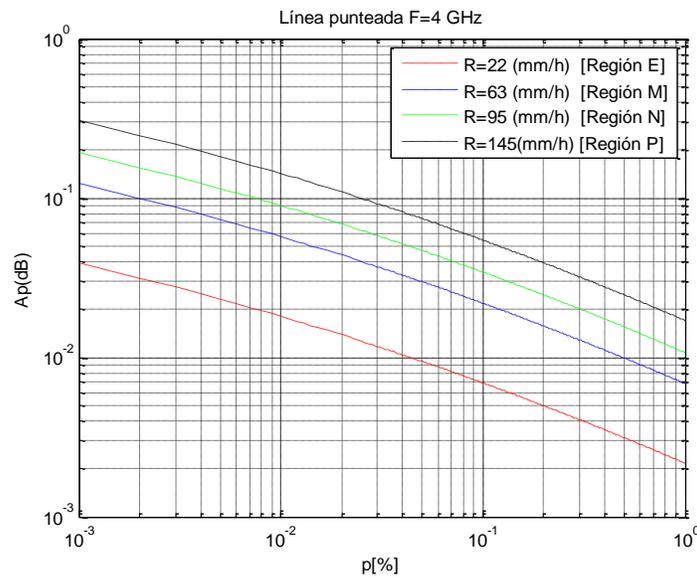


Figura E.1. Gráfica de atenuación específica $A_{RAIN}(p)$ para la frecuencia de 4 GHz en las cuatro diferentes regiones pluviales.

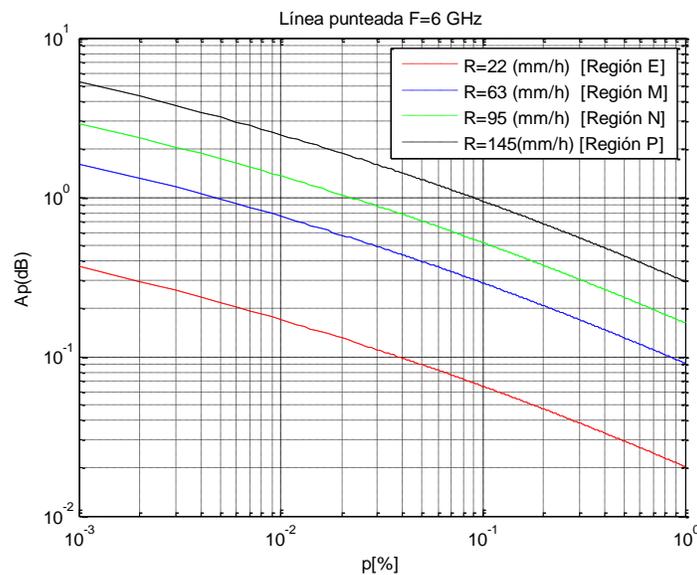


Figura E.2. Gráfica de atenuación específica $A_{RAIN}(p)$ para la frecuencia de 6 GHz en las cuatro diferentes regiones pluviales.

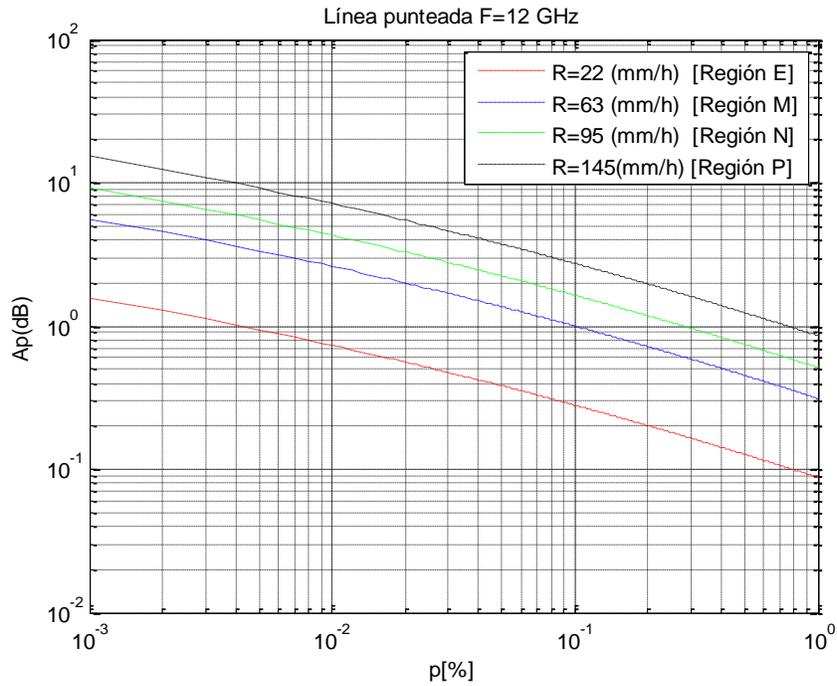


Figura E.3. Gráfica de atenuación específica $A_{RAIN}(p)$ para la frecuencia de 12 GHz en las cuatro diferentes regiones pluviales.

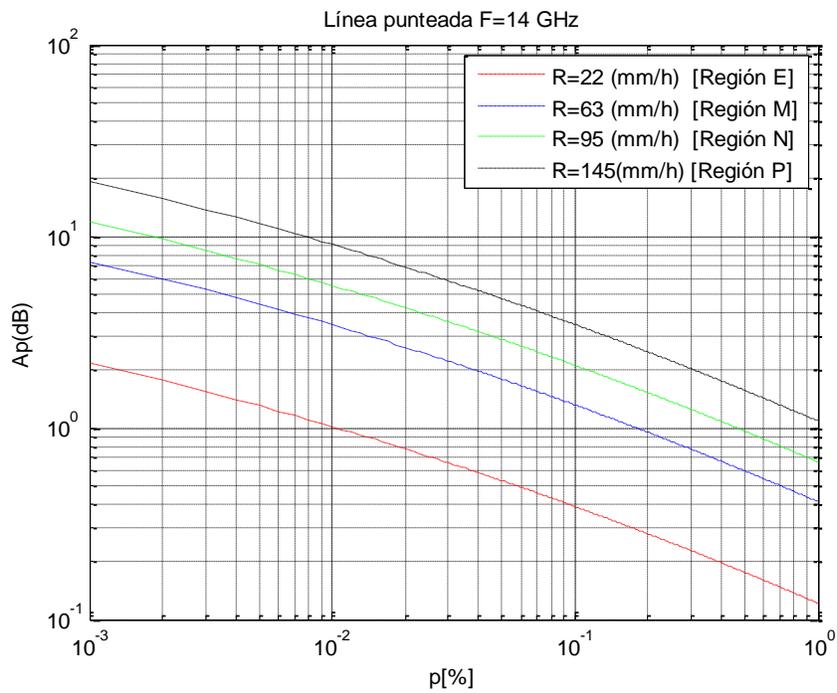


Figura E.4. Gráfica de atenuación específica $A_{RAIN}(p)$ para la frecuencia de 14 GHz en las cuatro diferentes regiones pluviales.

ANEXO F

ATENUACIÓN POR LLUVIA EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DEL TIEMPO (TASA DE LLUVIA FIJA Y FRECUENCIA VARIABLE)

Se calcula la atenuación específica en función del porcentaje de tiempo. Se especifica la región pluvial en las frecuencias de 4ghz, 6ghz, 12ghz, 14ghz.

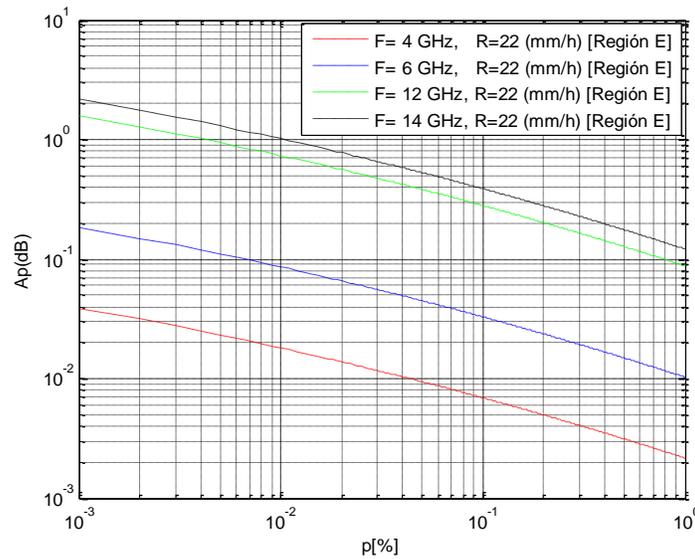


Figura F.1. Gráfica la atenuación específica $A_{RAIN}(p)$ para un porcentaje de tiempo p para la región pluvial E (22 mm/h) en cuatro diferentes frecuencias de transmisión.

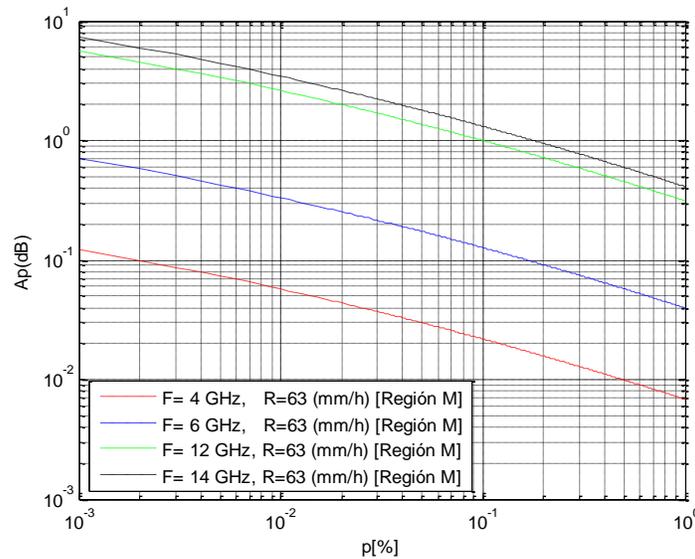


Figura F.2. Gráfica la atenuación específica $A_{RAIN}(p)$ para un porcentaje de tiempo p para la región pluvial M (63 mm/h) en cuatro diferentes frecuencias de transmisión.

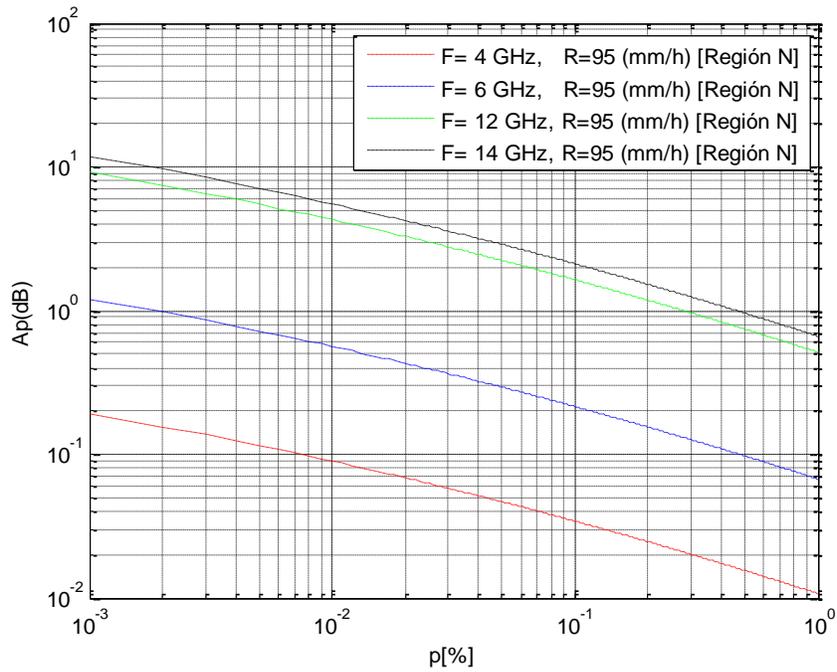


Figura F.3. Gráfica la atenuación específica $A_{RAIN}(p)$ para un porcentaje de tiempo p para la región pluvial N (95 mm/h) en cuatro diferentes frecuencias de transmisión.

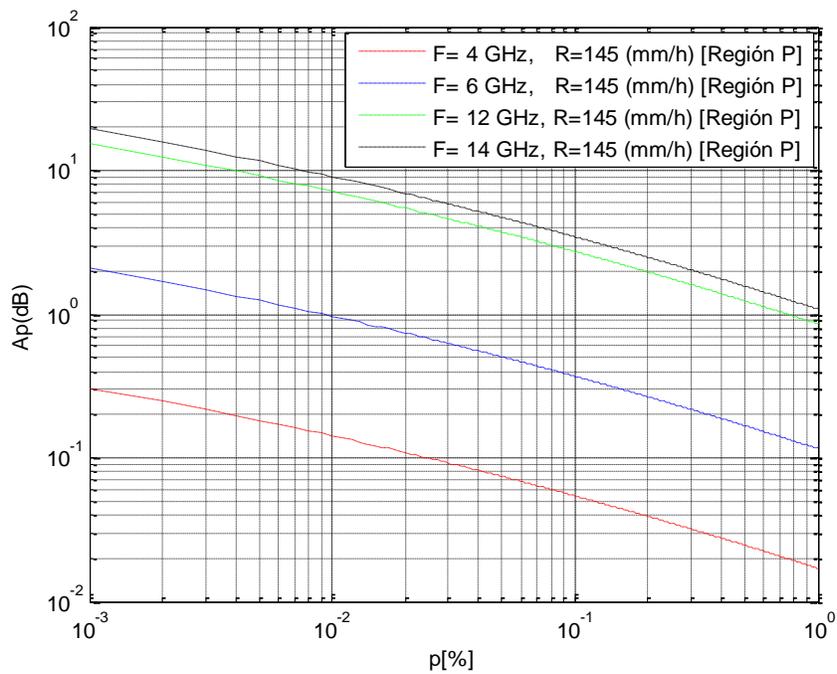
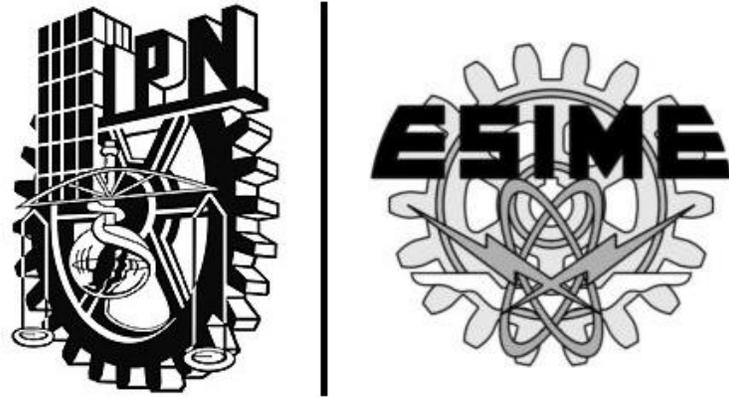


Figura F.4. Gráfica la atenuación específica $A_{RAIN}(p)$ para un porcentaje de tiempo p para la región pluvial P (145 mm/h) en cuatro diferentes frecuencias de transmisión.



BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

1. G. H. Bryant, I. A. Adimula y C. Riva, "Rain Cell Diameters and Height", *8th URSI Commission F. Triennial Open Symposium on Wave Propagation and Remote Sensing*, Aveiro. Portugal, Septiembre 1998.
2. Rodolfo Neri Vela, *Comunicaciones por Satélite*, Cengage Learning Editores, 2003, pp. 263-273.
3. ITU Recomendación P.837-6, "Características de la precipitación para establecer modelos de propagación", Aprobada en Febrero de 2012.
4. ITU R-REC-P.839-3, "Modelo de estimación de la altura de la lluvia para utilizar en los métodos de predicción", Aprobada en Febrero de 2001.
5. Recomendación ITU-R P.618-10, "Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas de telecomunicación Tierra - Espacio", Aprobada en Octubre de 2009.
6. Ernesto Sabogal Gómez, *Handbook: Atenuación por Lluvia*, Colombia 2010, ISBN: 978-958-44-7040-9, pp. 340-457.
7. Recomendación P.841-4, "Conversión de las estadísticas anuales en estadísticas del mes más desfavorable", Aprobada en Marzo de 2005.
8. Sebastiano Tirró, *Satellite Communication Systems Design*, Springer, pp. 310-317, 1993.
9. Pedro García del Pino, "Caracterización experimental de la propagación a 50 Ghz en trayecto inclinado", Madrid, 2003.
10. Carlos Rosado, *Comunicación por Satélite*, Limusa, pp. 561-572, 1999.
11. C. Capsoni, F. Fedi, C. Magistrone, A. Pawlina y A. Paraboni, "Data and Theory for a New Model of the Horizontal Structure of Rain Cells for Propagation Applications", *Radio Science*, vol. 22,.no. 3, pp. 395-404, Mayo 1987.
12. J .A. Garcia-Lopez, J. M. Hernando y J. M. Selga, "Simple Rain Attenuation Prediction Method for Satellite Radio Links", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 36, no. 3, Marzo 1998.

13. Roderic L. Olsen, David V. Rogers, and Daniel B. Hodge, "The aR^b Relation in the Calculation of Rain Attenuation", IEEE Transactions on antennas and propagation, vol, Ap.26, no, 2, March 1978.
14. Recomendación UIT-R P.618-10 - Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas de telecomunicación Tierra-espacio - (10/2009).
15. ITU Recomendación P.837-6 (02.12) - Características de la precipitación para establecer modelos de propagación - Aprobada en 2012-02.ITU R-REC-P.839-3 Modelo de estimación de la altura de la lluvia para utilizar en los métodos de predicción (2001-02).