

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica



**Estudio é Investigación de la Absorción por
Lluvia a las Frecuencias de 11.6,20 y 30 GHz
en un Clima Ecuatorial Lluvioso Usando
Radiómetros Pasivos**

**Tesis para Optar el Título Profesional de
Ingeniero Electrónico**

Presentado por

Carlos Marco Polo Peñaranda

Promoción 1980-2

Lima - Perú

1985

A MIS PADRES
MANUEL Y LIDIA

RECONOCIMIENTOS

Al Dr. Angel Velásquez, por que gracias a su gestión se llevó a cabo este proyecto.

Al Ing. Ramón Vargas, por su constante apoyo en la realización del presente trabajo.

A los Ingenieros José Delgado y Daniel Gárate por sus invalorable su gerencias y comentarios críticos.

A las señoritas Lili del Aguila y Elsa María Apaéstagui por su ayuda en la preparación del original

Carlos Poto Peñaranda

I N D I C E

INTRODUCCION

1. ASPECTOS GENERALES

1.1 Efectos atenuantes de la atmósfera	7
1.1.1 Atenuación producida por los gases atmosféricos	7
(a) Coeficiente de absorción del oxígeno	10
(b) Coeficiente de absorción del vapor de agua	11
1.1.2 Atenuación producida por la lluvia	13
(a) Forma y propiedades eléctricas de una gota de agua	14
(b) Distribución de la lluvia por tamaño de gotas	22
(c) Velocidad terminal de las gotas de lluvia	24
(d) La teoría de Mie	24
1.1.3 Atenuación producida por las nubes de agua	28
1.1.4 Atenuación debida al agua en sus diferentes fases de congelación	
(a) Por nubes de hielo	29
(b) Por nieve y granizo	32
1.2 Metodos de medición de la atenuación por lluvia	32
1.2.1 Rastreadores de sol (Suntracker)	32
1.2.2 Radiómetros pasivos	38
1.2.3 Señales beacon de satélites	39
1.2.4 Radares	39

2. DESCRIPCION DEL ESTUDIO

2.1 Objetivo	42
2.2 Descripción de los subsistemas radiométricos	48
2.2.1 Antenas	48
2.2.2 Subsistemas de 11.6 GHz	48
(a) Down Converter	48

(b)	Subsistema radiometrico de frecuencia intermedia	53
(c)	Interfase radiométrica	58
2.2.3	Subsistemas de 20/30 GHz	60
(a)	Down Converter	60
(b)	Subsistema radiométrico de frecuencia intermedia	63
(c)	Sistema de alimentación del diodo de ruido	67
2.2.4	Subsistema de colección de datos	67
(a)	Registrador análogo	67
(b)	Registrador digital	69
2.2.5	Pluviómetro	71
3.	INGENIERIA DEL PROYECTO	
3.1	Interpretación de los datos registrados	74
3.2	Atenuación derivada de las mediciones radiométricas	76
3.3	Procesamiento de los datos/Análisis de la metodología	80
3.3.1	Procesamiento de los datos radiométricos	80
3.3.2	Procesamiento de los datos pluviométricos	81
3.4	Predicción teorica de la atenuación producida por la lluvia - Metodo CCIR	81
3.4.1	Altura de la lluvia	85
3.4.2	Modelos para la distribución de la intensidad de lluvia	86
4.	PRESENTACION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS	
4.1	Distribución estadística de la precipitación pluvial	90
4.2	Distribución estadística de los niveles de atenuación	97
4.2.1	Distribución de los niveles de atenuación para 11.6 GHz	97
4.2.2	Distribución para los niveles de atenuación de 19.5 GHz	100
4.2.3	Distribución de los niveles de atenuación para 28.5 GHz	104
4.3	Correspondencia de atenuación por lluvia para dos frecuencias diferentes	108

4.4	Distribuciones diurnas y estadísticas de duración de - los desvanecimientos	109
4.5	Periodos de desvanecimientos producidos por el sol	111
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	125
	BIBLIOGRAFIA	

INTRODUCCION

A través de la historia el hombre ha buscado incesantemente, como parte de su supervivencia, la comunicación inteligente con sus semejantes, empleando para ello todos los medios que le permitieran prolongar los sonidos naturales de la voz más allá de las distancias a las que puede alcanzar. Primero mediante señales percusivas y acústicas para luego, gracias a su ingenio, llegar a crear las modernas tecnologías comunes a nuestro tiempo.

Así, las telecomunicaciones han sido desde el inicio uno de los instrumentos más importantes para el desarrollo de la humanidad y por lo mismo el hombre continúa estudiando e investigando la forma de utilizar eficientemente los recursos que ya tiene a su disposición. Es el caso del espectro de frecuencias y de la órbita geoestacionaria usados para las telecomunicaciones por satélite.

Desde el lanzamiento del "EARLY BIRD" en 1965 a la fecha, las comunicaciones por satélite han alcanzado una etapa de uso generalizado; no solo para sistemas de comunicaciones internacionales, sino también para sistemas de comunicaciones domésticas.

Una característica común de los sistemas vía satélite actuales es el empleo insistente de las bandas de frecuencia de 4 y 6 GHz, que proporcionan anchos de banda de 500 MHz. Como consecuencia de ello, se vienen produciendo severas interferencias con las redes de microondas terrestre que operan en la misma banda, así como también interferencias entre satélites debido a la gran cantidad de satélites lanzados. En la figura 1 se muestra la actual saturación de la órbita geoestacionaria entre los meridianos 60 y 150 grados longitud Este. Por otro lado, el espectro de frecuencias de 4 y 6 GHz es un recurso/finito que está siendo copado rápidamente con el incremento acelerado de la demanda hacia los servicios de comunicación por satélite (telefonía, televisión, télex, datos,...). En los Estados Unidos, Japón, Canadá y Rusia la demanda hacia los servicios de comunicación vía satélite exceden fácilmente la oferta existente.

Con el fin de sobrellevar esta crítica situación se ha visto necesario

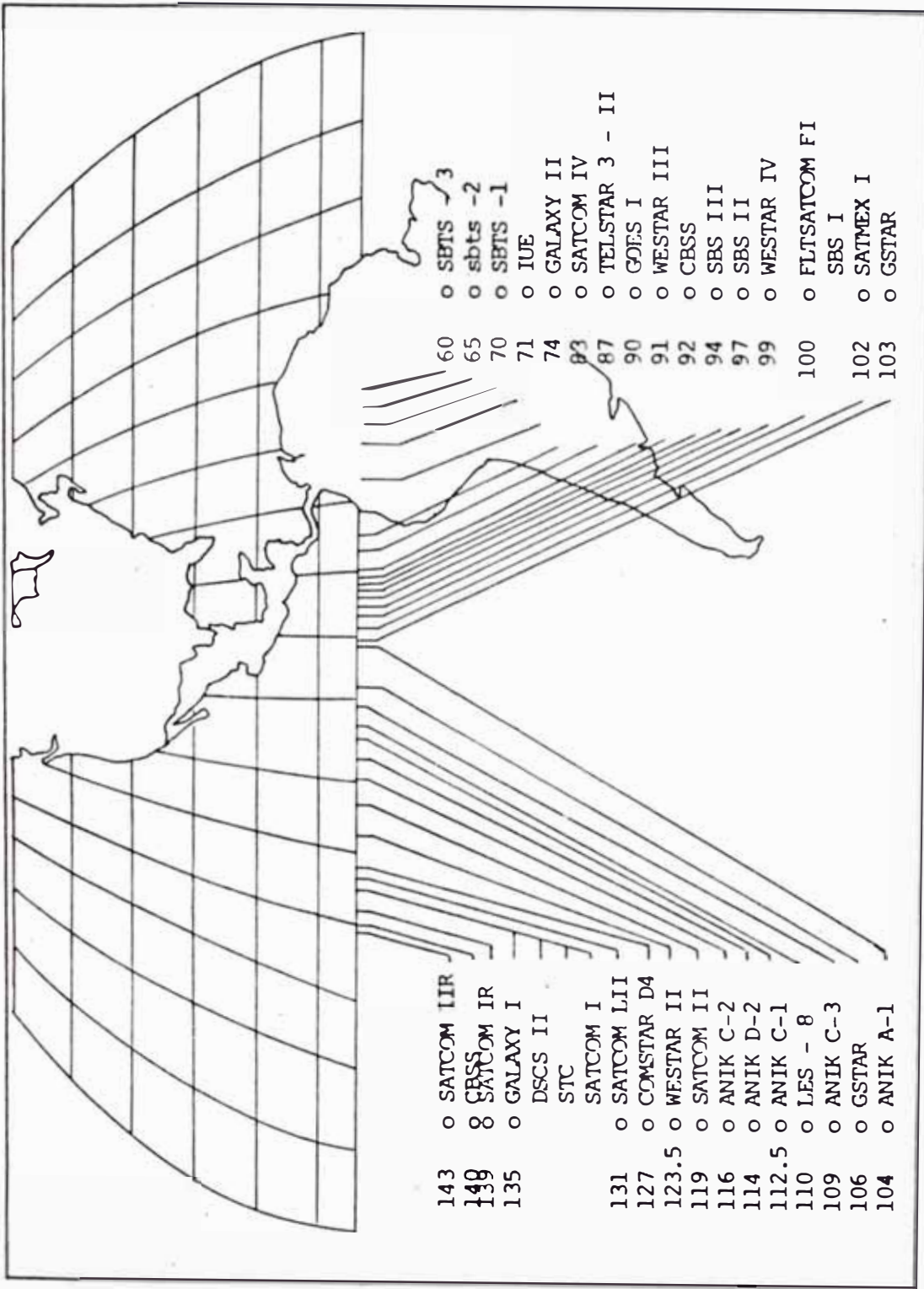


FIG 1 Satélites ubicados entre los meridianos 60° E y 150° E de la órbita geoestacionaria

considerar el empleo de frecuencias mayores a los 10 GHz, que proporcionan anchos de banda del orden de los gigahertz; no solo para aumentar la capacidad de los nuevos satélites sino también para suministrar el espectro adicional que será requerido por los nuevos servicios que van apareciendo. Asimismo, la interferencia de estas bandas con los sistemas de microondas terrestres no serán tan severas como en el caso de las bandas de 4 y 6 GHz.

Las técnicas de diseño que se empleen tanto para los satélites como para las estaciones terrenas, no diferirá significativamente con las empleadas actualmente en la banda C. Tampoco aparecerán mayores problemas en su implementación debido a la alta tecnología de fabricación de la cual se dispone hoy en día.

Infortunadamente a estas frecuencias aparecen nuevos fenómenos de propagación que afectan la confiabilidad del sistema de comunicaciones. Los nuevos factores están relacionados principalmente con la constitución gaseosa de la atmósfera, tales como el vapor de agua y el oxígeno molecular que presentan fuertes líneas de absorción a determinadas frecuencias; y por los hidrometeoros como son las nubes, la niebla, el granizo, la nieve y la lluvia que causan distorsión en la propagación debido a la interacción onda partícula. El fenómeno más importante que afecta a la propagación de las ondas, son las precipitaciones pluviales que producen los mayores efectos de dispersión y absorción de las ondas electromagnéticas. Estos efectos combinados producen la atenuación.

Los fenómenos de propagación experimentados en comunicaciones por satélite a bajas frecuencias (ducting, centelleo ionosférico, centelleo troposférico y otros) decrecen con el incremento de la frecuencia y por lo tanto no son problema para el sistema propuesto.

Con el propósito de que los futuros sistemas de comunicación por satélite a frecuencias mayores de 10 GHz puedan sobreponerse a estos nuevos fenómenos y dar así una mayor confiabilidad a las comunicaciones, se han propuesto diferentes técnicas. Una de estas técnicas es el empleo de la diversidad de ubicación o espacio, donde dos estaciones terrenas se encuentran separadas por una distancia apropiada y comunicadas entre sí mediante enlaces terrestres. Estas estaciones reciben la misma señal y la estación con la menor atenuación debido a estos fenó-

menos es seleccionada electrónicamente. La mejora que se observa es atribuída a la inhomogeneidad y tamaño de las celdas de lluvia. Una alternativa a la diversidad de espacio es el incremento por comando de la potencia del enlace ascendente y descendente a fin de disminuir el efecto de la atenuación del trayecto. Ello se logrará midiendo la atenuación del enlace descendente en un momento dado y deduciendo el nivel de potencia requerida del enlace ascendente mediante un índice de correlación entre las atenuaciones de los enlaces ascendente y descendente.

Sea cual fuere la técnica a emplear, es esencial el poder contar con datos exactos de los fenómenos de propagación para lo cual INTELSAT ha elaborado un programa de observaciones y estudios de la atenuación por lluvia en las bandas 11, 20 y 30 GHz.

Con los datos recopilados en la actualidad sobre la atenuación y la teoría desarrollada, han sido elaborados diversos modelos que permiten predecir con cierta exactitud las perturbaciones que podrían afectar a la mayoría de las estaciones terrenas proyectadas. Sin embargo, no han sido comprobadas las mismas en regiones de clima ecuatorial lluvioso como Africa Ecuatorial, las Islas Ecuatoriales del Pacífico y Sud-América Ecuatorial, aún cuando es en estos lugares donde se esperen los más severos efectos de atenuación debido a la lluvia.

ENTEL PERU S.A. consciente de la importancia del programa de estudio y observaciones elaborado por INTELSAT, presentó una propuesta para llevar a cabo en el Perú estudios correspondientes a las zonas ecuatoriales, lo cual fue aceptado por dicho Organismo. La ubicación de nuestro país dentro de la región ecuatorial y las condiciones climáticas de zonas con abundante precipitación pluvial, dan las características esenciales para un comportamiento especial del fenómeno.

El objetivo principal del presente estudio es la obtención de las distribuciones típicas de las atenuaciones producidas por las lluvias a las frecuencias de 11.6, 20 y 30 GHz. El conocimiento de estas curvas son importantes pues permiten estimar el margen de ganancia requerido por un sistema de comunicaciones vía satélite para sobreponerse a las atenuaciones producidas por la lluvia, así como para determinar la confiabilidad del sistema. Otro objetivo importante es la obtención de la distribución de las intensidades de lluvia en mm/hr, a fin de --

relacionarlo con las distribuciones anteriores y con las aproximaciones teóricas tendientes a mejorarlas en el futuro.

Es de realzar que es la primera vez en el país, y uno de los primeros en el mundo, que se realiza un experimento con características y condiciones similares. Los resultados que se obtendrán al final del mismo, serán un aporte nuestro a las telecomunicaciones mundiales.

La localidad elegida para llevar a cabo el experimento fue la ciudad de Iquitos, específicamente las instalaciones de la Estación Terrena de Pampachica, donde fueron instalados un pluviómetro y dos radiómetros pasivos. Uno recolectando datos de propagación a la frecuencia de 11.6 GHz sobre una trayectoria tierra-espacio y el otro operando a la doble frecuencia 20/30 GHz sobre una trayectoria similar. La salida de los radiómetros son proporcionales a la temperatura de ruido espacial la cual es convertida a una atenuación equivalente.

En el primer capítulo se analizan los fenómenos de propagación principales que afectan a las frecuencias mayores de 10 GHz. En los dos siguientes capítulos se describen los equipos empleados y las técnicas utilizadas para el análisis de los datos y su conversión a niveles de atenuación. En el capítulo 4 son presentados los resultados estadísticos de las mediciones efectuadas durante 5 meses de observación, tales como distribución de la temperatura espacial, distribuciones de atenuación, distribución pluvial, correlación de atenuaciones a diferentes frecuencias y otros cuadros igualmente importantes. Los mismos son analizados y comparados con predicciones teóricas. Adicionalmente se presentan las secuencias de atenuación producidas por el sol (outage solar) así como su tiempo de duración en el día principal. Finalmente son presentadas las observaciones y conclusiones resultantes de la investigación realizada.

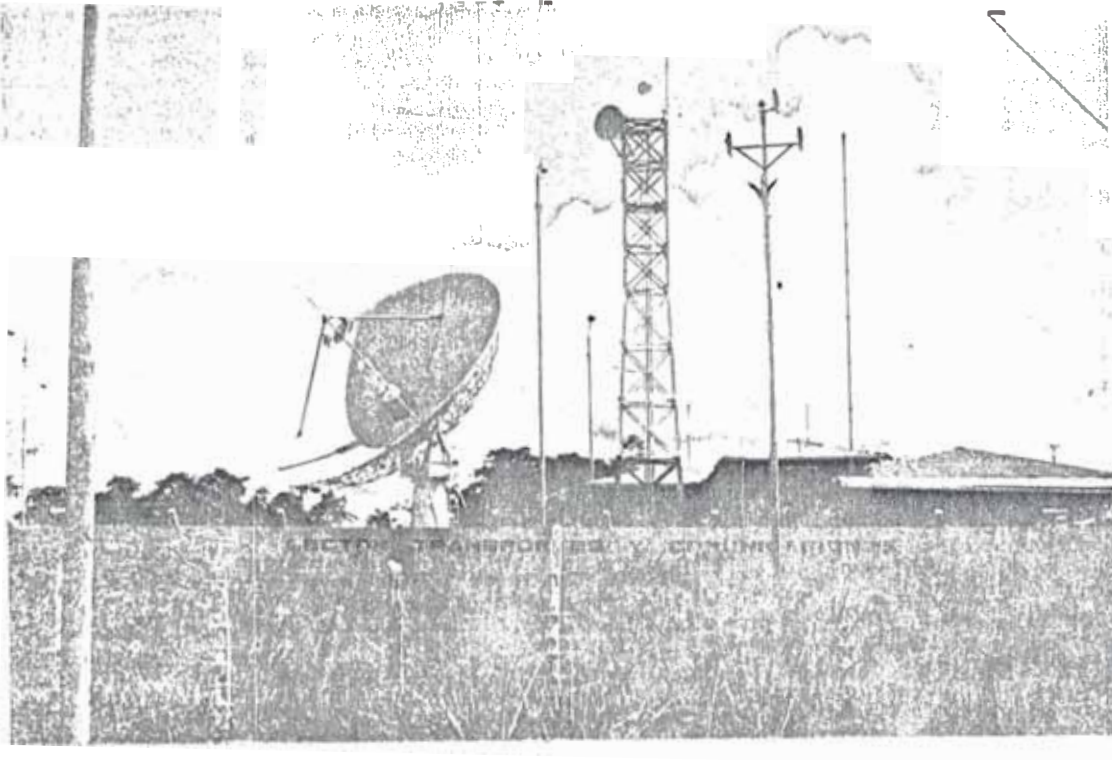


FIG. 2 ESTACION TERRENA DE IQUITOS

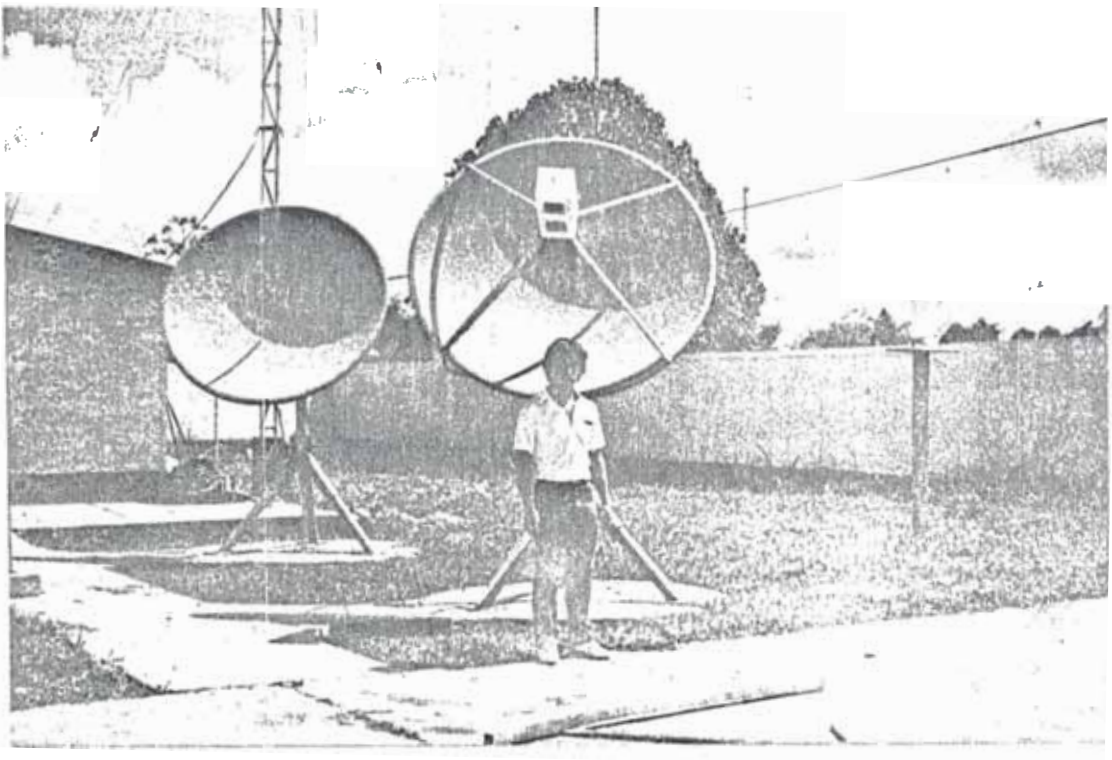


FIG. 3 ESTACION RADIOMETRICA EN IQUITOS

1. ASPECTOS GENERALES

1.1 EFFECTOS ATENUANTES DE LA ATMOSFERA

El principal medio atenuante de la atmósfera, para la banda de frecuencias mayores de 10 GHz, es el agua en todas sus fases, desde vapor de agua a partículas de hielo y el oxígeno molecular (ver figura 1.1).

A continuación se describen las propiedades de atenuación:

- a) Gases atmosféricos - Oxígeno y vapor de agua
- b) Lluvia
- c) Nubes de agua
- d) Fases de congelación del agua.

1.1.1 Atenuación Producida por los Gases Atmosféricos

La absorción molecular experimentada durante la propagación de las ondas radioeléctricas a través de la atmósfera (en longitudes de ondas centimétricas y milimétricas), se debe principalmente al vapor de agua y al oxígeno molecular de la atmósfera. En la figura 1-2 se muestra la atenuación específica (dB/Km) debida a estos elementos para frecuencias de hasta 350 GHz producido por los gases atmosféricos.

El oxígeno tiene una raya de absorción aislada a 118.74 GHz y una serie de rayas muy próximas entre unos 50 y 70 GHz. Estas actúan en las capas inferiores de la atmósfera como una banda de absorción continua.

El vapor de agua tiene principalmente tres rayas de absorción a las frecuencias de 22.3, 183.3 y 323.8 GHz. Por otro lado,

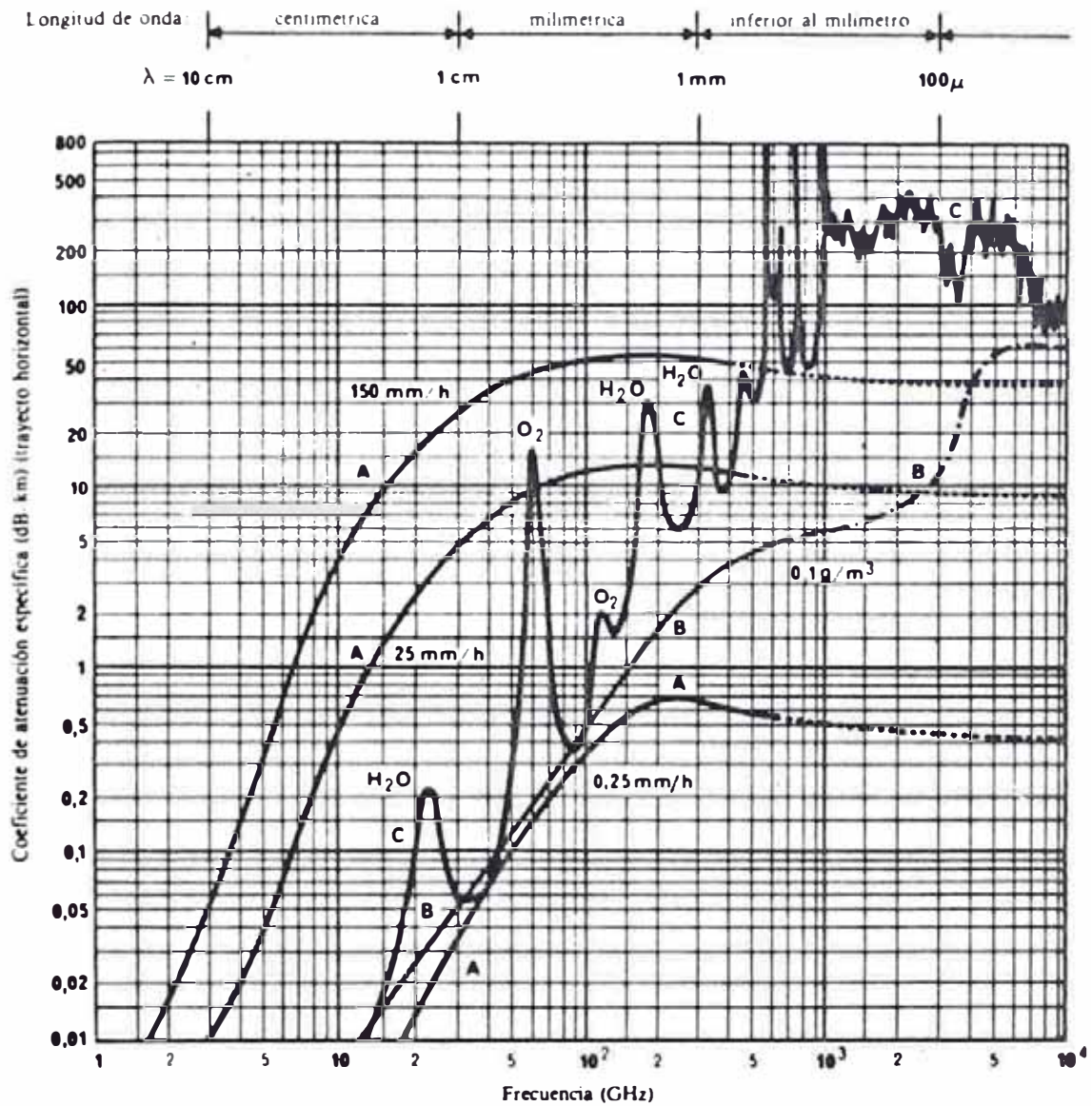


FIGURA 1.1 Atenuación debida a los componentes gaseosos y a las precipitaciones, para las transmisiones a través de la atmósfera

Temperatura: 20° C
 Presión: (al nivel del mar) 1 atm.
 Vapor de agua: 7,5 g/m³

A: Lluvia
 B: Niebla
 C: Componentes gaseosos

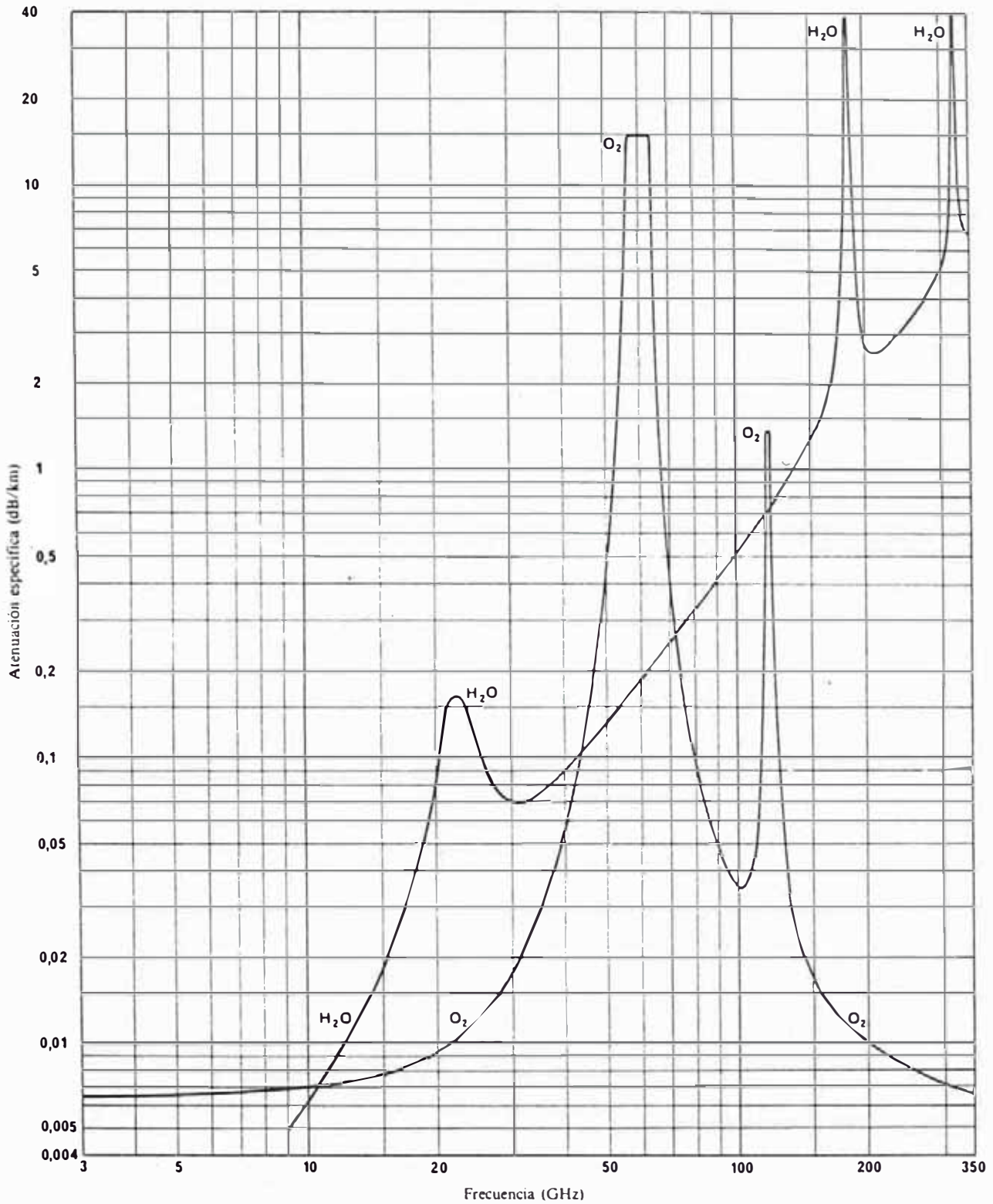


FIGURA 1.2 Atenuación específica debida a los gases atmosféricos

Presión: 1 atmósfera
 Temperatura: 20° C
 Proporción del vapor de agua: 7,5 g/m³

en las bandas submilimétricas e infrarrojas, presentan una serie de rayas, algunas de las cuales muy intensas, cuyas alas contribuyen considerablemente a la absorción de las ondas centimétricas y milimétricas.

La absorción gaseosa total de la atmósfera, A_a (dB), en un trayecto tierra-espacio de longitud r_0 (Km), viene dado por:

$$A_a = \int_0^{r_0} \left(\gamma'_o(r) + \gamma'_w(r) \right) dr \quad (\text{dB})$$

donde γ'_o y γ'_w son los coeficientes de absorción (dB/Km) para el oxígeno y el vapor de agua respectivamente. Esto puede ser expresado por:

$$A_a = \gamma'_{o0} r_{e0} + \gamma'_{w0} r_{ew} \quad (\text{dB})$$

donde γ'_{o0} y γ'_{w0} son los coeficientes de absorción sobre la superficie de la tierra y r_{e0} y r_{ew} son las longitudes de travectoria efectiva del oxígeno y vapor de agua respectivamente. Estas longitudes corresponden a una atmósfera hipotética de densidad constante, a través de la cual se propaga la onda de radio y da una atenuación idéntica a la atmósfera real. Aproximadamente r_{e0} es de 4km y r_{ew} es de 2km.

(a) Coefficiente de Absorción del Oxígeno

La absorción por oxígeno en el rango de 100MHz a 50 GHz está dada por la siguiente expresión:

$$\gamma'_{o0} = I_0 \left(\frac{w_1}{\frac{1}{\lambda^2} + w_1^2} + \frac{w_2}{\left(2 + \frac{1}{\lambda}\right)^2 + w_2^2} + \frac{w_2}{\left(2 - \frac{1}{\lambda}\right)^2 + w_2^2} \right)$$

donde: γ'_{o0} = Atenuación en dB/km.

I_0 = Factor de intensidad de línea.

w_1 = Factor de ancho de línea para absorción no resonante.

w_2 = Factor de ancho de línea para líneas diferentes en la vecindad de 0.5cm.

λ = Longitud de onda.

Los factores I_0 , w_1 y w_2 son dados por:

$$I_0 = \frac{0.34}{\lambda^2} \left(\frac{P}{1.01325} \right) \left(\frac{293}{T} \right)^2$$

$$w_1 = 0.018 \left(\frac{P}{1.01325} \right) \left(\frac{293}{T} \right)^{3/4}$$

$$w_2 = 0.049 \left(\frac{P}{1.01325} \right) \left(\frac{300}{T} \right)^{3/4}$$

donde: P = Presión atmosférica (atmósferas)

T = Temperatura absoluta ($^{\circ}$ K)

(b) Coefficiente de Absorción del Vapor de Agua

La absorción por vapor de agua producto de la línea absorbente de 1.35 cm es dado por:

$$\gamma_{w_0}^A = \rho I_H \left[\frac{w_3}{\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{1.35} \right)^2 + w_3^2} + \frac{w_3}{\left(\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{1.35} \right)^2 + w_3^2} \right]$$

donde $\gamma_{w_0}^A$ = Atenuación en dB/km.

I_H = Factor de intensidad de línea.

w_3 = Factor de ancho de línea para la línea de 1.35 cm.

ρ = Humedad atmosférica absoluta (gm/m^3)

Los factores I_H y w_3 están dados por:

$$I_H = \left(\frac{0.0318}{\lambda^2} \right) \left(\frac{293}{T} \right)^{5/2} \exp \left(\frac{-644}{T} \right)$$

$$w_3 = 0.087 \left(\frac{P}{1.01325} \right) \left(\frac{318}{T} \right)^{1/2} (1 + 0.0046\rho)$$

Los efectos de las bandas mayores ($< 1.35\text{cm}$) es descrita por:

$$\gamma_{w_1}^A = \rho \left[\frac{0.05}{\lambda^2} \right] \left(\frac{293}{T} \right) w_4$$

donde $w_4 = w_3$

En el cuadro 1.1 se indican características típicas de atmósferas bajas estandar y en la figura 1.2 se muestran los valores teóricos de estos coeficientes calculados para el caso de

CUADRO 1-1

CARACTERISTICAS DE ATMOSFERAS BAJAS ESTANDAR

ALTITUD (Km)	TEMP. ABSOLUTA (°K)	PRESION ATMOSF. (mb)	HUMEDAD ABSOLUTA gm/m ³
0	288	1013	7.75
2	275	795	3.80
4	262	616	1.50
6	249	472	0.95
8	236	356	0.14
10	223	294	0.0153
12	216.5	193	0.0053
14	216.5	141	0.0023
16	216.5	103	0.0015
18	216.5	75	0.0018

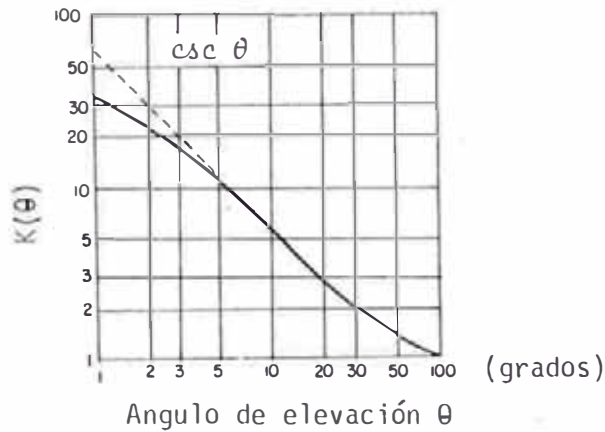


FIG. 1.3 $K(\theta)$ PARA LA ATMOSFERA DE REFERENCIA.

una atmósfera standard obtenida bajo la asunción de que la presión atmosférica es de 1013 mb (presión de 1 atmósfera), temperatura de superficie igual a 20°C y densidad de vapor de agua de 7.5 gm/m³. La figura 1.2 muestra la atenuación total A_a en un sentido, con una antena apuntando en la dirección cenital (90°) a las frecuencias de 1 a 300 GHz. Cuando el ángulo de elevación es θ , la atenuación total $A_a(\theta)$ puede ser calculada multiplicando $A_a(90^\circ)$ por un factor $K(\theta)$ que es mostrado en la figura 1-3.

Finalmente, las características generales de atenuación gaseosa a través de la atmósfera pueden ser resumidas de la forma siguiente:

- 1) La característica predominante de la absorción por vapor de agua se presenta a 22.3 GHz.
- 2) Debajo de los 22.3 GHz la atenuación disminuye, produciendo los menores efectos en las bandas inferiores a 16 GHz.
- 3) Sobre los 22.3 GHz la absorción por vapor de agua cae, para ir aumentando progresivamente.
- 4) Más allá de los 30 GHz, la absorción por oxígeno empieza a predominar. Esta frecuencia Threshold es, sin embargo altamente dependiente de la humedad absoluta instantánea.

En adición:

- 5) La absorción por vapor de agua es altamente variable, estando directamente relacionado con la humedad absoluta. Este valor es variable en cada localidad.
- 6) La absorción por oxígeno es razonablemente constante de localidad en localidad.
- 7) Aparte de las comunicaciones cercanas a la línea absorptiva de 1.35 cm, las atenuaciones debido a los gases atmosféricos no son muy significantes.

1.1.2 Atenuación Producida por la Lluvia

Las precipitaciones pluviales producen absorción y dispersión de las ondas radioeléctricas. Estos efectos se combinan para producir atenuación.

Aunque todas las frecuencias están sometidas a estos efectos,

la atenuación sólo es importante en frecuencias superiores a varios gigahertzios y para porcentajes de tiempo en los que la precipitación es intensa.

La dispersión debido a la lluvia puede evaluarse aproximadamente basándose en la teoría clásica de Mie sobre la dispersión. Suponiéndose que las gotas son esféricas, puede relacionarse la atenuación específica producida por la lluvia -- (dB/km) a una frecuencia determinada y para la intensidad de lluvia R (mm/h), conociendo el índice complejo de refracción del agua a la temperatura de las gotas de lluvia, la velocidad terminal y la distribución del tamaño de las gotas de lluvia.

En la figura 1.4 se muestra el comportamiento de la atenuación específica en función de la frecuencia para varios valores de intensidad de la lluvia. Los valores de la atenuación específica para frecuencias de hasta 40 GHz se han extrapolado en la figura 1.5 para intensidades de lluvia de hasta 250 mm/h. Estas figuras han sido obtenidas en base a datos experimentales de la micro estructura de la lluvia.

Para cualquier intensidad de lluvia la atenuación específica aumenta muy rápidamente hasta frecuencias de unos 100 GHz. Por encima de estas frecuencias, la atenuación específica no aumenta sensiblemente en función de la frecuencia, a no ser intensidades de lluvia muy bajas. Por encima de unos 200 GHz, según sea la intensidad de la lluvia, la atenuación específica disminuye ligeramente a medida que aumenta la frecuencia, hasta 1000 GHz en que ha alcanzado casi su límite óptico.

Cuando la longitud de onda de la señal radioeléctrica es mucho mayor que el tamaño de la gota de lluvia, la atenuación por lluvia es atribuida principalmente a la absorción, mientras que el efecto de dispersión se hace más predominante conforme decrece la longitud de onda. La figura 1.6 muestra la proporción del efecto de dispersión a la atenuación total por lluvia.

(a) Forma y Propiedades Eléctricas de una Gota de Agua

La geometría de las gotas de agua es dependiente de

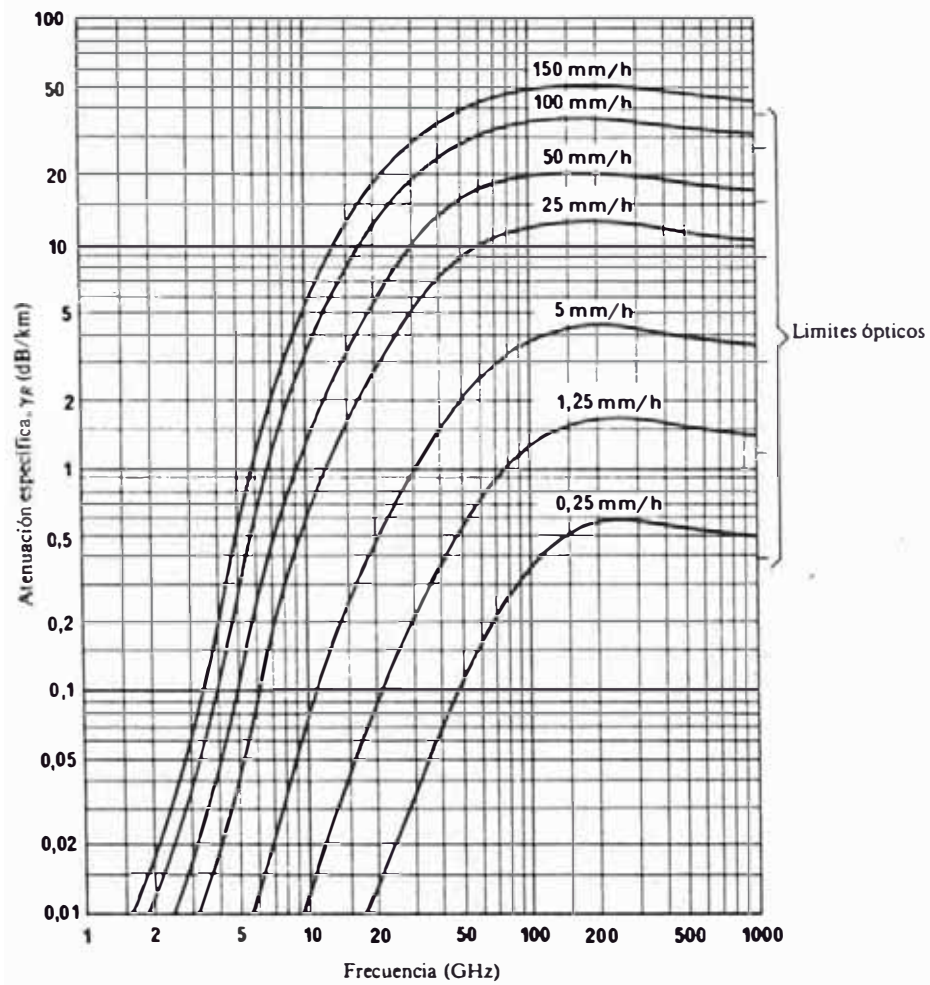


FIGURA 14. Atenuación específica, γ_R debida a la lluvia

Distribución del tamaño de las gotas de lluvia [Laws y Parsons, 1943]

Velocidad terminal de las gotas de lluvia [Gunn y Kinzer, 1949]

Índice de refracción del agua a 20° C [Ray, 1972]

Gotas esféricas

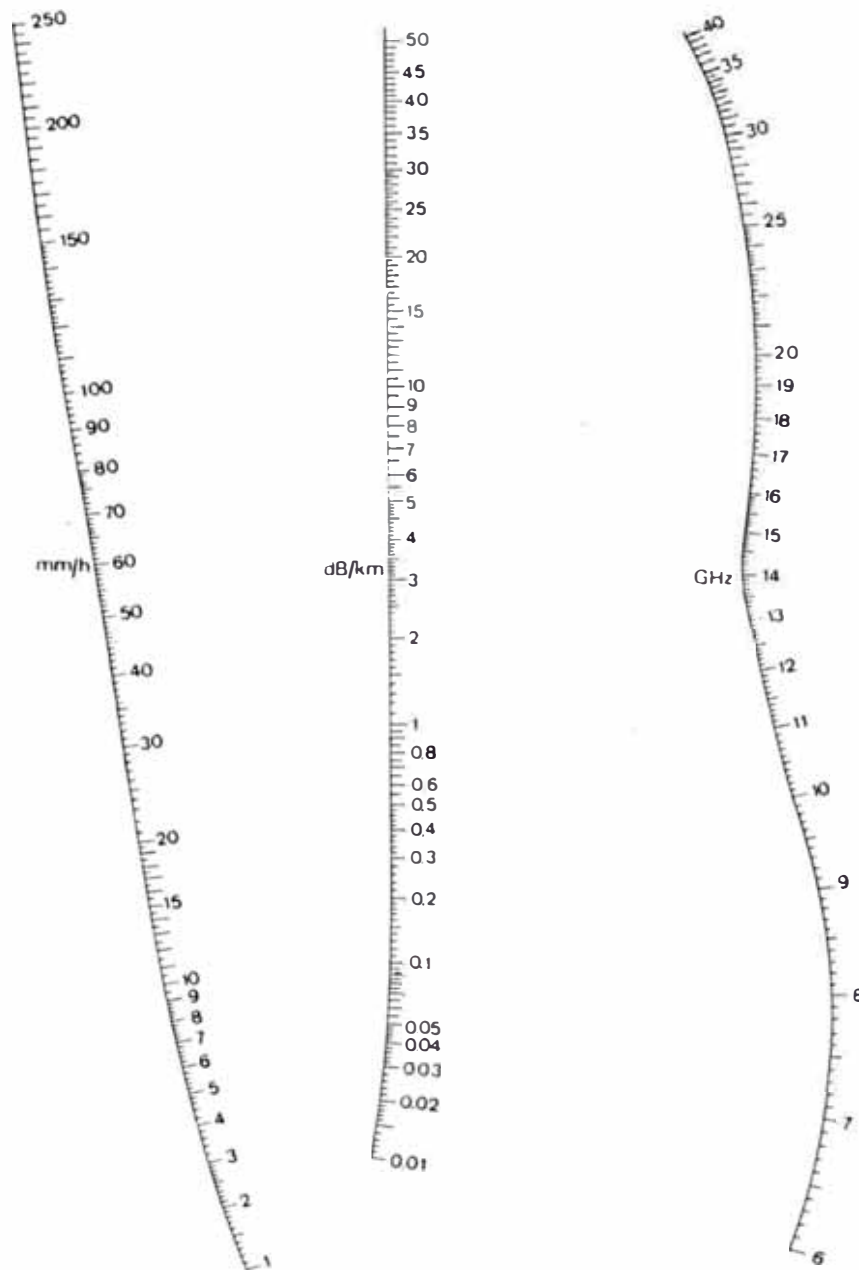


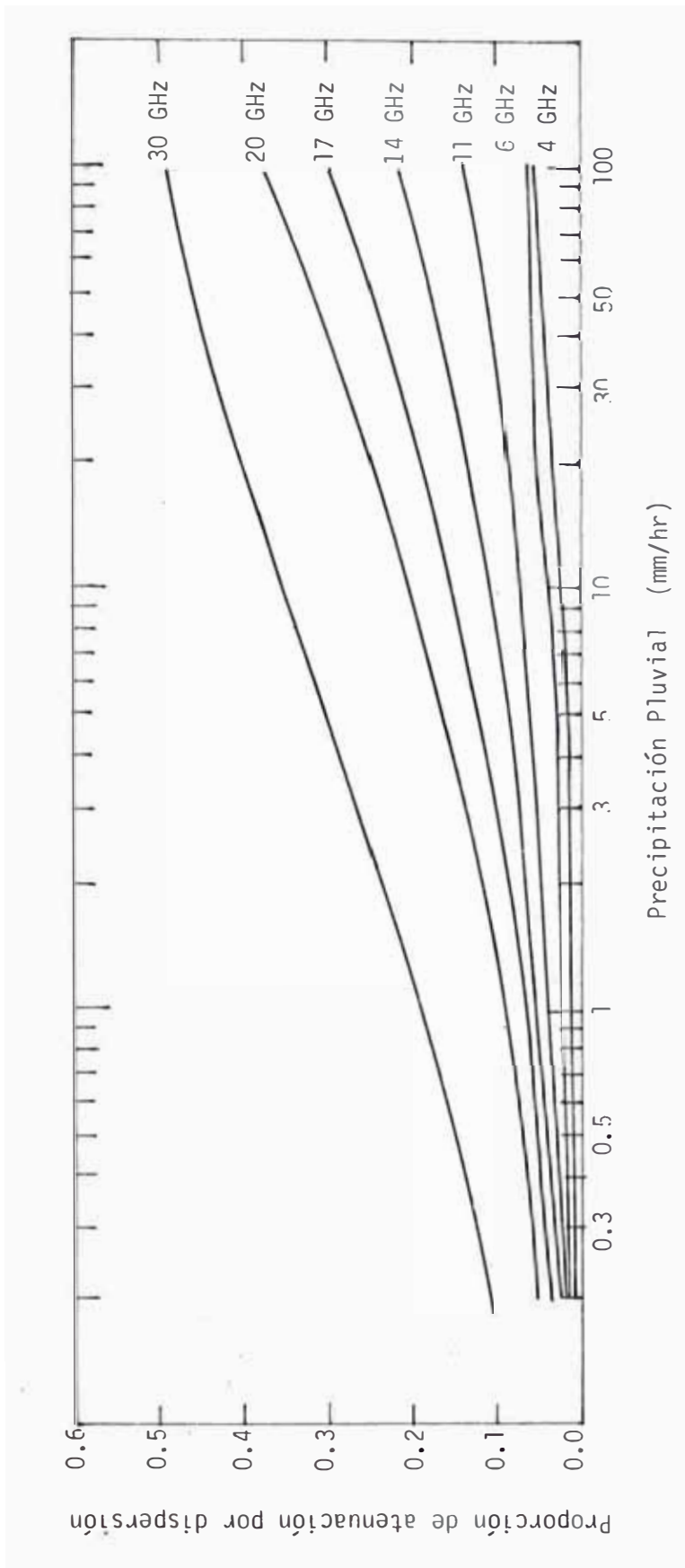
FIGURA 1.5 Atenuación específica, γ_R debida a la lluvia

Distribución del tamaño de las gotas de lluvia [Laws y Parsons, 1943]

Velocidad terminal de las gotas de lluvia [Gunn y Kinzer, 1949]

Índice de refracción del agua a 18° C [Ray, 1972]

Gotas esféricas



Distribución por Tamaño de Gotas: Laws y Parsons
 Temperatura de la gota de lluvia: 10° C

FIGURA 1.6 Proporción de la atenuación por dispersión a la atenuación total por lluvia

complicados mecanismos meteorológicos y aerodinámicos, tales como combinación, colisión, fragmentación, evaporación turbulencia, corrientes ascendentes y perfiles de velocidad terminal.

Generalmente es aceptada una forma esférica para gotas pequeñas (diámetro $< 0.25\text{mm}$), esferoidales para gotas medianas (diámetro $< 1.25\text{mm}$) e irregulares para gotas mayores. En la fig. 1.7 se muestra una variación típica de estas formas.

Basado en un modelo desarrollado por Pruppacher y Pitter, usando balance de fuerzas sobre la gota, la forma de una gota de agua puede ser representado por

$$r(\theta) = a_0 \left(1 + \sum_{n=0} C_n \cdot \cos n\theta \right)$$

donde $r(\theta)$ es la distancia desde el centro de la gota a la superficie formando un ángulo θ . ' a_0 ' es el radio de su esfera equivolumétrica y C_n son los coeficientes de deformación. En la tabla 1.2 se muestran valores de C_n para un valor dado de a_0 .

Las propiedades eléctricas de una gota de agua están muy relacionadas con el conocimiento de su constante dieléctrica, el cual es un número complejo dependiente de su temperatura.

Existen diferentes grupos de ecuaciones para la evaluación de la constante dieléctrica. Los más notables son las ecuaciones de DEBYE, cuyos resultados son mostrados en la figura 1-8.

En cálculos realizados sobre dispersión por gotas de lluvia ha sido demostrado que para diferentes ecuaciones de la constante dieléctrica, resultan diferentes valores de amplitudes de dispersión. Las ecuaciones usadas en el presente estudio corresponden a las ecuaciones empíricas de RAY, expresadas de la siguiente manera:

$$\epsilon_R = \epsilon_\infty + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty) \left[\left(1 + \frac{\lambda_s}{\lambda} \right)^{1-\alpha} \cdot \text{Sen} \left[\frac{\alpha \pi}{2} \right] \right]}{1 + 2 \left(\frac{\lambda_s}{\lambda} \right)^{1-\alpha} \text{Sen} \left[\frac{\alpha \pi}{2} \right] + \left(\frac{\lambda_s}{\lambda} \right)^{2(1-\alpha)}}$$

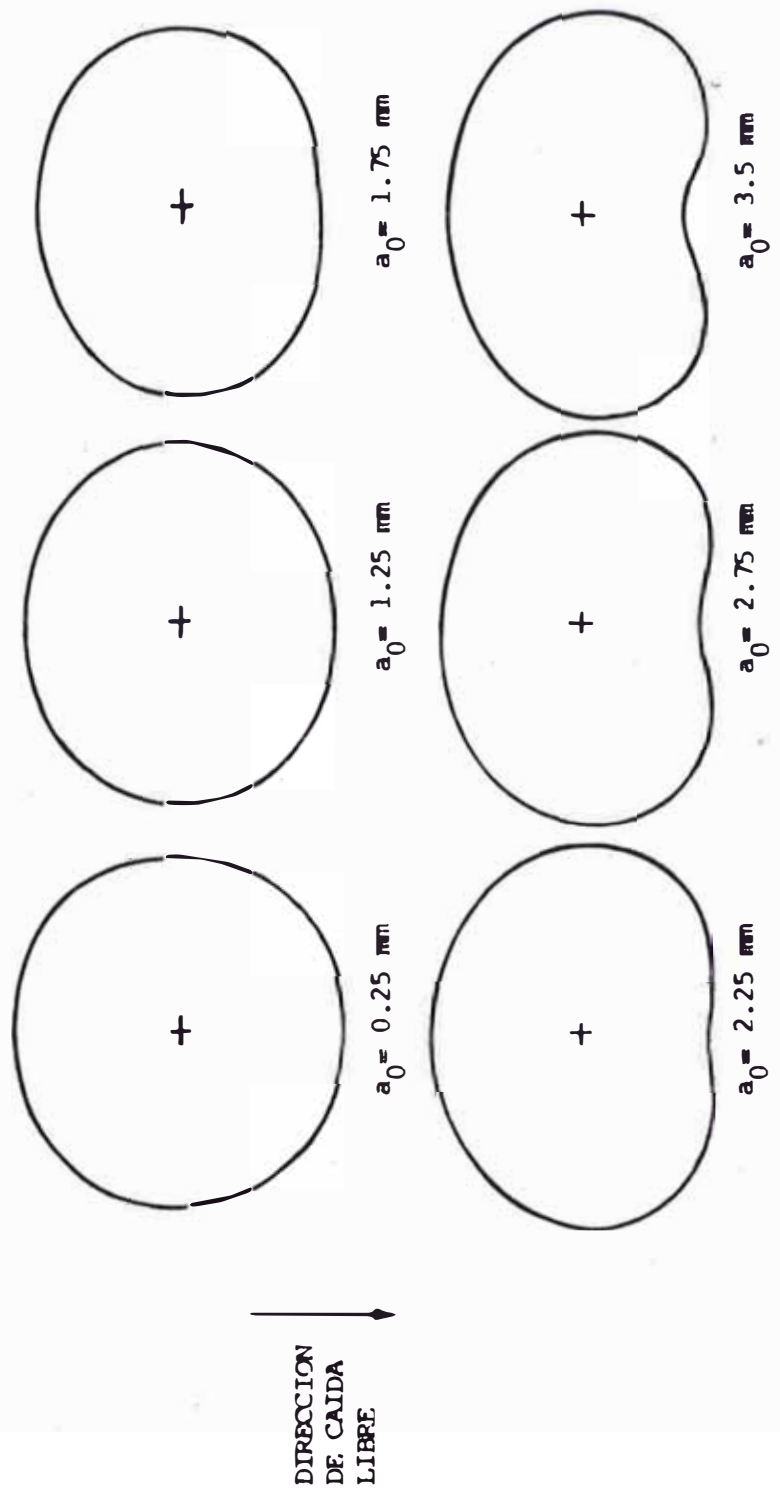


FIG 1.7 DISTRIBUCION DE FORMAS DE UNA GOTTA DE LLUVIA PARA UN VALOR DADO DE a_0 (RADIO EQUIVOLUMETRICO DE UNA ESFERA)

CUADRO 1-2

COEFICIENTES DE DEFORMACION

a_0	C_0	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
0.25	- 38	- 122	- 7	- 6	- 3	- 1	0	0	0
0.50	- 258	- 771	- 155	- 10	9	- 2	0	0	0
0.75	- 639	- 1899	- 457	- 61	29	5	1	- 4	0
1.00	- 1184	- 3540	- 901	- 134	52	17	2	- 9	3
1.25	- 1883	- 5608	- 1465	- 226	80	33	4	- 15	5
1.50	- 2670	- 7948	- 2114	- 330	115	48	5	- 22	8
1.75	- 3487	- 10375	- 2814	- 441	150	63	7	- 29	11
2.00	- 4296	- 12783	- 3539	- 451	182	77	9	- 35	13
2.25	- 5043	- 15003	- 4250	- 661	211	89	11	- 41	15
2.50	- 5734	- 17053	- 4950	- 775	237	102	12	- 47	18
2.75	- 6424	- 19104	- 5708	- 893	259	114	13	- 52	20
3.00	- 7089	- 21070	- 6482	- 1025	283	127	15	- 57	22
3.25	- 7735	- 22973	- 7290	- 1165	306	139	16	- 62	24
3.50	- 8388	- 24888	- 8181	- 1310	318	149	18	- 67	25

* $C_1 = 0$ Los Coeficientes de tabulación han sido multiplicados por 10^5 , esto es : $C_n = C_n$ (tabulado) $\times 10^{-5}$

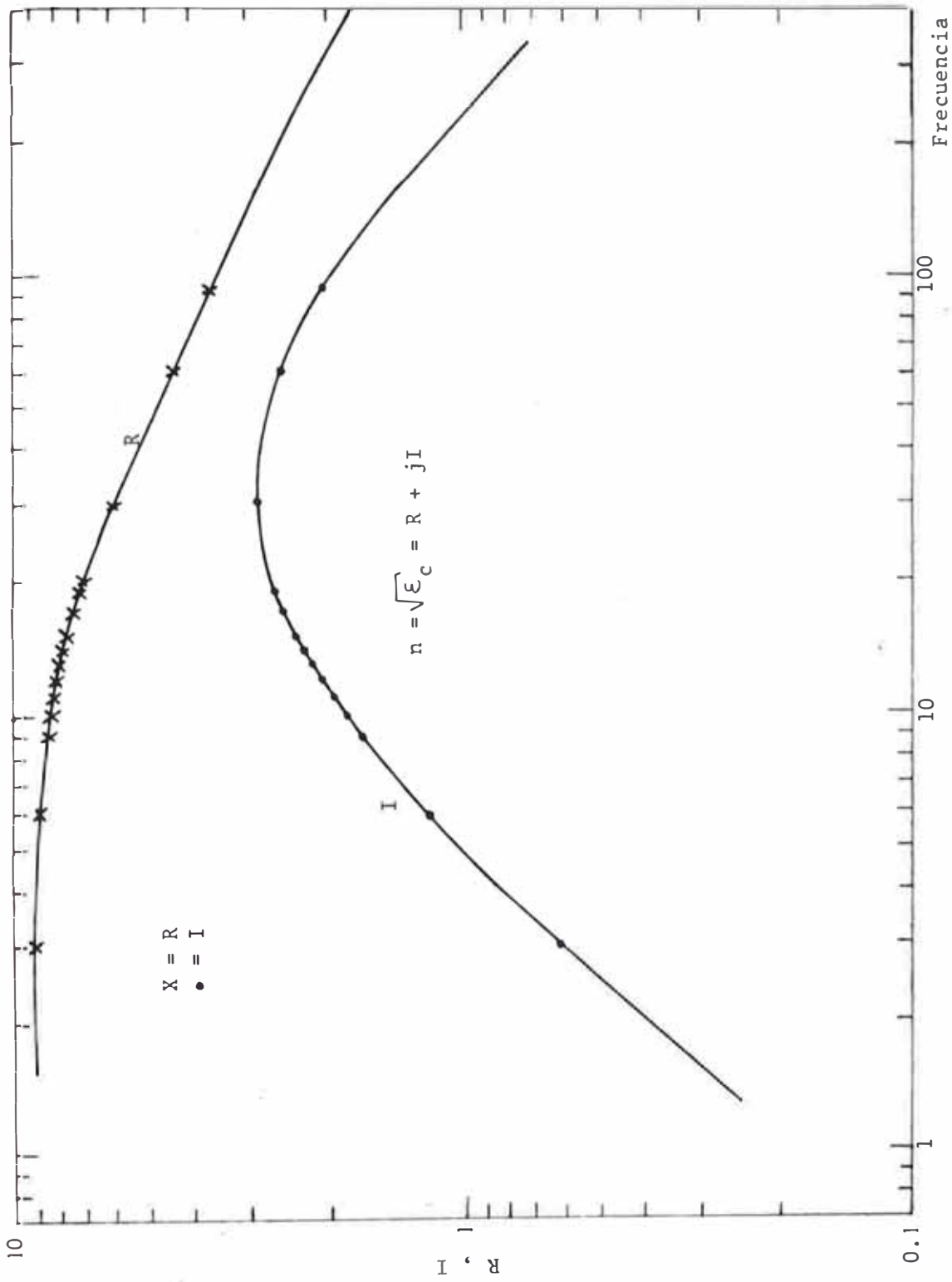


FIGURA 1.8 - INDICE REFRACTIVO COMPLEJO BASADO EN LA FORMULA DE DEBYE
(Temp. = 20°C, $\epsilon_0 = 80$, $\epsilon_\infty = 5.5$, $\Delta\lambda = 1.53$ cm)

$$\epsilon_i = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty) \left(\frac{\lambda_s}{\lambda}\right)^{1-\alpha} \cos\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right)}{2 \left(\frac{\lambda_s}{\lambda}\right)^{1-\alpha} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) + \left(\frac{\lambda_s}{\lambda}\right)^{2(1-\alpha)}} + \frac{\alpha \lambda}{18.8496 \times 10^{10}}$$

donde ϵ_R y ϵ_i son los componentes real e imaginaria de la constante dieléctrica compleja. Los otros parámetros de las ecuaciones de arriba son determinados como:

$$\lambda = \frac{c}{F} \times 10^{-9}$$

$$\epsilon = 78.54 \left[1 - 4.579 \times 10^{-3} (T - 25) + 1.19 \times 10^{-5} (T - 25)^2 - 2.8 \times 10^{-8} (T - 25)^3 \right]$$

$$\epsilon_\infty = 5.27137 + 0.0216474T - 0.00131198T^2$$

$$\alpha = -\frac{16.8129}{T + 273} + 0.0609265$$

$$\lambda_s = 0.00033836 \exp\left(\frac{2513.98}{T + 273}\right)$$

donde $C = 3 \times 10^8$ y F en GHz. La temperatura T , con la que caen las gotas de lluvia, generalmente es elegida como 10°C ó 20°C . El índice refractivo es la raíz cuadrada de la constante dieléctrica.

(b) Distribución de la Lluvia por Tamaño de Gotas

Las distribuciones de tamaño, forma y orientación de las gotas de lluvia pueden variar dentro de una tormenta. Varían de acuerdo a la ubicación, estación, temperatura, viento, tipo de lluvia y niveles de precipitación.

Algunas observaciones realizadas, muestran que como media la distribución del tamaño de las gotas es relativamente estable, variando fundamentalmente con la intensidad de la precipitación.

De los diferentes modelos desarrollados, la distribución

CUADRO 1-3 DISTRIBUCION DE LARIS Y PARSONS
PARA EL TAMAÑO DE GOTAS

PRECIPITACION PLUVIAL (mm/hr)	PORCENTAJE DEL VOLUMEN TOTAL %									
	0.25	1.25	2.5	5	12.5	25	50	100	150	
0.05	28.0	10.9	7.3	4.7	2.6	1.7	1.2	1.0	1.0	1.0
0.1	50.1	37.1	27.8	20.3	11.5	7.6	5.4	4.6	4.1	4.1
0.15	18.2	31.3	32.8	31.0	24.5	16.4	12.5	8.8	7.0	7.0
0.2	3.0	13.5	19.0	22.2	25.4	23.9	19.9	13.9	11.7	11.7
0.25	0.7	4.9	7.9	11.8	17.3	9.9	20.9	17.1	13.9	13.9
0.3		1.5	3.3	5.7	10.1	12.8	15.6	18.4	17.7	17.7
0.35		0.6	1.1	2.5	4.3	8.2	10.9	15.0	16.1	16.1
0.4		0.2	0.6	1.0	2.3	3.5	6.7	9.0	11.9	11.9
0.45			0.2	0.5	1.2	2.1	3.3	5.8	7.7	7.7
0.5				0.3	0.6	1.1	1.8	3.0	3.6	3.6
0.55					0.2	0.5	1.1	1.7	2.2	2.2
0.6						0.3	0.5	1.0	1.2	1.2
0.65							0.2	0.7	1.0	1.0
0.7									0.3	0.3
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

para el tamaño de las gotas de Laws y Parsons (1943), se ha mostrado la más útil en la estimación de la atenuación y las propiedades de dispersión de la lluvia a frecuencias de hasta 40 GHz aproximadamente. Las concentraciones relativas de pequeñas gotas con diámetros inferiores a 0.5 mm., no se ajustan al modelo de la distribución Laws y Parsons y algunas veces se hace uso de la distribución de Marshall Palmer (1948) para remediar este defecto. La concentración relativa de pequeñas gotas puede variar fuertemente y el empleo de un único modelo puede no ser adecuado para todos los lugares.

En el cuadro 1.3 se muestra la distribución de Laws y Parsons para el tamaño de las gotas.

(c) Velocidad Terminal de las Gotas de Lluvia

Las velocidades de las gotas dependen de la densidad del aire y por lo tanto son función de la altura. De observaciones realizadas con radar se obtiene que el número y tamaño de las gotas de lluvia, así como el contenido de agua líquida en un volumen determinado, varía muy ligeramente con la altura. En consecuencia, la atenuación específica, que dependen principalmente del contenido de agua, variará también ligeramente con la altura.

Las mediciones registradas de las velocidades han sido puestas en función del tamaño de las gotas. Generalmente han sido realizadas en el laboratorio, en condiciones de calma, pero se han supuesto para aplicarse en la atmósfera.

Un grupo de datos típicos está dado en la tabla 1.4, basado en el trabajo de Best y Mason. Otras relaciones empíricas son mostrados en el cuadro 1-5.

(d) La Teoría de MIE

La geometría para el análisis de dispersión por partícula simple es mostrado en la figura 1-9, donde 'a' es el radio de una esfera equivolumétrica. El vector unitario

CUADRO 1-4 VELOCIDAD TERMINAL DE UNA GOTA
CAYENDO A TRAVES DE LA ATMOSFERA

DIAMETRO DE UNA GOTA, D (cm)	VELOCIDAD TERMINAL V(D), m/s
0.05	2.06
0.10	4.03
0.15	5.40
0.20	6.49
0.25	7.41
0.30	8.06
0.35	8.53
0.40	8.83
0.45	9.00
0.50	9.09
0.55	9.13
0.60	9.14
0.65	9.14
0.70	9.14

CUADRO 1-5

Valores de a y b para una relación empírica entre la Velocidad Terminal V(D) y diámetro de gota D, (V en cm/sg y D en cm estan relacionadas por:

$$V = a \cdot D^b$$

REFERENCIA	a	b
SPIIHAUS	1.420×10^3	0.5
SEKION Y STRIVASTAVA	1.690×10^3	0.6
LIU Y ORVILLE	2.115×10^3	0.8

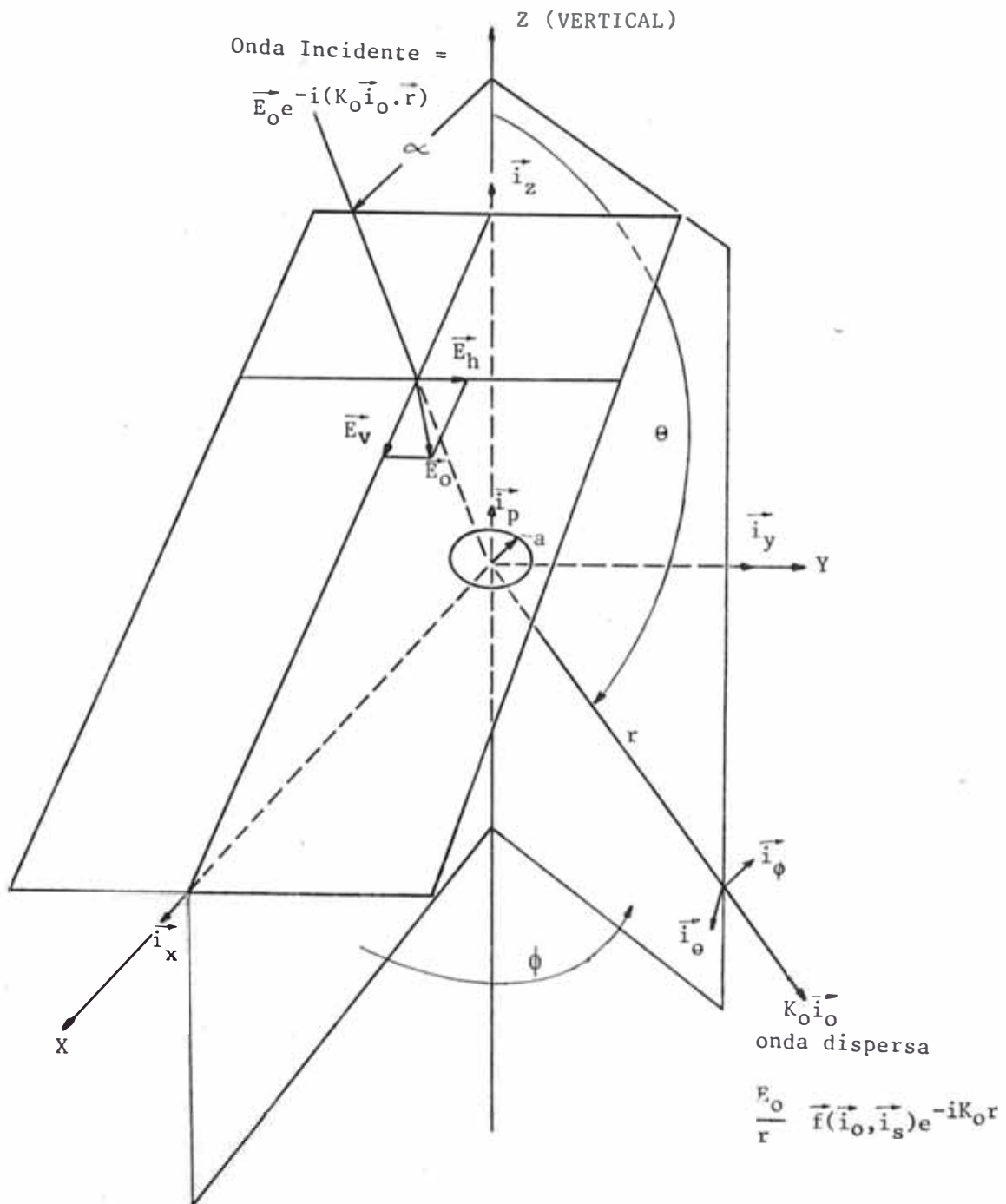


FIGURA 1.9 - GEOMETRIA PARA EL CALCULO DE DISPERSION

del eje de simetría de la gota es denotado por i_p . El eje x es escogido de manera que la onda incidente,

$$\vec{E}_0 e^{-i(k_0 \vec{i}_0 \cdot \vec{r})}$$

se propague en una dirección sobre el plano x-z, con un vector unitario de frente de onda i_0 , haciendo un ángulo $(\pi - \alpha)$ con el eje vertical Z. En general, el campo de la onda incidente, E_0 , puede ser descompuesta en una componente polarizada horizontalmente, \vec{E}_h , y una componente polarizada verticalmente \vec{E}_v , para propósitos de análisis de dispersión por separado. Las ondas dispersadas resultantes,

$$\begin{pmatrix} E_0 \\ r \end{pmatrix} f_0(\vec{i}_0, \vec{i}_s) e^{-iK_0 r}$$

se propagan en forma de ondas esféricas. El vector amplitud $f_0(\vec{i}_0, \vec{i}_s)$ a lo largo de la dirección de dispersión especificada, i_s , es la cantidad a ser obtenida por cálculos teóricos.

Para el caso de partículas esféricas perfectas, Gustav Mie (1908) desarrolló una teoría completa para la obtención de la atenuación de ondas electromagnéticas. Las asunciones básicas de esta teoría son las siguientes:

1. Las gotas de lluvia están dispersas aleatoriamente con una densidad promedio uniforme, a través del espacio entre las antenas de transmisión y recepción.
2. Para cada gota es asumida un frente de onda plana. Esto es una buena aproximación para la mayoría de las trayectorias de la señal, pero no así en regiones de campo cercano de cada antena.
3. La interacción entre gotas se asume que es despreciable. Esto lo estableció Ryde, asumiendo que la distancia entre gotas es mayor que cinco veces su diámetro, como es normalmente el caso. Trinks también ha demostrado teóricamente que la interacción mutua también es

despreciable para espaciamientos mayores a 2 ó 3 veces el diámetro de la esfera.

Con estas asunciones la expresión derivada por Mie para la atenuación de ondas de radio debido a gotas de agua de igual diámetro y concentración uniforme es:

$$\text{Atenuación} = 4.343 \frac{N \lambda^2 A_i}{2\pi} \times 10^5 \text{ (dB/km)}$$

donde: N = Número de gotas/cc
 λ = Longitud de onda (cm)
 A_i = Parte real de $\sum_{n=1}^{\infty} (a_n + p_n)$

donde:

$$a_n = (2n + 1) \left(\frac{S_n(\alpha) \cdot S'_n(m\alpha) - m \cdot S'_n(\alpha) \cdot S_n(m\alpha)}{\emptyset_n(\alpha) \cdot S'_n(m\alpha) - m \cdot \emptyset'_n(\alpha) \cdot S_n(m\alpha)} \right)$$

$$p_n = (2n + 1) \left(\frac{m \cdot S_n(\alpha) \cdot S'_n(m\alpha) - S'_n(\alpha) \cdot S_n(m\alpha)}{m \cdot \emptyset_n(\alpha) \cdot S'_n(m\alpha) - \emptyset'_n(\alpha) \cdot S_n(m\alpha)} \right)$$

La prima denota la derivada con respecto al argumento

$$S_n(x) = \left(\frac{\pi x}{2} \right)^{0.5} \cdot J_{n+0.5}(x)$$

$$C_n(x) = (-1)^n \left(\frac{\pi x}{2} \right)^{0.5} \cdot J_{-(n+0.5)}(x)$$

donde $J_\nu(x)$ es la función Bessel de primera clase de orden ν

$$\emptyset_n(x) = S_n(x) + i \cdot C_n(x)$$

$$\alpha = \frac{\pi D}{\lambda}$$

donde: D es el diámetro de la gota (cm)
 m es la raíz cuadrada de la constante dieléctrica compleja de agua.

La figura 1.4 muestra el resultado de estos cálculos.

1.1.3 Atenuación Producida por Nubes de Agua

Las atenuaciones causadas por las nubes o niebla son relativamente pequeñas, pero pueden ocurrir durante elevados porcentajes de tiempo.

Las nubes o niebla están constituidas enteramente por gotitas de agua de dimensiones generalmente inferiores a 0.01cm. Una buena aproximación desarrollada es la de Rayleigh que expresa la atenuación en función del contenido total de agua por unidad de volumen. Así la atenuación específica que se produce dentro de la nube o niebla de tal tipo puede expresarse -- por la fórmula:

$$\gamma_c^A = K_1 \cdot M$$

Siendo γ_c^A la atenuación específica (dB/km) en la nube
 K_1 Coeficiente de atenuación específica (dB/km)/(g/m³)
 M Contenido de agua en estado líquido de la nube (g/m³)

La figura 1-10 muestra los valores teóricos del coeficiente de atenuación específica en función de la frecuencia para diversas temperaturas comprendidas entre -8°C a 20°C.

El cuadro 1-6 muestra el contenido de agua en estado líquido de diferentes tipos de nubes. Estas densidades son valores típicos y pueden ser usados aún cuando en condiciones reales varíe fuertemente.

Para el caso de la niebla, la atenuación llega a ser importante a frecuencias del orden de 100 GHz o más. El contenido de agua para una niebla de intensidad media (visibilidad del orden de 300m) es típicamente de 0.05g/m³ y de 0.5 g/m³ para -- una niebla densa (visibilidad del orden de 50 m).

1.1.4 Atenuación Debida al Agua en sus Diferentes Fases de Congelación.

(a) Por Nubes de Hielo:

Dado la diferencia de propiedades dieléctricas, las nubes constituidas por partículas de hielo causan atenuaciones que son de órdenes de magnitud menos importantes que las causadas por nubes de agua, aunque el contenido

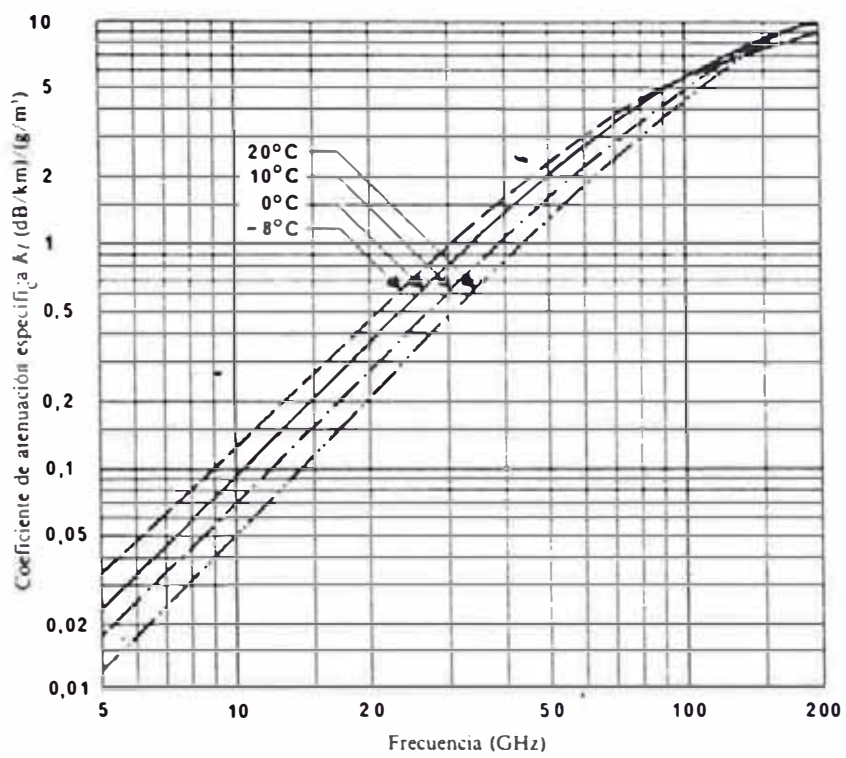


FIGURA 1.10 Atenuação teórica debida a nubes de agua en función de la frecuencia, para distintas temperaturas

CUADRO 1-6 DENSIDAD TIPICA (gm/m^3) SEGUN TIPOS DE NUBES

TIPO	CAPA	ALTURA SUP/NUBE (metros)	DENSIDAD (gm/m^3)	COMPOSICION
- Cirrostratus, artico		4000/6000	0.1	hielo
- Cirrostratus, Lat. med.		5000/7000	0.1	hielo
- Cirrostratus, tropical		6000/8000	0.1	hielo
- Cumulus alto		2400/2000	0.15	agua
- Estratus alto		2400/2900	0.15	agua
- Estratus bajo		150/650	0.25	agua
- Estratus bajo		500/1000	0.25	agua
- Capas de neblina		0/50	0.15	agua
- Neblinas gruesas		0/1500	0.001	agua
- Llovisna (0.2 mm/hr)	1	0/500	1.0	lluvia
	2	500/1000	2.0	agua
	3	1000/1500	1.0	agua
- Lluvia moderada (3 mm/hr)	1	0/130	0.2	lluvia
	2	150/500	1.0	agua
	3	500/1000	2.0	agua
	4	1000/1500	1.0	agua
- Lluvia moderada (15 mm/hr)	1	0/300	1.0	lluvia
	2	300/1000	2.0	agua
	3	1000/2000	3.0	agua
	4	2000/4000	2.0	agua
- Estratocumulus 1		330/660	0.25	agua
- Estratocumulus 2		660/1320	0.25	agua
- Cumulus en buen tiempo	1	500/1000	0.5	agua
	2	1000/1500	1.0	agua
	3	1500/2000	0.5	agua
- Cumulus con lluvia (2.4 mm/hr)	1	0/400	0.1	lluvia
	2	500/1000	1.0	agua
	3	1000/3000	2.0	agua
- Cumulus con lluvia	1	0/400	0.5	lluvia
	2	400/1000	2.0	agua
	3	1000/4000	4.0	agua
- Cumulus congestus	1	1000/1200	0.3	agua
	2	1200/1600	0.5	agua
	3	1600/2000	0.8	agua
	4	2000/2500	1.0	agua
	5	2500/3000	0.5	agua
- Cumulonimbus con lluvia (100 mm/hr)	1	0/300	6.0	lluvia
	2	300/1600	7.0	agua
	3	1000/4000	8.0	agua
	4	4000/6000	4.0	agua
	5	6000/8000	3.0	agua
	6	8000/10000	0.2	hielo

de agua sea el mismo en ambos casos, hasta 35 GHz. A frecuencias superiores, la atenuación por nubes de hielo puede ser importante.

La figura 1-11 muestra una distribución teórica del coeficiente de atenuación específica en función de la frecuencia para diversas temperaturas.

(b) Por Nieve y Granizo:

La nieve seca empieza a ser importante a frecuencias mayores de 50 GHz. En cuanto al granizo, que es un fenómeno generalmente infrecuente, parece tener importancia solo en porcentajes de tiempo inferiores al 0.001 para la mayoría de las regiones climáticas.

Las precipitaciones en forma de nieve húmeda pueden provocar atenuaciones mayores que una precipitación equivalente de lluvia. Sin embargo, debido también a lo poco frecuentes, estos fenómenos no dominan las estadísticas de atenuación. La degradación de las características de la antena debida a acumulaciones de nieve y hielo puede tener mayor importancia que la presencia de nieve a lo largo del trayecto.

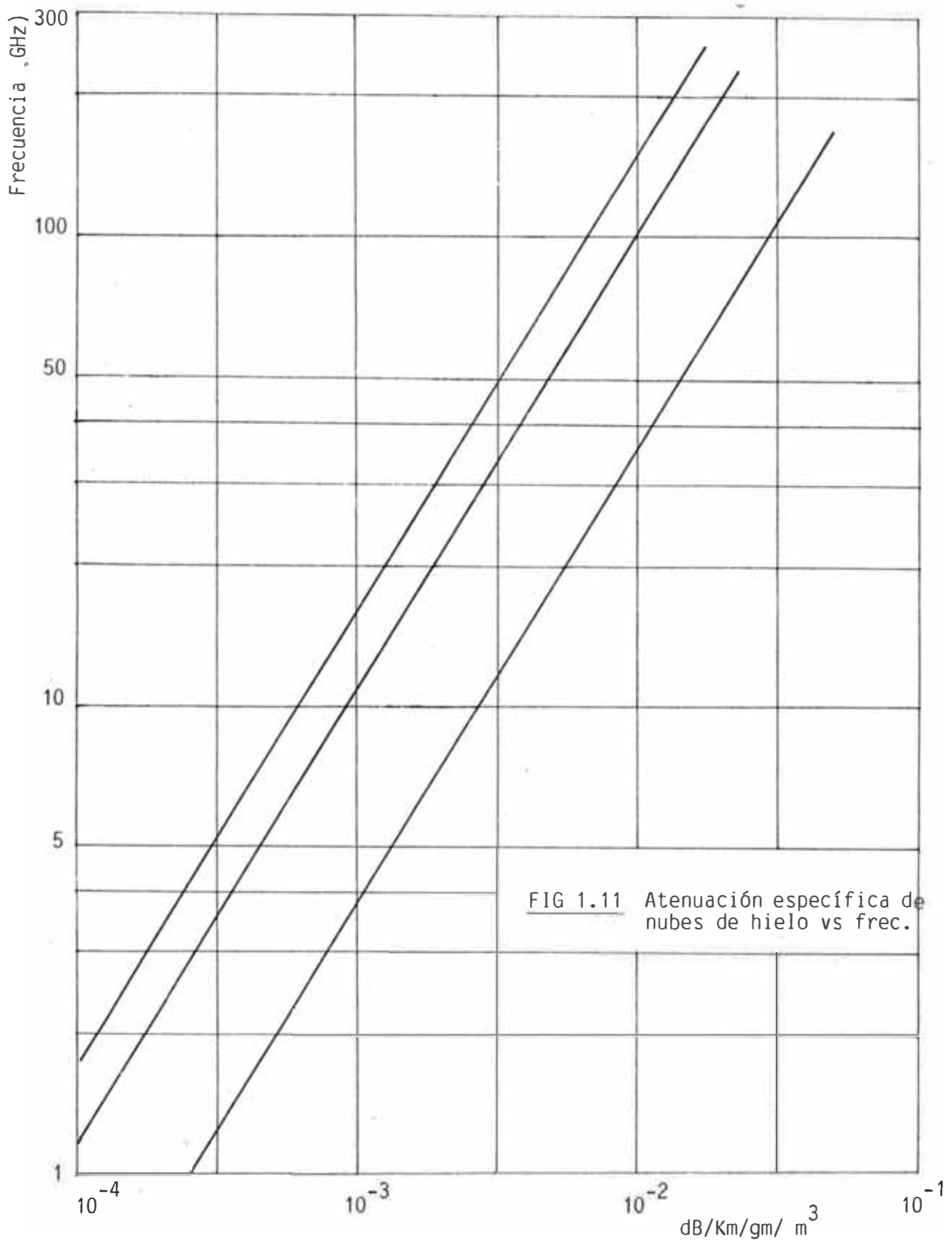
1.2 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA ATENUACIÓN POR LLUVIA

Desde que las precipitaciones pluviales son inhomogéneas en tiempo y espacio y fuertemente dependientes de cada localidad particular y del período estacional, es necesario realizar mediciones durante largos períodos de tiempo, a fin de obtener características precisas de la atenuación por lluvia. Estas mediciones pueden ser realizadas mediante:

- 1) Rastreadores de sol
- 2) Radiómetros Pasivos
- 3) Señales Beacoms de Satélites
- 4) Radares

1.2.1 Rastreadores de Sol (Suntracker)

El sol es una importante fuente de ruido variable. Su día -



metro visto desde la tierra, subtendiendo un ángulo de 0.5 grados aproximadamente. Si una antena de Microondas apuntase directamente al sol, observará una temperatura de brillo T_s , que es una medida de la energía del sol captada por la antena dentro de un ángulo menor de 0.25 grados de su eje axial.

La figura 1.12 muestra el resultado de mediciones de esta temperatura en condiciones de calma solar a diferentes frecuencias. En condiciones de actividad solar, se producen incrementos de hasta cuatro veces la temperatura de brillo anterior.

La energía del sol que pasa a través de un receptor de ancho de banda B alimentado por la antena, es igual a: $KT_s B$, donde K es la constante de Boltzmann. En esta relación el sol es tratado semejante a un cuerpo negro emitiendo ruido a la temperatura T_s , y se asume que la atmósfera de la tierra es transparente, pero esto último nunca es verdad. Si consideramos una atenuación constante α a lo largo de toda la trayectoria " λ " a través de la atmósfera, la energía del sol en el receptor puede ser escrita de la forma: $KT_s B e^{-\alpha \lambda}$

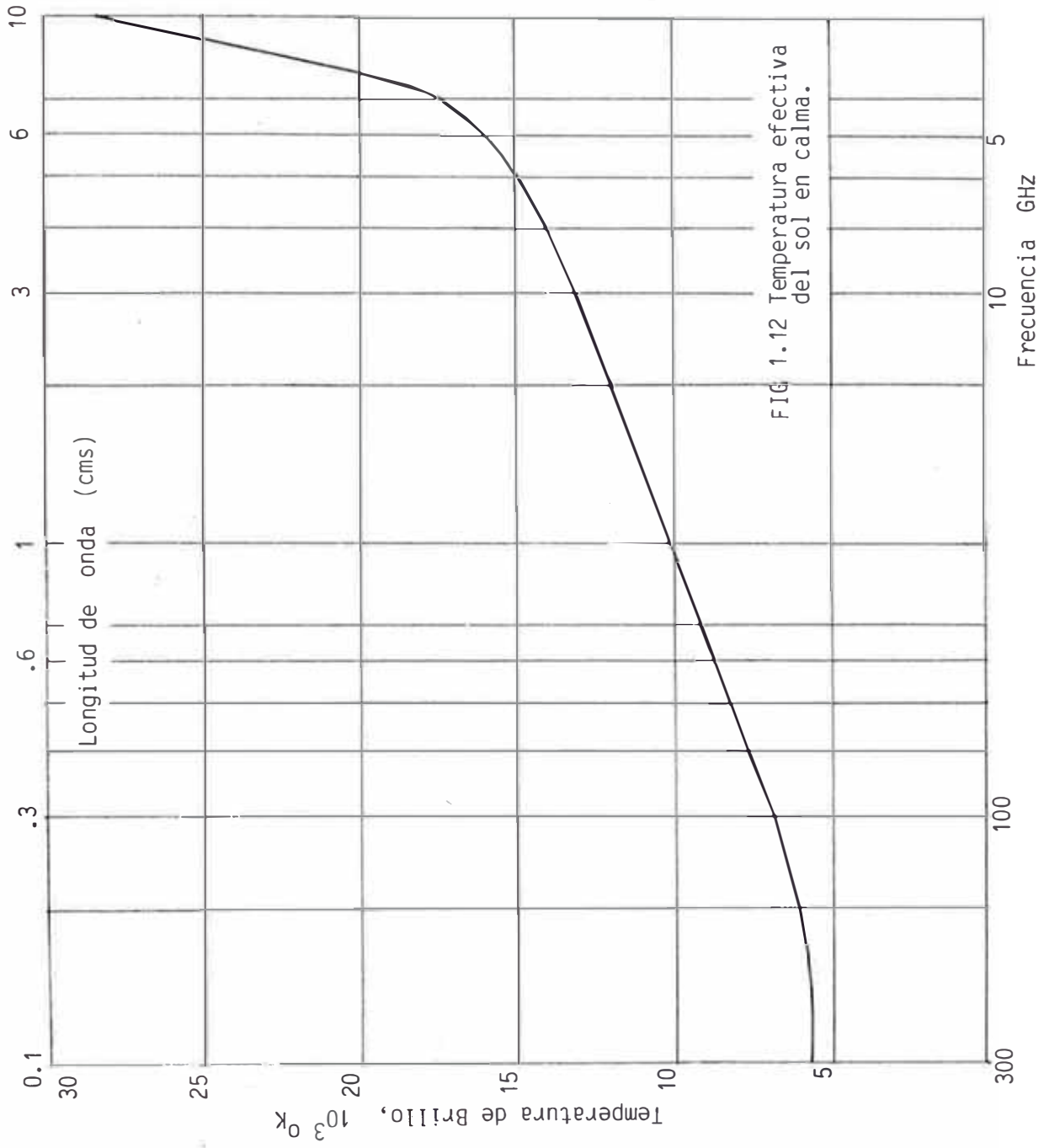
La capacidad de un sistema para realizar mediciones de atenuación está usualmente limitada por el ruido del sistema mismo. En un Suntracker el sistema presenta ruido en el equipo de recepción y en el material que atraviesa a lo largo de su trayectoria, que es la atenuación que se quiere medir. En la tropósfera el material atenuante está conformado por el oxígeno, vapor de agua y a veces el agua líquida, lo que en conjunto producen una temperatura de absorción aparente, T_a .

Este material absorbente produce una energía de ruido eficaz igual a:

$$KT_b B = KB \int_0^{\lambda} \alpha T_a e^{-\alpha r} dr = KT_a B (1 - e^{-\alpha \lambda})$$

Por consiguiente, aún con un receptor de bajo ruido, la potencia observada apuntando al sol será:

$$KT_s B e^{-\alpha \lambda} + KT_b B = KB \left[T_s e^{-\alpha \lambda} + T_a (1 - e^{-\alpha \lambda}) \right]$$



donde T_b es la temperatura de brillo de la tropósfera. T_s es --
 dado en la figura 1-12.

Existe un modo de operación suntracker que provee un mayor ran-
 go dinámico de mediciones. Este método implica el uso de un
 sistema de conmutación espacial de haz que hace que se reciba
 o no la energía radiante del sol. Para entender este método
 partamos de la ecuación anterior, donde se define la temperatu-
 ra efectiva que ingresa a la antena igual a:

$$T_e = T_s e^{-\alpha l} + T_a (1 - e^{-\alpha l})$$

Cuando el haz de la antena es conmutado fuera de su apuntamien-
 to solar, la antena verá solo la temperatura de ruido produci-
 do por la lluvia, esto es:

$$T_e = T_b = T_a (1 - e^{-\alpha l})$$

Si la conmutación es bastante rápida, la ecuación (1) puede
 ser restada electrónicamente de la ecuación (2) en el receptor,
 resultando:

$$T_e = e^{-\alpha l} T_s$$

permitiendo que el valor de $\exp(-\alpha l)$ pueda ser deducido del
 valor medido de T_e .

Existen dos maneras, al menos de realizar la conmutación ante-
 rior: (a) Empleando dos alimentadores en el plano focal del re-
 flector, (b) variando mecánicamente la dirección del haz. Una
 forma de realizar esto último es empleando una antena horn re-
 flector conjuntamente con un plato reflector móvil como mostra-
 mos en la figura 1-13. En este arreglo, el plato reflector se
 mueve alrededor de su eje polar de acuerdo a la hora del día,
 reflectando la radiación solar a la antena. Por otro lado, la
 antena esta montada sobre un cojinete de billas y realiza un
 movimiento de oscilación alrededor de su eje ortogonal, con una
 frecuencia de 1 Hz y 2.5^0 de amplitud angular.

La luna puede ser usada también como una fuente, pero su tempe-

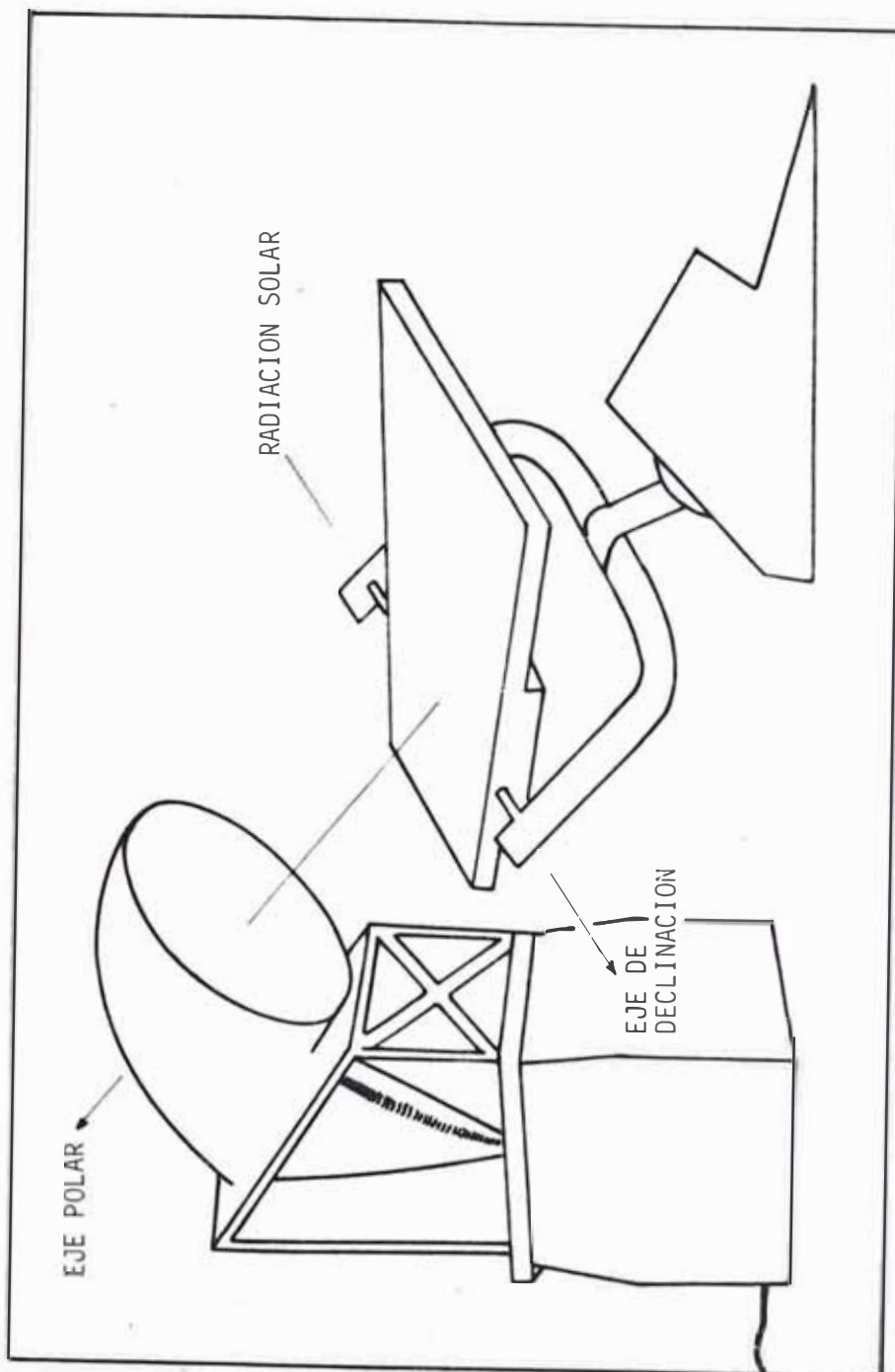


FIG 1.13 Suntracker que usa un plato reflector con movimiento polar que cabecea alrededor del eje de declinación para conmutar el haz.

ratura de brillo es solo del orden de 220°K sobre la banda de frecuencias de 3 a 300 GHz, que es alrededor de 17 dB menos que la temperatura de brillo del sol a 30 GHz.

1.1.2 Radiómetros Pasivos

Todos los objetos a temperaturas superiores al cero absoluto irradian energía en forma de ondas electromagnéticas. El receptor capaz de medir tales ondas es conocido como Radiómetro. Como es sabido, un objeto no solo irradia energía sino también absorbe y refleja energía cuando una señal incide sobre él. La reflexión produce ondas dispersas, mientras que la absorción produce calor y reradiación. Es precisamente esta energía de reradiación que el radiómetro está diseñado para medir. En realidad las mediciones tienden a complicarse, y pueden ser infravaloradas, debido a que las ondas dispersas por reflexión siempre se mezclan con las ondas reradiadas (ver figura 1.6). El método es conocido como radiómetro pasivo por no emplear fuente alguna como son el sol o el beacon de algún satélite.

Si asumimos que la energía de las ondas dispersas es despreciable y que el proceso de reradiación es un proceso de radiación por cuerpo negro, la temperatura del objeto puede deducirse fácilmente de las mediciones radiométricas. Las ecuaciones básicas del método son dadas en el capítulo 3.

Un radiómetro está conformado por un receptor electrónico y una antena de alta calidad. El ruido de fondo total del sistema alcanza valores muy pequeños y pueden ser determinados por calibración. Esta temperatura es generada por la antena y el espacio cuando no está presente la lluvia y es fuertemente dependiente de los gases atmosféricos y del ángulo de elevación de la antena. Cualquier ruido adicional que aparezca en el receptor, por ejemplo el ruido ocasionado por una tormenta ingresando al haz de la antena, es medido fácilmente observando el incremento en el detector final del receptor.

Además del sistema radiométrico se emplea un pluviómetro a fin de obtener una adecuada correlación entre la temperatura de la antena y la intensidad de precipitación de una lluvia particular.

Algunas veces, la lluvia puede interferir con el haz de la antena y caer a una determinada distancia del lugar de observación. Generalmente los niveles de precipitación están retardados con respecto a la temperatura de ruido. Esto ocurre más pronunciadamente en observaciones donde se emplean antenas con sus haces orientados hacia el cenit, debido a que en una lluvia típica, que se mueve con el viento, se producen inclinaciones según el perfil del viento, los cuales se incrementan con la altura, causando que la lluvia interfiera con el haz de la antena antes de llegar al pluviómetro. Esto -- significa que la lluvia es detectada antes de llegar a tierra.

1.2.3 Señales Beacon de Satélites

En los trayectos tierra-espacio, el empleo de señales beacon desde satélites constituye el método más directo para la obtención de niveles de atenuación. Sin embargo, no siempre se disponen de dichas transmisiones para las ubicaciones, frecuencias y ángulos de elevación de interés.

Una señal beacon proviene de un oscilador a cristal muy estable instalado en un satélite. Esta señal tiene una energía conocida y suficiente como para sobreponerse a los mayores niveles de atenuación producidos por la lluvia, dando siempre una relación S/N medible, obteniendo el nivel de atenuación rápidamente.

1.2.4 Radares

Las mediciones de reflexión por radar es otro método indirecto de obtención de las características de atenuación por lluvia. Está basado en la medición de la energía de reflexión retroactiva. Esto es, la energía de las señales de radar que se reflejan en las nubes y en las gotas de lluvia.

El radar tiene potencialmente la capacidad de observar la lluvia que se extiende en amplias zonas y alturas. Existen diversos tipos de radares, como son de una frecuencia, de doble frecuencia y de doble polarización.

Los radares de doble frecuencia permiten diferenciar las re -

giones de lluvia de aquellas de hielo. El empleo del radar de diversidad de polarización permite distinguir entre la lluvia y otros hidrometeoros. Además de efectuar esta diferenciación, puede ser adaptada para determinar las características de distribución del tamaño de las gotas.

En la figura 1-14 se muestran las diferentes técnicas que se emplean para medir las atenuaciones producidas por la lluvia. De los métodos explicados, el presente estudio corresponde a mediciones realizadas con radiómetros pasivos. Todos los -- equipos han sido proporcionados por COMSAT LABORATORIES a través de INTELSAT.

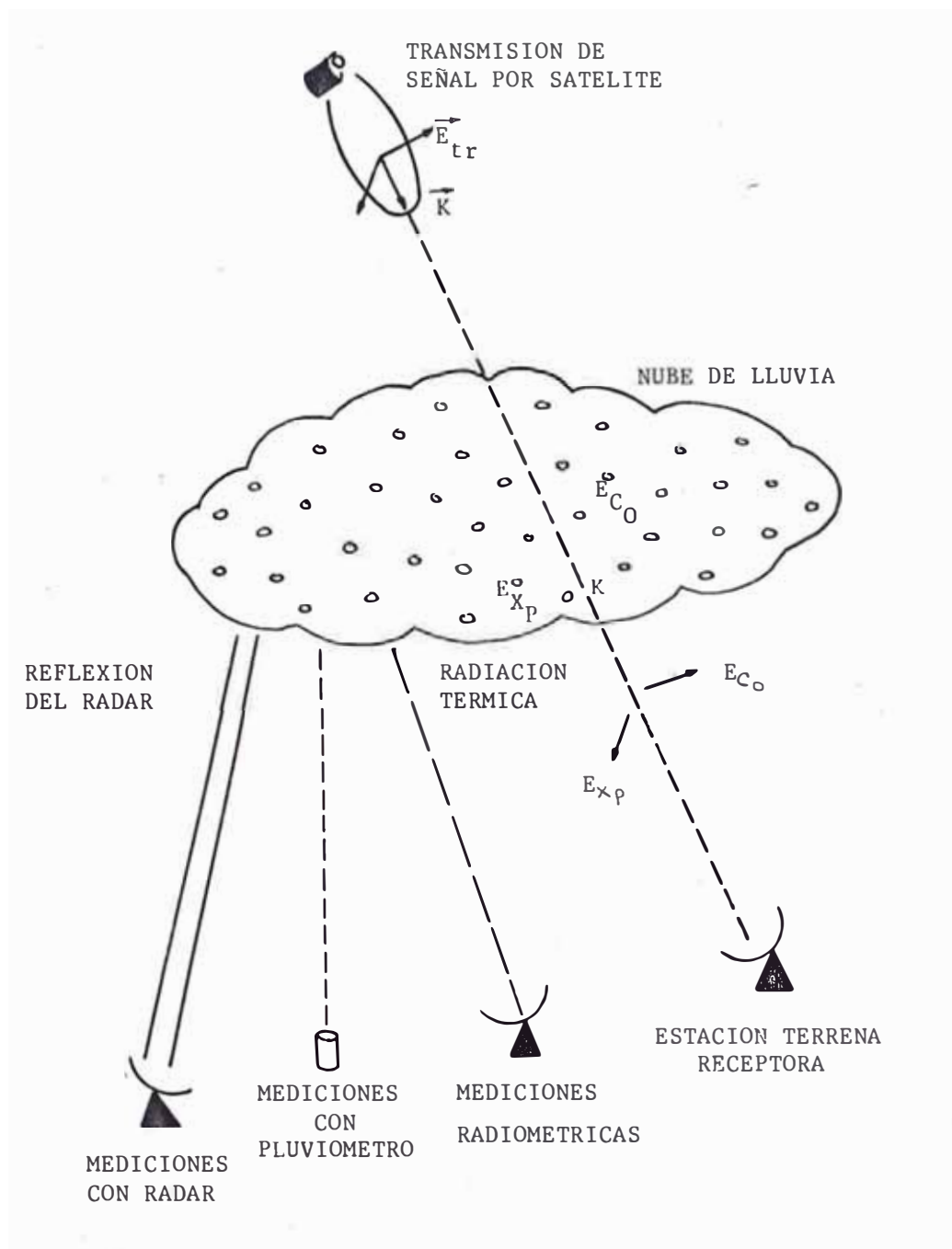


Figura 1.14 - TECNICAS EMPLEADAS PARA MEDIR ATENUACIONES PRODUCIDAS POR LA LLUVIA

2. DESCRIPCION DEL ESTUDIO

2.1 OBJETIVO

El propósito de este estudio es recoger información acerca de los niveles de atenuación que produce la lluvia, en un clima ecuatorial lluvioso, a las frecuencias de 11.6, 19.5 y 28.5 GHz empleando radiómetros pasivos, así como también recolectar datos de los niveles de precipitación pluvial empleando un pluviómetro.

La localidad escogida para llevar a cabo el proyecto fue la ciudad de Iquitos (ver figura 2-1), específicamente las instalaciones de la Estación Terrena de Iquitos. La elección de la localidad fue debida a sus características de abundante lluvia durante todo el año y por las facilidades existentes para la instalación y mantenimiento del sistema.

La figura 2-2 muestra el diagrama de bloques del sistema de observación y registros empleado. Como se observa, se tienen instalados dos radiómetros. Uno de ellos operando a la frecuencia de 11.6 GHz y el otro a la doble frecuencia de 20 y 30 GHz. Las especificaciones técnicas del sistema están dados en forma general en el cuadro 2-1.

Los radiómetros están compuestos por los siguientes subsistemas:

- a) Subsistemas de 11.6 GHz: Down-Converter, Antena, Receptor IF, Interfase Radiométrica.

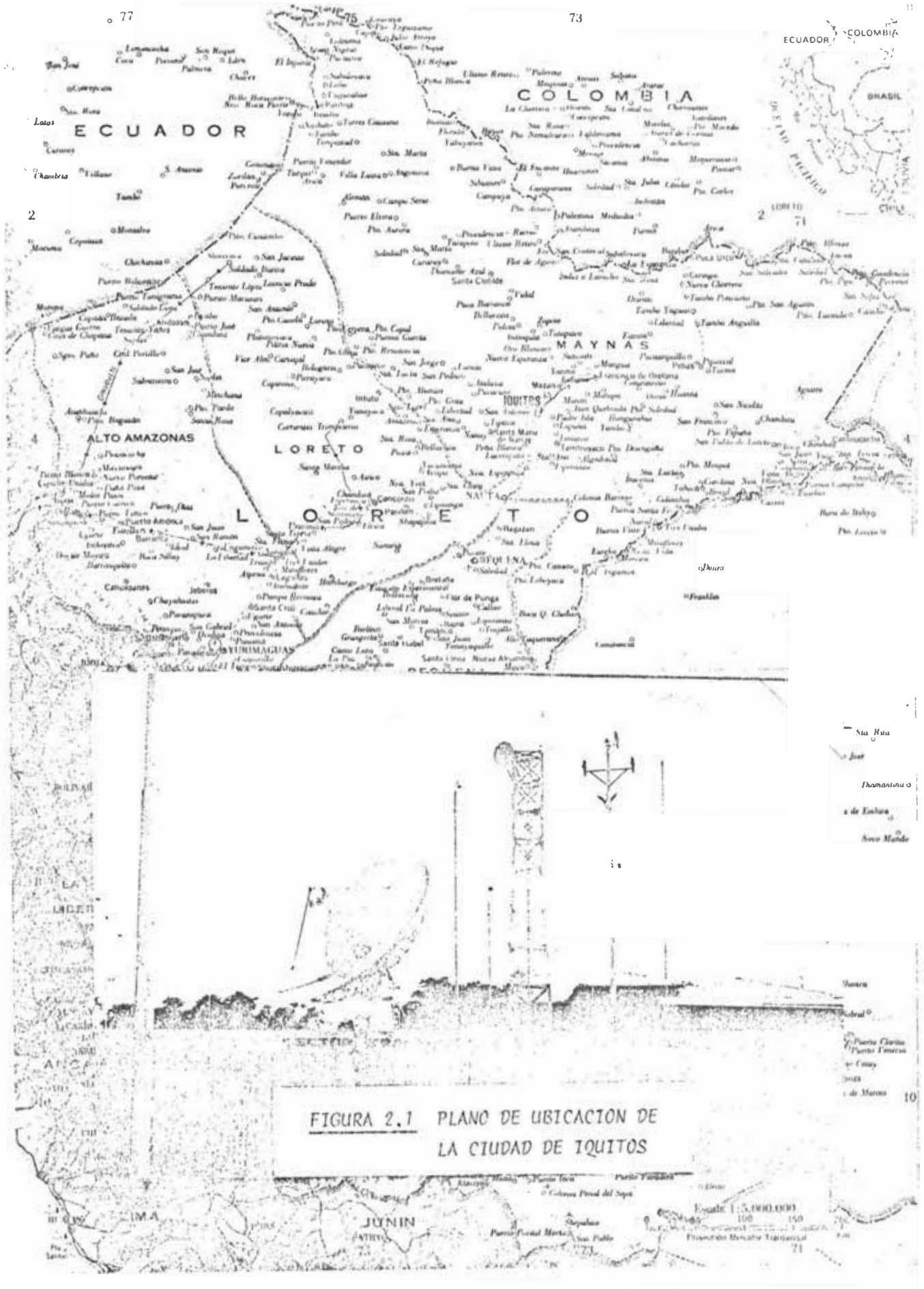


FIGURA 2.1 PLANO DE UBICACION DE LA CIUDAD DE IQUITOS

Escala 1:5,000,000

Provincia de Tarma

71

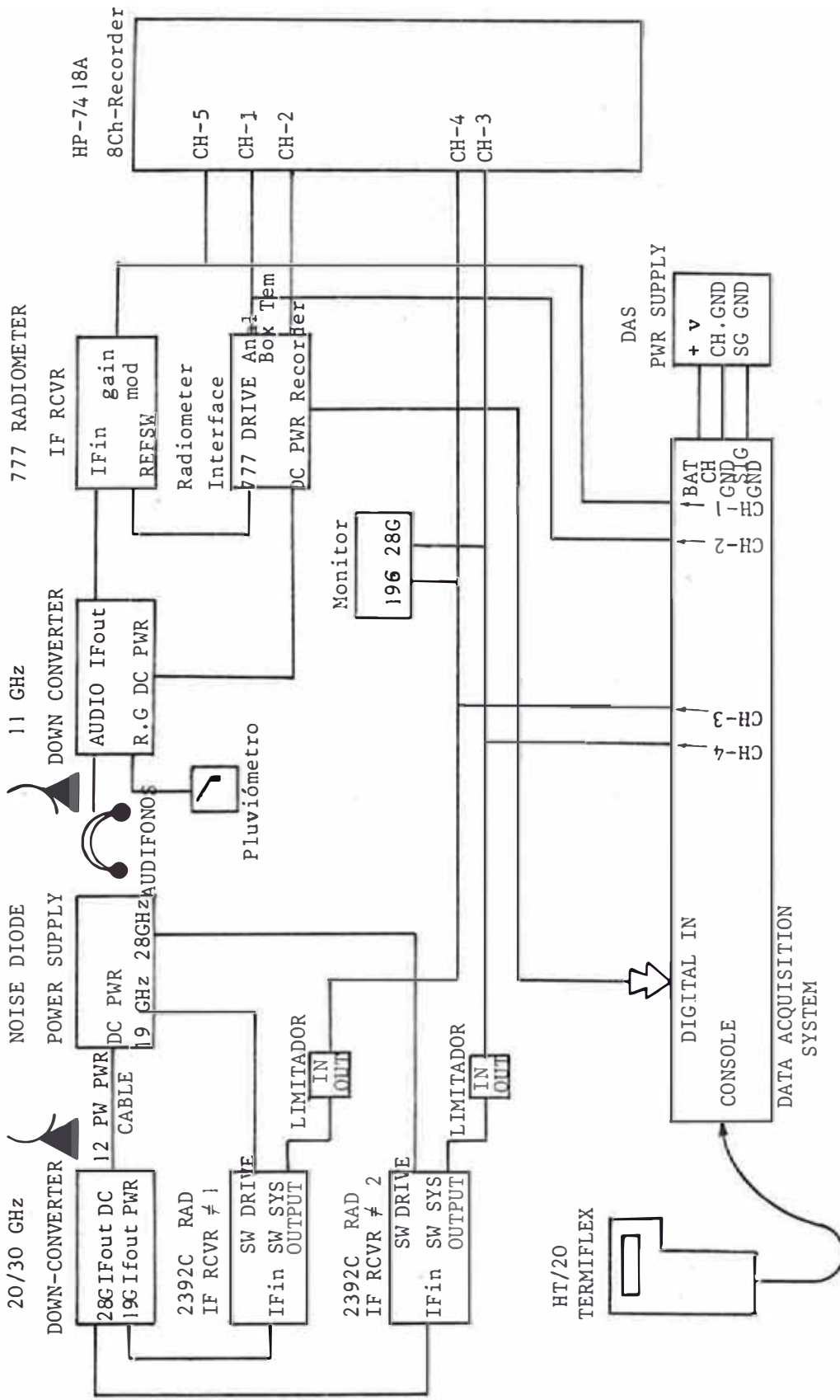
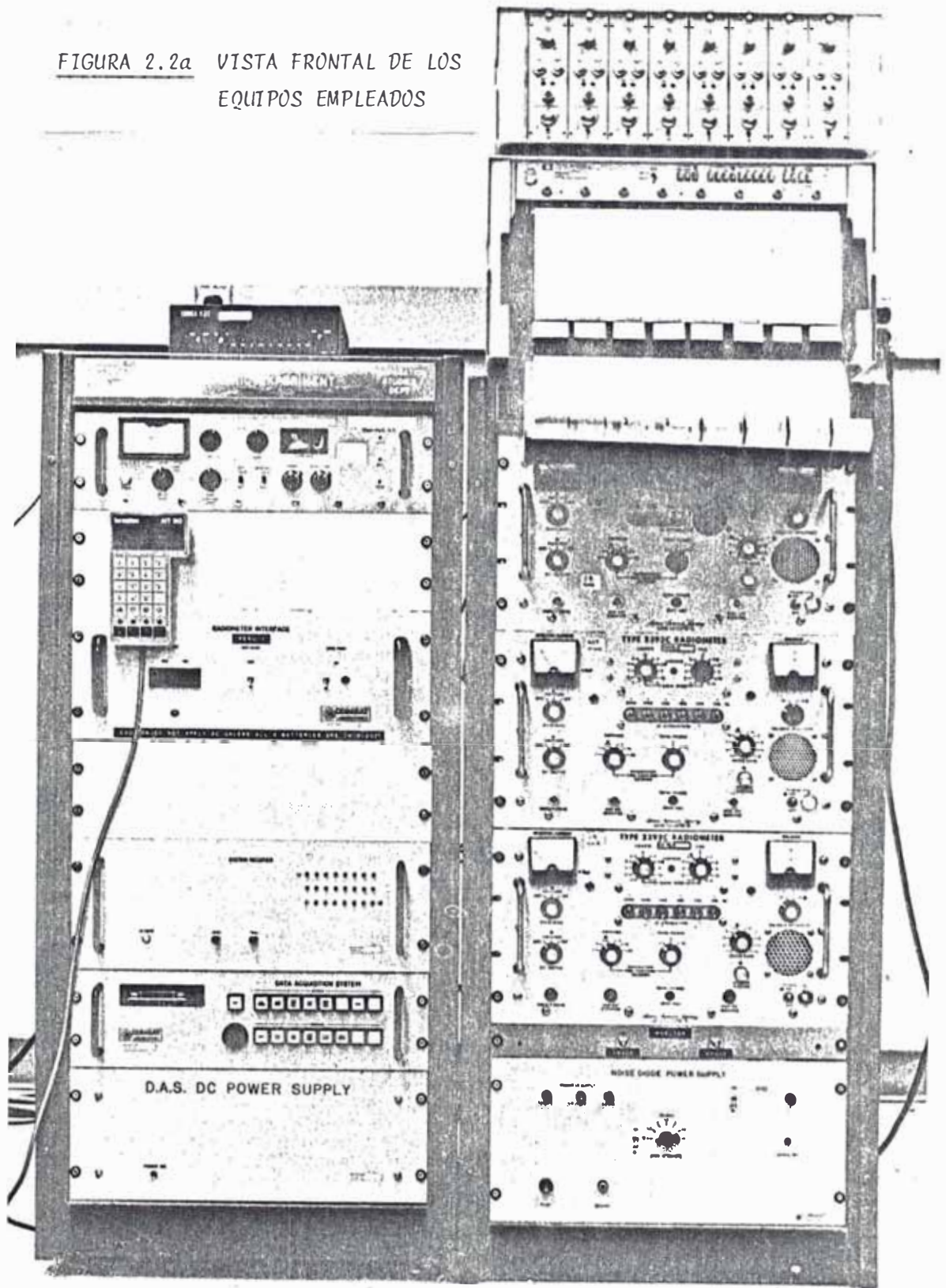


Figura 2.2 - Diagrama de Bloques de la Estación Radiométrica

FIGURA 2.2a VISTA FRONTAL DE LOS EQUIPOS EMPLEADOS



CUADRO 2-1

ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA

1) Tensión de alimentación del sistema	110-125 VAC, 60 Hz
2) Máxima corriente AC consumida	10 A.
3) Diámetro de las antenas	1.8 m
4) Apuntamiento de las antenas:	
-Elevación (11,20/30 GHz)...	27.7°
-Azimuth 11 GHz.....	80°
20/30 GHz.....	75°
	} CWV desde el N
5) Frecuencia central del D/C de 11GHz	11,600 GHz
6) Frecuencia central del D/C de 20GHz	19,455 GHz
7) Frecuencia central del D/C de 30GHz	28,455 GHz
8) Punto de saturación del pluviometro	150 mm/hr
9) Velocidad de registro de cada canal	5 mm/hr
10) Período de calibración de los sistemas	Cada 3 semanas

OTROS

- 11) Ganancias aproximadas que presentan las antenas a las frecuencias:

11.600 GHz	44 dB
19.455 GHz	49 dB
28.455 GHz	51 dB

- 12) Anchos de haz a media potencia a las frecuencias:

11.600 GHz	1°
19.455 GHz	0.6°
28.455 GHz	0.4°

- b) Subsistemas de 20/30 GHz: Down-converter, antena, Receptores IF, Sistema de alimentación del diodo de ruido.
- c) Subsistema de colección de datos: Registrador digital (DAS), Sistema de alimentación del DAS y el registrador análogo.

En el radiómetro de 11.6 GHz, el Down Converter (D/C) convierte la temperatura de ruido recibida por la antena en el rango de 11.6 GHz a una frecuencia intermedia de 5 a 600 MHz que es llevada al receptor IF. La salida del receptor radiométrico es un voltaje DC que corresponde al nivel de ruido medido. Esta salida es conocida como SKY TEMP, la cual es registrada en las formas análoga y digital. El D/C recibe su energía y ordenes de control desde la interface radiométrica.

La información obtenida con el pluviómetro es suministrada a la interface y de ahí al registrador análogo y al registrador digital.

En el radiómetro de 20/30 GHz, el Down Converter, traslada la temperatura de ruido recibida en los rangos de 20 y 30 GHz a un nivel IF de 10 a 110 MHz para cada banda. Estos niveles de IF son alimentados mediante un par de cables coaxiales, a dos receptores radiométricos de frecuencia intermedia. Uno correspondiente al sistema de 20 GHz y el otro al de 30 GHz. Igual que en el caso anterior, las salidas de cada radiómetro son proporcionales a los niveles de ruido medidos. Estas dos salidas también son registradas en las formas análoga y digital.

Ambos radiómetros requieren de calibraciones y ajustes de linealidad periódicamente.

El desarrollo de modelos en base a la data registrada, permite conocer el nivel de absorción por lluvia que sobrepasan porcentajes de tiempo determinados. Estos niveles serán útiles en el diseño de sistemas de comunicación por satélite que operen en las bandas de 11/14 ó 20/30 GHz, que deben ser las bandas más utilizadas en el futuro.

2.2 DESCRIPCION DE LOS SUBSISTEMAS RADIOMETRICOS

2.2.1 Antenas

Las antenas empleadas tienen la forma de una paraboloide de revolución de 1.80 metros de diámetro, de superficie sólida realizada en fibra de vidrio.

En el cuadro 2-1 se muestran los valores aproximados de ganancia y de ancho de haz a media potencia, así como las orientaciones de las antenas.

En las figuras 2.3 y 2.4 se muestran las antenas instaladas así como la ubicación de las unidades Down Converter. Obsérvese que para 11.6 GHz, el D/C está ubicado en la parte posterior de la antena y provisto de un alimentador hasta el punto focal. Para el sistema de 20/30 GHz, el D/C se encuentra localizado justo en el punto focal.

2.2.2 Subsistemas de 11.6 GHz

(a) Down Converter

El diagrama de bloques de la unidad de entrada RF de 11.6 GHz es mostrado en la figura 2-5.

El down converter es un reductor de frecuencia, desde una frecuencia central RF de 11.6 GHz a una frecuencia intermedia de ancho de banda de 5 a 600 MHz. El sistema no tiene circuito de supresión de imagen, por lo tanto, el ruido de las bandas de 11.605 - 12.2 GHz y 11.595 - 11.0 GHz están presentes en la IF.

La antena está acoplada mediante el alimentador a un acoplador de guías cruzadas y seguidamente al Dicke Switch

La segunda sección presenta en un brazo una carga de guía de onda y en otro un diodo de ruido. El diodo de ruido es usado como generador de ruido y es empleado para propósitos de calibración. Este inyecta a la guía principal una temperatura de ruido incremental de alrededor de 100°K cuando es activado.

El dicke switch es un circulador de ferrita con un ais-



FIG. 2.3 ANTENA RADIOMETRICA DE 11.6 GHz
(D/C EN LA PARTE POSTERIOR DE LA ANTENA)

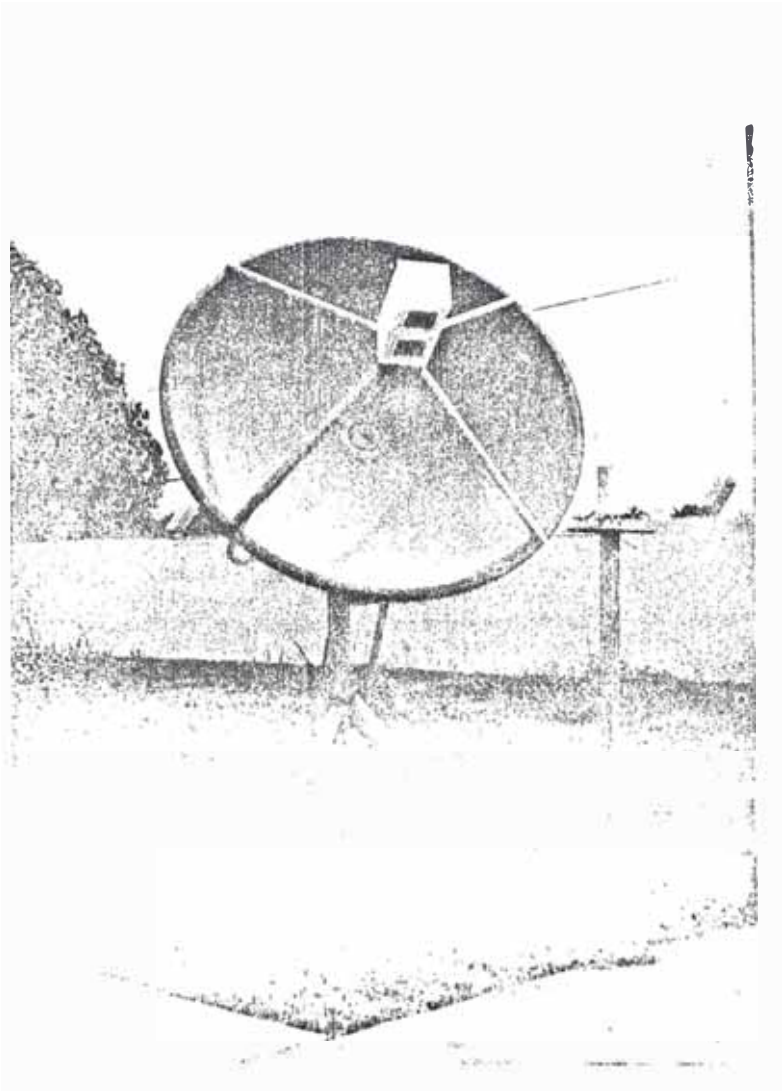


FIG. 2.4 ANTENA RADIOMETRICA DE 20/30 GHz
(D/C EN PUNTO FOCAL DE LA ANTENA)

lamiento puerta-puerta de alrededor de 25 dB y con una pérdida de inserción de aproximadamente 1 dB.

La otra puerta del dicke switch esta conectada a un horno de referencia. El circulador de ferrita conmuta continuamente ambas puertas a una velocidad de 105 Hz. Esta velocidad es controlada por la unidad receptora IF mediante el envío de señales trigger de 5V/-5V. Estas señales son transformadas, por un elemento interno del circulador, en impulsos de corriente que controlan el estado magnético de la ferrita. Una vez cada hora son producidos pulsos de autocalibración, que actúan sobre el Dicke switch para que deje pasar durante un minuto la temperatura de ruido del horno de referencia. Un minuto después activan el diodo de ruido por otro minuto.

El horno de referencia consiste de un terminal de guía de onda con calefactor, mantenida a una temperatura controlada de 70° C (343°K), que está térmicamente aislado de las temperaturas de ambiente fuera del horno. El horno contiene además un sensor de temperatura de estado sólido. La salida del horno es llamada temperatura de referencia.

El módulo RF está compuesto de seis partes principales:

- 1) Un adaptador de guía de onda a cable coaxial.
- 2) Un aislador de 20 dB, que reduce la cantidad de energía del oscilador que es radiada fuera de la antena.
- 3) Un oscilador local, Gunn, (LO) que provee 11.6 GHz a 10 dBm, frecuencia que puede ser ajustada.
- 4) Un amplificador, que combinado con los otros componentes produce una ganancia total del sistema de aproximadamente 41 dB.
- 5) Un convertidor DC-DC que provee las salidas reguladas (para el amplificador y LO) con una entrada de +15 VDC.

Finalmente, todos los componentes arriba mencionados están contenidos en una caja de fibra de vidrio de 3/4 de pulgada de espesor para fines de aislamiento. La caja

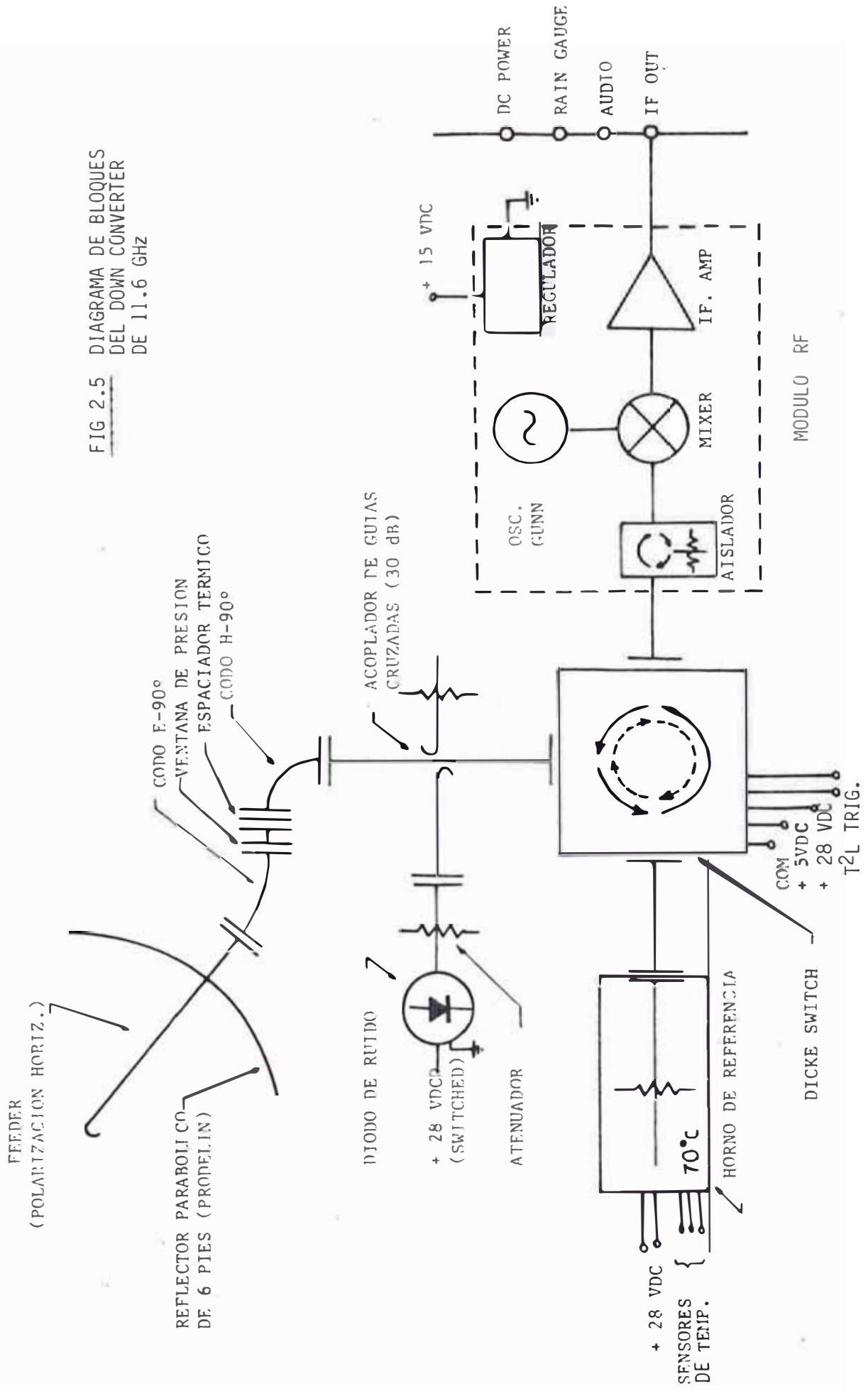


FIG 2.5 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL DOWN CONVERTER DE 11.6 GHZ

cuenta además con una serie de termistores de coeficiente de temperatura positivo que mantienen la caja a una temperatura ligeramente superior a la temperatura de ambiente a fin de reducir los efectos de variación de temperatura.

(b) Subsistema Radiométrico de Frecuencia Intermedia

Un radiómetro de conmutación convencional (tal como el mostrado en la figura 2.6), presenta como salida un voltaje que es proporcional a una diferencia de temperatura dado por $G(T_A - T_R)$ donde :

G = Ganancia del sistema de medición

T_e = Temperatura de ruido efectiva del receptor

T_A = Temperatura asociada con la antena

T_R = Temperatura de la carga de referencia

de esta manera la temperatura de la antena puede ser medida si son conocidas la temperatura de la carga de referencia y la ganancia del sistema. Desafortunadamente la ganancia es un parametro que varia con la temperatura y el tiempo.

El receptor IF empleado en el experimento está compuesto integralmente por el AIL-777, equipo suministrado por la Airobone Instrument Laboratories. Las salidas de este radiómetro no son dependientes de la ganancia del sistema.

El voltaje de salida del AIL-777 se basa en la medición automática de la relación de los voltajes V_A/V_R , donde V_A es el voltaje cuando el switch esta en la posición - antena, $V_A = G(T_e + T_A)$, y V_R el voltaje cuando el switch esta en la posición referencia, $V_R = G(T_e + T_R)$, así:

$$\frac{V_A}{V_R} = \frac{G(T_e + T_A)}{G(T_e + T_R)} = \frac{T_e + T_A}{T_e + T_R} = Y$$

de donde, $T_A = (T_e + T_R)Y - T_e$

La ecuación anterior puede ser resuelta para T_e y T_R u-

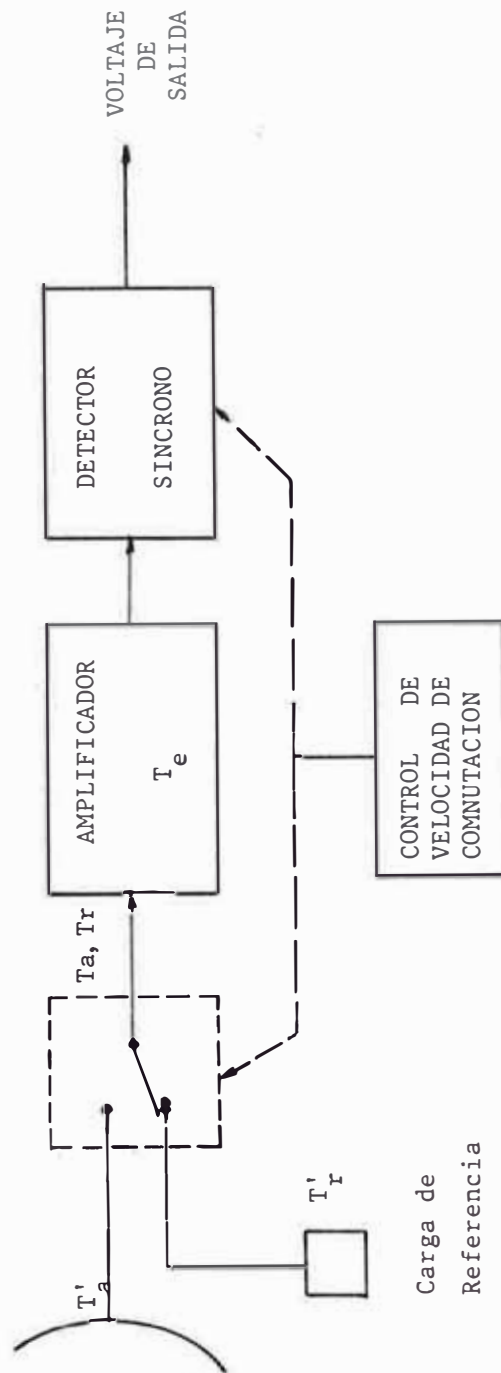


FIG 2.6 DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN RADIOMETRO DE CONMUTACION CONVENCIONAL

sando dos valores conocidos para T_A .

Las principales especificaciones técnicas del AIL - 777 son mostradas en el cuadro 2-2.

En la figura 2.7 se muestra un diagrama de bloques del AIL-777. Con el equipo trabajando en condiciones normales, RS SWITCH se encuentra en la posición SWITCH trabajando en serie con el generador de impulsos de conmutación. Estos impulsos hacen actuar al dicke switch dejando pasar alternativamente la temperatura de la antena T_A y la temperatura del horno de referencia T_R . Los voltajes asociados a estas temperaturas llegan al punto A donde son deconmutador por el SWITCH RATE DECONMUTADOR. Cada voltaje es entonces operado separadamente a través de circuitos con ganancias ajustables. Una porción del nivel debido a V_R , K_1V_R , es sumada a una segunda porción, $K_2K_nV_R$, y el resultado es comparado con el nivel de V_A en el punto B. La diferencia entre V_A y $(K_1 + K_2K_n)V_R$ da una componente de error ac, la cual es amplificada y detectada por medio de un detector sincrónico. Los factores K_1 y K_2 son ajustados independientemente en cada calibración, mediante controles localizados en el panel frontal; cada uno con un rango nominal de 0.01 a 1.0.

El atenuador K_n es producto de un atenuador binario de 10 bits que puede asumir valores entre 0.0 y 0.999. Es manejado por el voltaje de control de realimentación hasta que el voltaje de error en el punto C se aproxima a cero, con lo cual :

$$V_A = K_1V_R + K_2K_nV_R$$

$$\text{ó} \quad \frac{V_A}{V_R} = K_1 + K_2K_n = Y$$

Desde que K_n puede variar de 0.0 a 0.999, el mínimo valor a Y es dado por K_1 y el máximo por $K_1 + K_2$ (con $K_n = 0.999 \approx 1$). Obteniendose

$$T_A(\text{min}) = (T_e + T_R)K_1 - T_e$$

$$T_A(\text{max}) = (T_e + T_R)(K_1 + K_2) - T_e$$

CUADRO 2-2ESPECIFICACIONES TÍPICAS DEL AIL - 777

- | | | |
|-----|---|--|
| 1) | Ancho de banda IF..... | ≥ 250 MHz (5 a 255 MHz) |
| 2) | Figura de ruido..... | < 5 dB |
| 3) | Impedancia de entrada | 50 ohms |
| 4) | VSWR de entrada..... | < 2 a 1 |
| 5) | Niv l de señal de entrada..... | - 50 a - 60 dBm |
| 6) | Constantes de tiempo de integración..... | 0.1, 0.5, 1, 3, 5 y 10 sg |
| 7) | Velocidad de conmutación..... | 25 - 500 Hz, ajustable |
| 8) | Forma de onda de la señal de conmutación. | Nominalmente cuadrada.
Compatible con los TTL |
| 9) | Formatos d salidas | a) Digital, 13 bits en paralelo
BCD
b) Analoga
c) Visual, pantalla de 3-1/2 digitos |
| 10) | Rango de mediciones | Ajustable |

Estas dos ecuaciones determinan el rango de mediciones del sistema.

Las calibraciones establecen la relación lineal entre la salida del receptor radiométrico y la temperatura de ruido de la antena. La calibración envuelve el empleo de dos cargas de temperatura de ruido conocidas, que son colocadas sobre el alimentador de la antena, las mismas que producen dos salidas con niveles conocidos. Una de las cargas es denominada HOT LOAD (carga caliente) que provee una temperatura de ruido igual a la temperatura de ambiente. La otra carga, COLD LOAD o carga fría, es llenada con Nitrogeno Líquido a fin de proveer una fuente de ruido de 80⁰K.

(c) Interfáse Radiométrica

En la figura 2.8 se muestra el diagrama de bloques de la interfase radiométrica. Las funciones de cada modulo es segun se indica a continuación:

- 1) A1 es una fuente de +28 VDC/4A para el diódo de ruido y los calefactores del down converter.
- 2) A2 es una fuente de +28 VDC/2A que energiza al horno de referencia y al dicke switch.
- 3) A3 es una fuente de +15 VDC/3A que conjuntamente con A4 provee +5 VDC al dicke switch y a todas las interfáces TTL/CMOS, además alimenta con +15 VDC al modulo RF y a los sensores de temperatura.
- 4) A4 es una fuente regulada ininterrumpible que provee energía de reserva a la tarjeta CMOS del reloj y distribuye +28 y +5 VDC a las tarjetas de la interfáce.
- 5) A5 es el reloj CMOS que mantiene la información de la hora y del día.
- 6) A6 es un conjunto de interruptores usados para poner a la hora el reloj CNOS.
- 7) A7 es el modulo de control y de tiempo, realiza las funciones de excitación del dicke switch, convierte

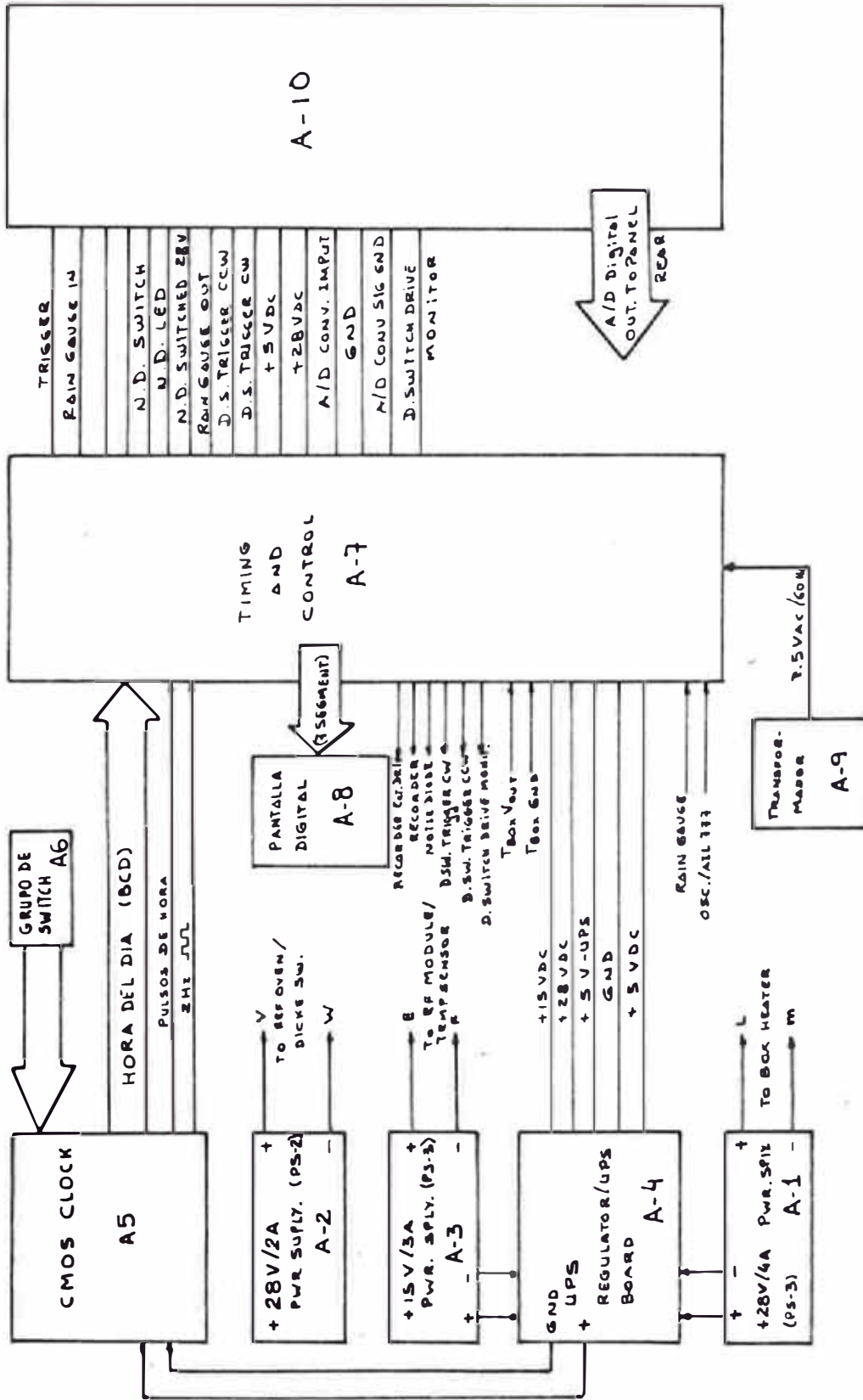


FIGURA 2.8 DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA INTERFASE RADIOMETRICA

las señales BCD del reloj al formato de 7 segmentos, integra los pulsos del pluviometro en forma de escaleras de 10 pasos y provee los pulsos de autocalibración.

- 8) A8 es la pantalla digital para indicar la hora y consiste de cuatro Led's de siete segmentos.
- 9) A9 es un transformador reductor que provee un voltaje de 7.5 VAC a 60 Hz a la tarjeta A7.
- 10) A10 es una tarjeta adicional que realiza las siguientes funciones:
 - Convertir las señales TTL (con tierra referencial) que controlan al dicke switch en una señal diferencial de dos hilos.
 - Provee un buffer a los pulsos del pluviometro.
 - Permite que el ciclo de autocalibración normal pueda ser deshabilitada temporalmente.

Controla el diódo de ruido mediante un switch en el panel frontal de la interfáce.

Convierte la temperatura análoga de la caja en un tren de pulsos de ocho bits.

2.2.3 Subsistemas de 20/30 GHz

(a) Down Converter

El diagrama de bloques de la unidad RF del radiómetro de 20/30 GHz es mostrado en la figura 2-9. La unidad indicada esta compuesta por dos reductores de frecuencia RF en cadena, integrados en un mismo compartimiento. Exceptuando la antena y la alimentación de energía común, la operación de cada uno de ellos es independiente uno de otro.

Cada down converter reduce la frecuencia RF a una frecuencia intermedia de 10 a 110 MHz. Aquí tampoco hay supresión de imagen, por lo tanto cada D/C tiene una respuesta de frecuencia dual. El D/C de 19 GHz, el cual opera a una frecuencia central de 19.445 GHz, provee a la -

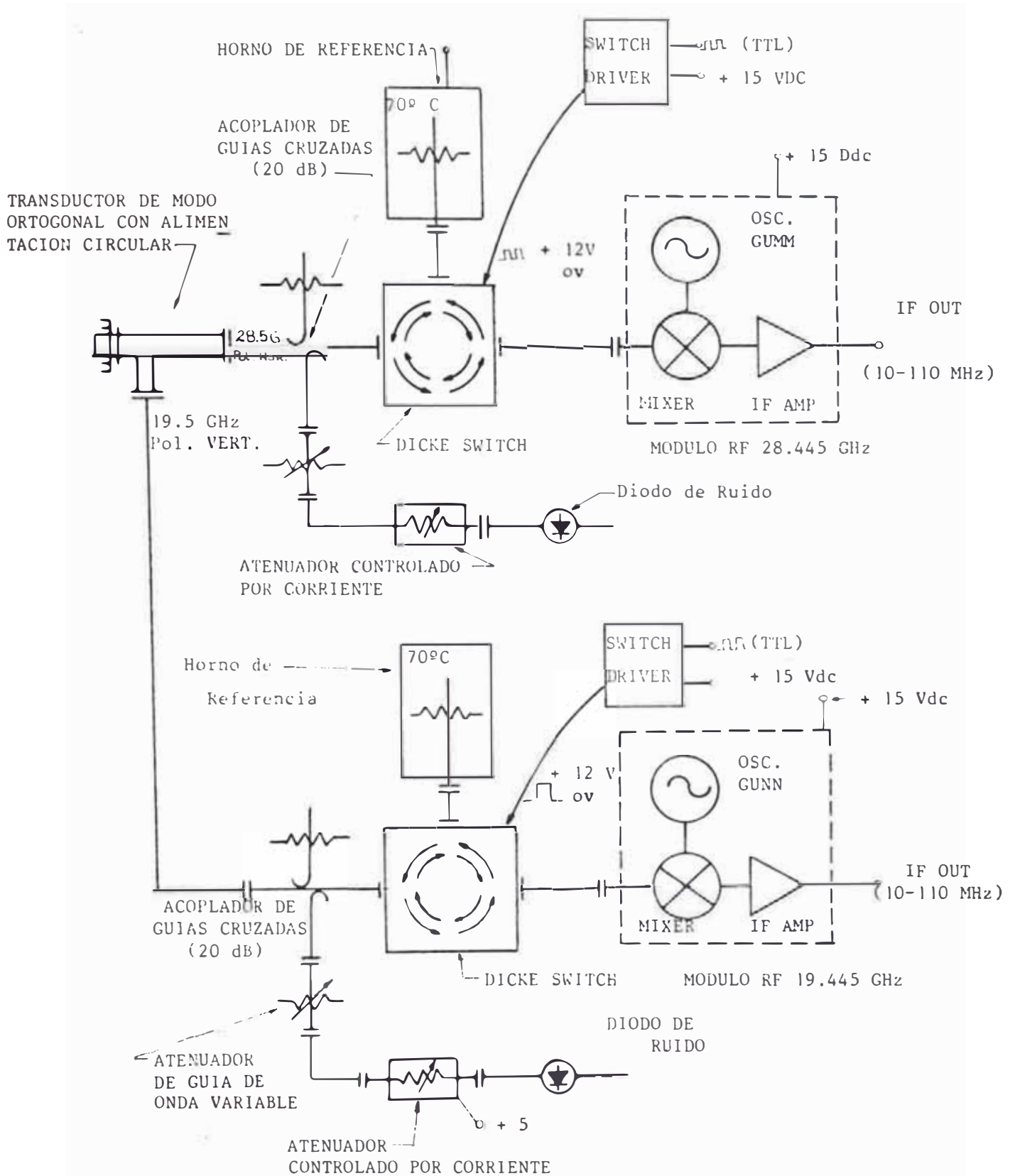


FIG. 2.9 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL DOWN CONVERTER 20/30 GHz

IF un ruido de antena de 19.435 - 19.335 GHz y 19.455-19.555 GHz, a su vez, el D/C de 30 GHz con una frecuencia central de 28.445 GHz, alimenta al receptor IF con el ruido presente en las bandas de 28.435 - 28.335 y -28.455 - 28.555 GHz.

Los Downs Converter comparten puertas ortogonalmente sintonizadas del mismo alimentador de la antena. El sistema de 19 GHz esta polarizado verticalmente y el sistema de 28 GHz horizontalmente.

Cada D/C esta provisto de un diodo de ruido con el fin de inyectar un incremento de temperatura de ruido al alimentador de la antena durante el ciclo de autocalibración automática. La salida del diodo de ruido es reducida por atenuadores fijos y por un acoplador de guías cruzadas, de tal manera que el incremento de temperatura sea alrededor de 100⁰K.

Cada dicke switch es un circulador de ferrita con un aislamiento puerta a puerta mayor a 20 dB y una perdida de inserción menor de 0.4 dB. Cada puerta es conmutada continuamente a una velocidad de 105 Hz, dejando pasar alternativamente la temperatura de la antena y la temperatura de referencia. Cada circulador es controlado por su receptor AIL 2392C asociado y por la unidad del sistema de alimentación del diodo de ruido. En el interior del down converter existe tambien una tarjeta excitadora del dicke switch, que es usada para convertir la señal TTL proveniente de la unidad de alimentación del diodo de ruido en una onda cuadrada de 0/+12V que es la requerida por el circulador. Internamente, el dicke switch transforma la señal cuadrada en una corriente de impulsos que controlan el estado magnético de la ferrita.

Cada horno de referencia consiste de una terminación de guía de onda a una temperatura controlada de 70⁰C (343⁰ K) y se encuentra termicamente aislada de la temperatura de ambiente mediante un aislamiento de fibra de vi -

drio y una cubierta de acero inoxidable. Cada horno - tiene adherido una termocupla de unión para permitir - el chequeo de operación del horno.

La conversión de frecuencia RF a IF es realizada en cada D/C por un modulo RF consistente de un oscilador de diódo gunn, un mixer y un amplificador de frecuencia intermedia. La ganancia total de cada modulo (de RF a IF) es de alrededor de 30 dB.

Mecanicámente todo el conjunto es mantenido a la temperatura de ambiente mediante circulación forzada de aire.

(b) Subsistema Radiométrico de Frecuencia Intermedia

Cada una de los dos señales IF provenientes de los D/C ingresan separadamente a una unidad de frecuencia intermedia. Estas unidades son exactamente iguales y compuestas íntegramente por el AIL-2392C. Cada unidad IF permite la entrada de señales de 10 a 110 MHz, dando automáticamente las mediciones de la temperatura de ruido. A diferencia del AIL-777, esta unidad se comporta como un receptor IF de un sistema radiométrico convencional. Esto es, la salida del sistema es un voltaje DC que varia con la temperatura de ruido de la antena de acuerdo a la siguiente relación:

$$V_{OUT} = G(T_{REF} - T_{ANT}) + V_0$$

donde: V_{OUT} = Voltaje de salida del sistema
 V_0 = Nivel offset DC de salida
 G = Ganancia del sistema
 T_{REF} = Temperatura de referencia
 T_{ANT} = Temperatura de ruido de la antena

T_{REF} es una cantidad constante y aproximadamente igual a 343° K. T_{ANT} varia con el ruido espacial que esta en el rango de 50 a 290° K. G es una constante positiva. V_0 es una constante que puede ser positiva o negativa. Tanto G como V_0 son ajustables. Notar la característica inversa de la salida radiométrica: Cuando T_{ANT} au -

menta, V_{OUT} decrece y vivversa. De esta manera, la salida del sistema es mayor en condiciones de cielo despejado ($T_{ANT} = \text{min}$) y menor cuando la entrada esta asociada a la temperatura de referencia.

Algunas especificaciones técnicas del AIL-2392C son indicadas en el cuadro 2-3.

En la figura 2-10 se muestra un diagrama de bloques del AIL-2392C. Con el equipo trabajando en condiciones normales, RF SWITCH se encuentra en la posición SWITCH operando en serie con el generador de pulsos de conmutación. Estos impulsos hacen actuar al dicke switch dejando pasar alternativamente, cada 105 Hz, la temperatura de antena y la temperatura de referencia. Los niveles IF asociados a estas temperaturas pasan a través de un preamplificador llegando al modulador de ganancia. El modulador de ganancia consiste de dos atenuadores conmutables, uno fijo y el otro variable, ajustado de manera que presente una atenuación equivalente al nivel de temperatura de referencia mas el valor del atenuador fijo. Así, los niveles T_{REF} y T_{ANT} de la señal IF de entrada son deconmutadas alternativamente y en sincronismo con el generador de pulsos, entre los atenuadores fijo y variable respectivamente, obteniendose una onda cuadrada con un nivel asociado a la temperatura de referencia y el otro a la diferencia $T_{ANT} - T_{REF}$. Estos niveles de energía IF pasan a través de un preamplificador y de atenuadores que ajustan la señal a un nivel adecuado a fin de hacer trabajar al segundo detector (donde son convertidas en niveles de voltaje DC) en un punto de máxima linealidad. Finalmente, los voltajes asociados ingresan a un detector sincrónico que bloquea la componente DC correspondiente a la temperatura de referencia, dejando pasar solo el voltaje asociado a $T_{ANT} - T_{REF}$. Este voltaje es tratado por un amplificador operacional de ganancia variable que proporciona la salida del sistema.

CUADRO 2-3ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL AIL-2392C

1) Ancho de Banda IF.....	100 MHz (10 a 110 MHz)
2) Figura de ruido.....	7 dB
3) Impedancia de entrada...	50 ohms
4) VSWR de entrada.....	2 a 1
5) Ganancia de IF.....	85 dB (max)
6) Velocidad de conmutación	5 a 500 Hz, Ajustable
7) Forma de onda de la se- ñal de conmutación.....	Cuadrada
8) Constante de tiempo de - Integración.....	0.1,1,3,5,10 y 30 sg
9) Formato de salida.....	Analogo

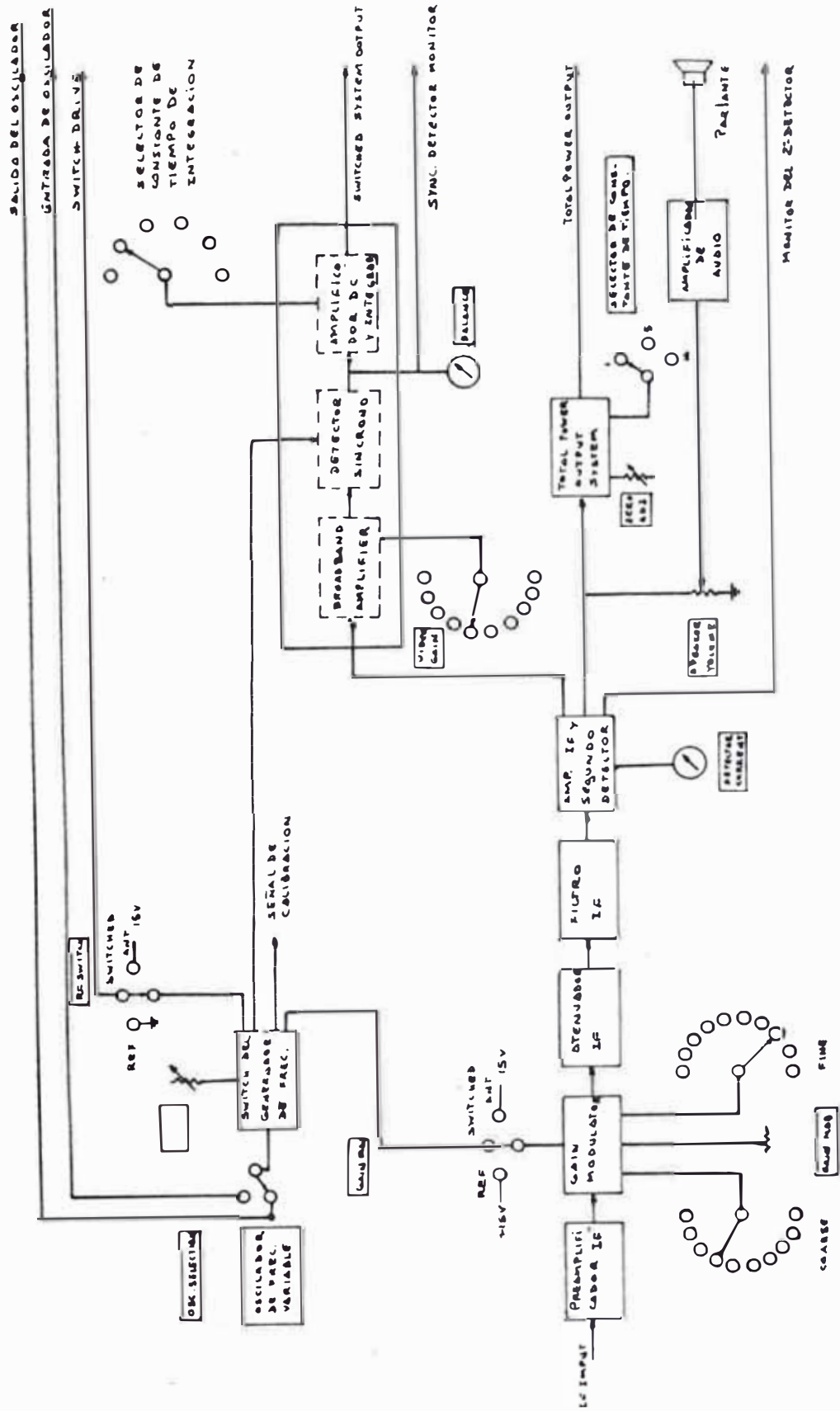


FIGURA 2.10 - DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SUBSISTEMA
 RADIOMETRICO F.I. DE 20/30 GHZ

(c) Sistema de Alimentación del Diódo de Ruido

El sistema de alimentación del diódo de ruido provee la energía y las funciones de control y tiempo necesarias para el funcionamiento del down converter. Basicamente el sistema esta compuesto por fuentes de alimentación que proveen las salidas de 5,15 y 28 VDC, una interface para la onda cuadrada proveniente de los AIL 2392C, dos motores de tiempo que interrumpen la normal operación del sistema una vez por hora durante tres minutos para realizar un ciclo de autocalibración automática y finalmente por controles en el panel frontal lo que permite activar manualmente los diódos de ruido. Los motores de tiempo operan en fase con los 60 Hz provenientes de la alimentación principal.

Al igual que para el radiómetro de 11.6 GHz, este sistema tambien necesita de calibraciones periodicas. Para este fin son la carga caliente (que esta a la temperatura de ambiente), la carga fría (nitrogeno Liquido) y la temperatura de referencia (343 °K). De esta manera son conocidas tres temperaturas, que adicionadas con el incremento de ruido, que produce el diódo de ruido, dan la curva de respuesta del sistema que es facilmente calculada.

2.2.4 Subsistemas de Colección de Datos

(a) Registrador Análogo

Los datós registrados en el recorder análogo corresponden a las siguientes señales:

- 1) Temperatura interna de la unidad D/C de 11.6 GHz
- 2) Información del pluviometro
- 3) Temperatura de ruido a 30 GHz
- 4) Temperatura de ruido a 20 GHz
- 5) Temperatura de ruido a 11.6 GHz

Los trazos son producidos sobre un papel termico sensi

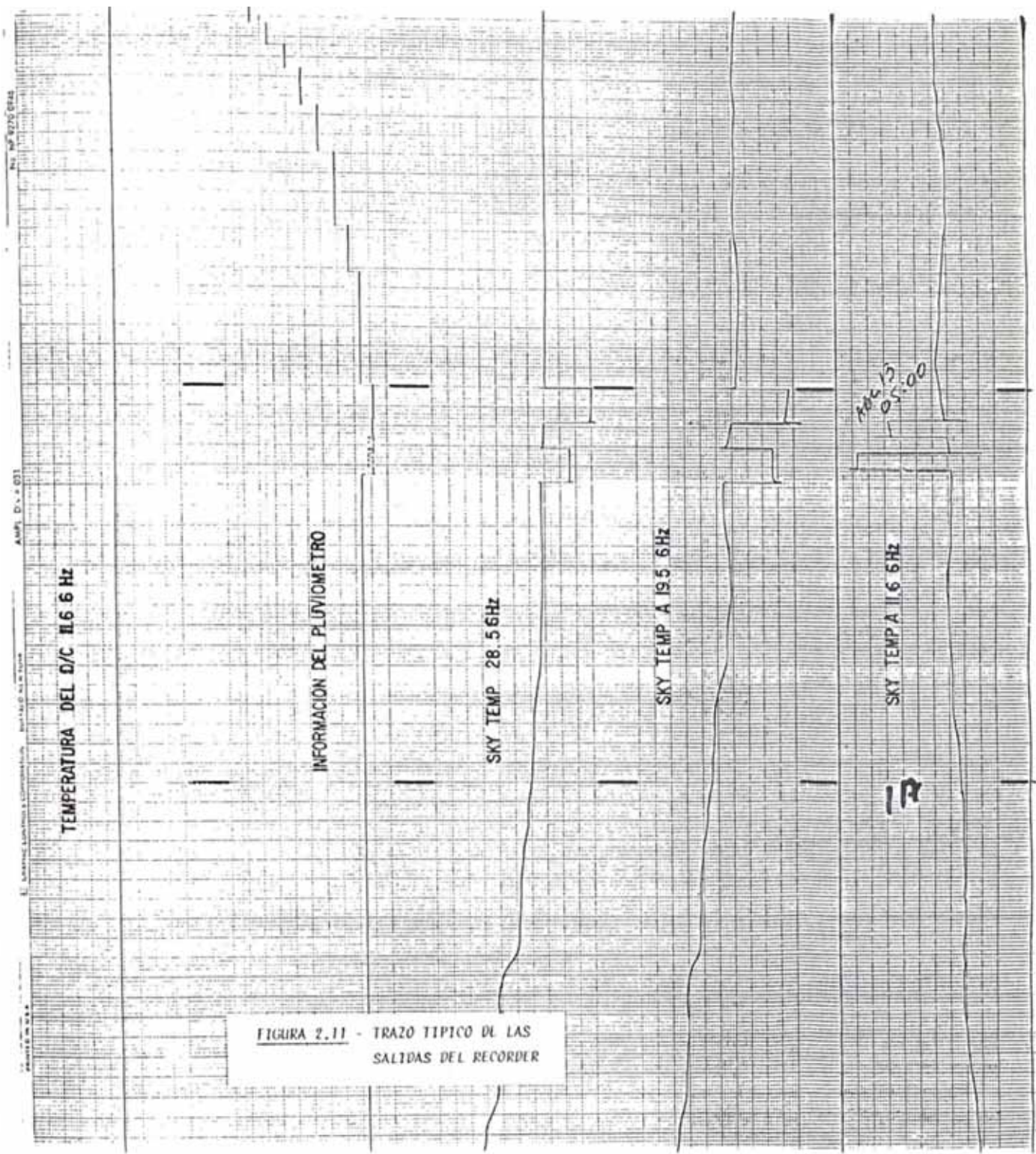


FIGURA 2.11 - TRAZO TIPICO DE LAS SALIDAS DEL RECORDER

ble al calor, mediante agujas calentadas electricamente. Cada canal usa un preamplificador a fin de dar la sensibilidad necesaria a la salida que se va a graficar. La velocidad del registro esta ajustada a 5 mm/minuto. En la figura 2.11 se muestra un trazo típico de las salidas del recorder.

(b) Registrador Dígital

La unidad del DAS es usada para registrar digitalmente la misma información que esta siendo graficada en el recorder análogo. La principal ventaja del DAS está en que la información es almacenada en cassettes especiales que pueden ser analizados rapidamente empleando técnicas de computación. En la figura 2.12 se muestra el diagrama de bloques simplificado del sistema de adquisición de datos.

El procesador consiste de un microprocesador y memorias EPROM y RAM. Es el centro de control del DAS y realiza las siguientes funciones:

- 1) Transmitir información de control y data a la unidad de grabación y leer el estado del mismo.
- 2) Seleccionar el canal Análogo/dígital y leer la data del convertidor Análogo/dígital.
- 3) Leer el estado del panel frontal, que incluye interruptores de control, indicadores Led's y controlar la salida de una alarma audible que indica la necesidad de cambio de cassette.

El procesador es controlado desde el exterior mediante un terminal portatil RS - 232. Esta unidad, juntamente con los switches del panel frontal, dan los comandos necesarios para el reemplazo de cassettes y la programación de la fecha y hora que son almacenados conjuntamente con los datos.

El sistema de alimentación del DAS es una fuente regulada de +24V que alimenta a la unidad DAS paralelamente con la salida rectificada del mismo.

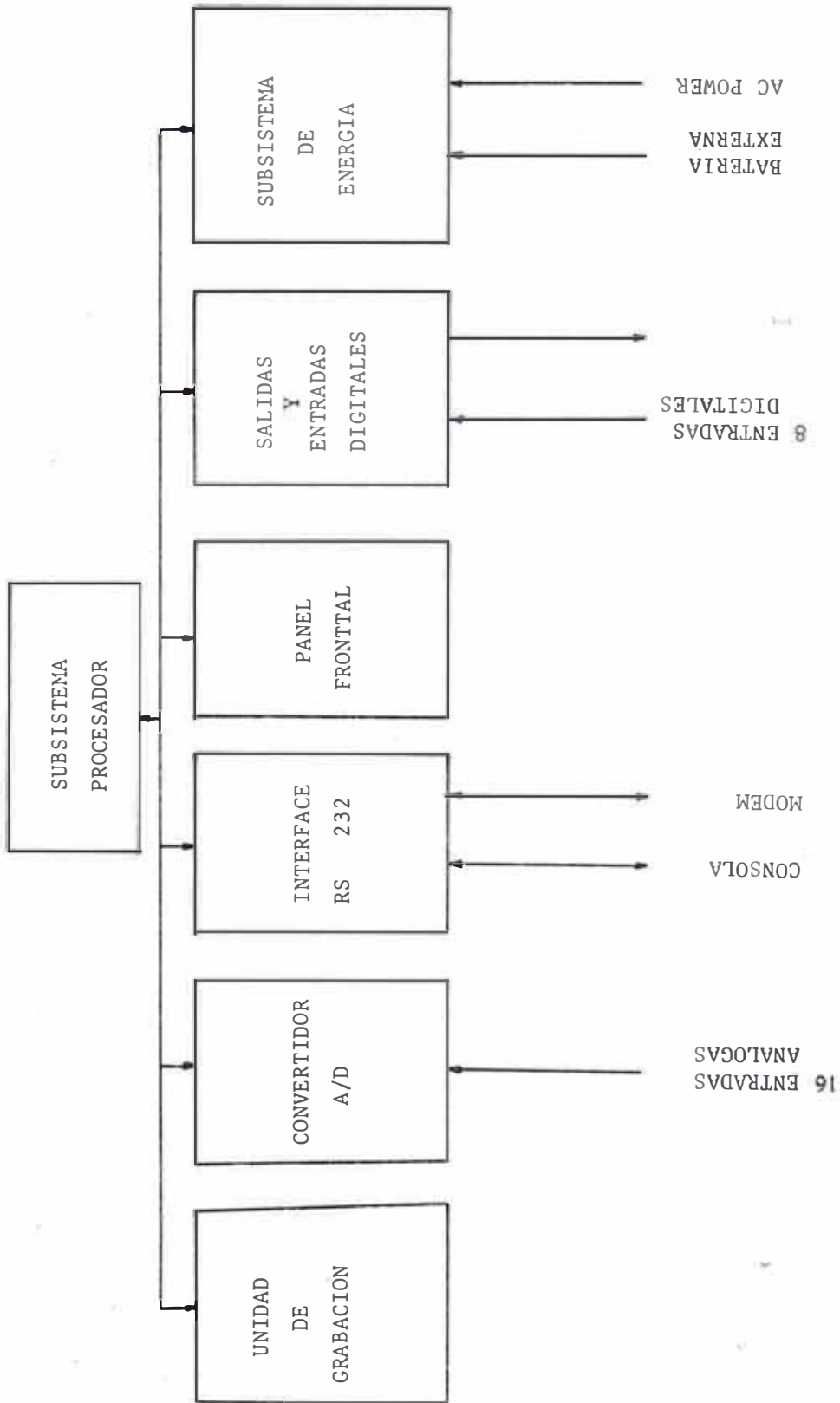
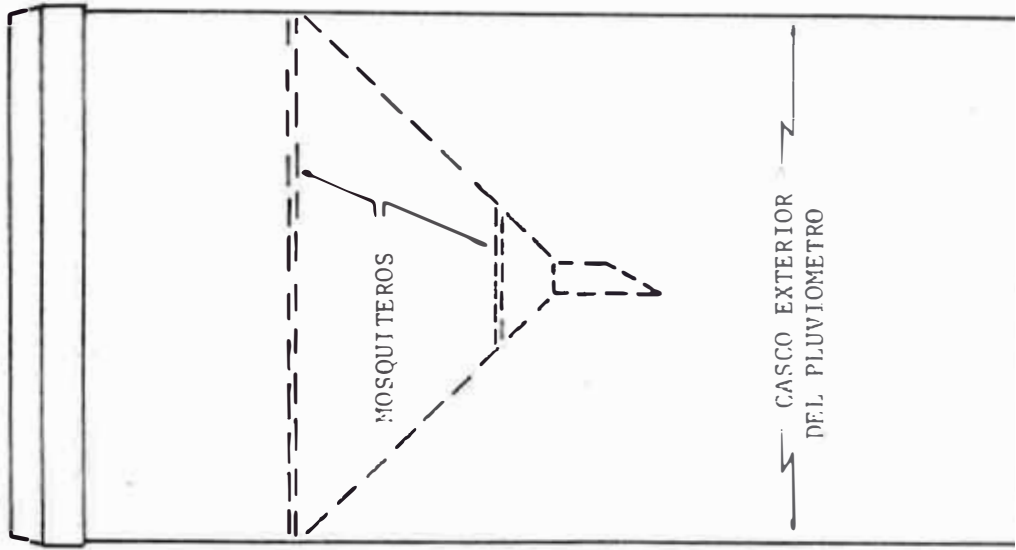
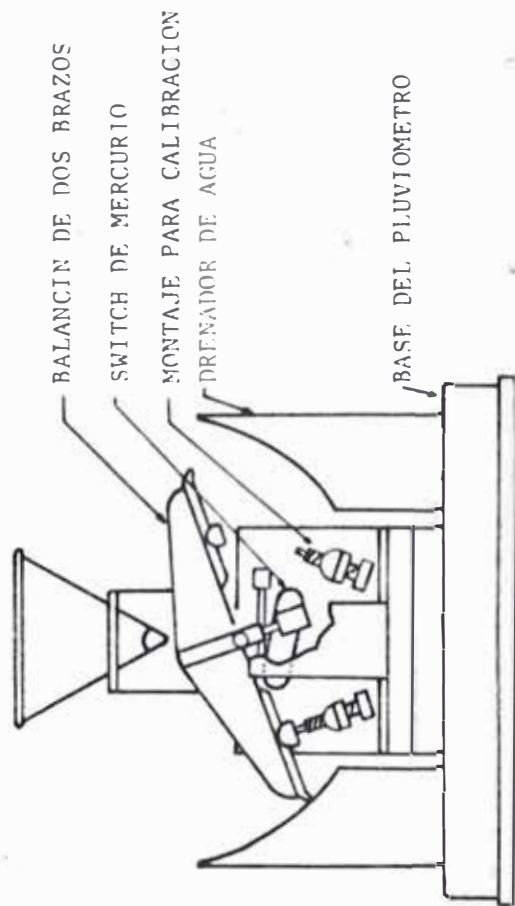


FIG 2.12 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS (DAS).

2.2.5 Pluviómetro

En la figura 2.13 se muestra un diagrama esquemático del pluviómetro. Su operación se basa en el empleo de un balancín de dos brazos asociados con un switch de mercurio. Cuando el agua ingresa al interior del pluviómetro, el peso del agua hace que uno de los brazos se desplace hacia abajo hasta que nuevamente el peso del agua acumulada en el otro brazo lo vuelva a la posición superior. La acción del balanceo hace que el switch de mercurio, localizado debajo del mecanismo de balancín, se cierre momentáneamente. Este switch está conectado a una fuente que permite registrar cada balanceo de los brazos. Los brazos están calibrados para balancearse después de cada 8 cm^3 (0.254 mm) de lluvia.

FIG 2.13 DIAGRAMA ESQUEMATICO
PLUVIOMETRO



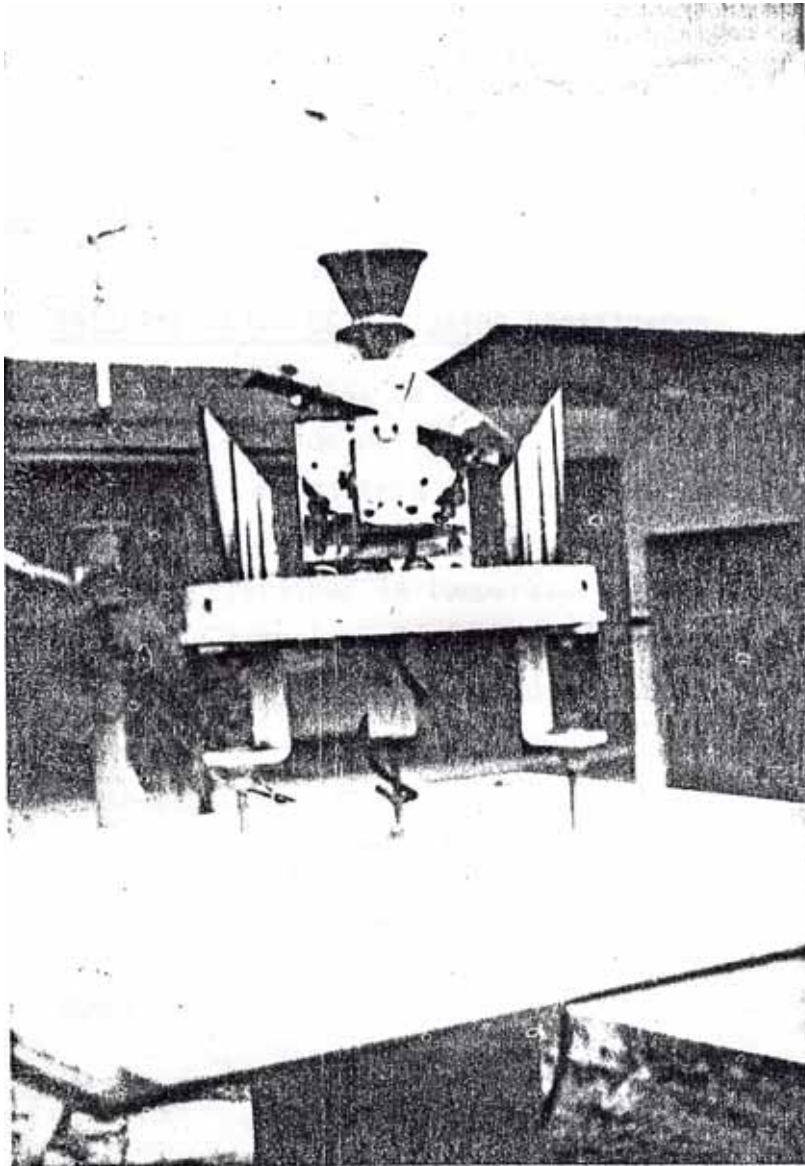


FIG. 2.14 VISTA INTERIOR DEL PLUVIOMETRO

3. INGENIERIA DEL PROYECTO

3.1 INTERPRETACION DE LOS DATOS REGISTRADOS

Desde que la salida de cada radiómetro es lineal con la temperatura de ruido de la antena y que las temperaturas de ruido de la carga fría (cold load) y de la caliente (hot load) son conocidas, así como sus respectivas salidas, es posible determinar la temperatura de ruido de antena que corresponde a cualquier nivel de salida del sistema, mediante relaciones de interpolación o extrapolación.

Haciendo:

$$L = \frac{L_H - L_C}{X_H - X_C}$$

donde:

L = Factor de escala del sistema (kelvins por unidad de salida)

T_H = Temperatura de la carga caliente ($^{\circ}K$)

T_C = Temperatura de la carga fría = $80^{\circ}K$

X_H = Nivel de salida del sistema (divisiones en la carta o voltios) para la carga caliente

X_C = Nivel de salida del sistema para la carga fría (divisiones en la carta o voltios)

se obtiene:

$$T = T_H - L(X_H - X)$$

donde:

T = Temperatura de antena que corresponde a un nivel x de salida del sistema.

La linealidad del sistema puede ser chequeado los niveles de calibración del diodo de ruido. El incremento de la temperatura de ruido adicionada por el diodo de ruido será proporcional al incremento del nivel de salida del sistema, esto es:

$$\Delta T_{ND} = L \Delta X$$

ΔT_{ND} = Incremento de Temperatura adicionada por el diodo de ruido ($^{\circ}K$)

ΔX = Incremento en la salida del sistema cuando el diodo de ruido es accionado.

Las salidas típicas son:

$$T_{REF} \approx 343^{\circ} K$$

$$T_{ND} \approx 106^{\circ} K$$

La temperatura de ruido detectada por el radiómetro es una temperatura de ruido espacial aparente, T_A , debido a que ésta incluye fuentes de ruido adicionales al verdadero ruido espacial detectado por la antena. Estas otras fuentes de ruido, incluyen a los producidos por el alimentador de guía de onda, dicke switch, ruido de la tierra detectada a través de los lóbulos laterales de la antena. Para las antenas de pequeño tamaño, tales como las de 1.80 metros usados en el experimento, que operan a un ángulo de elevación relativamente alta, (manteniendo su primero lóbulo lateral fuera de la tierra) la contribución de ruido a través de los lóbulos laterales es despreciable.

3.2 ATENUACION DERIVADA DE LAS MEDICIONES RADIOMETRICAS

La salida de un radiómetro tipo dicke switch, con el uso en este experimento, es fuertemente proporcional a la temperatura de ruido presente en la entrada del dicke switch. Desde que las mediciones de la temperatura de ruido espacial son sólo una medición indirecta de los niveles de atenuación, es necesario una discusión de los factores que intervienen en la conversión de temperatura de ruido espacial ($^{\circ}\text{K}$) en atenuación (dB).

La temperatura de ruido está relacionada con varios parámetros atmosféricos y del sistema según la relación:

$$T_{\text{med}} = \left(1 - \frac{1}{L_f}\right) T_f + \frac{1}{4\pi L_f} T_g \left(\int_{\text{tierra}} G(\Omega) d\Omega + \int_{\text{espacio}} T_b(\Omega) \cdot G(\Omega) d\Omega \right) \quad (1)$$

- donde:
- T_{med} = Temperatura de ruido a la entrada del dicke switch.
 - T_f = Temperatura física del alimentador de la antena.
 - T_g = Temperatura física aproximada sobre la tierra.
 - $T_b(\Omega)$ = Temperatura de brillo (ó de ruido) del medio circundante a la antena como una función del ángulo sólido Ω
 - L_f = Pérdida en el alimentador de la antena.
 - $G(\Omega)$ = Ganancia de la antena como una función del ángulo sólido (Ω).

En la ecuación (1), la cantidad que está relacionada con la atenuación por lluvia es el término $T_b(\Omega)$. Si la lluvia fuese un cuerpo absorbente perfecto (si no hubiera dispersión) la relación entre la temperatura de brillo y la atenuación sería:

$$T_b(\Omega) = \int_0^{\infty} \left\{ \alpha(\Omega, r) T_r(\Omega, r) \exp - \left(\int_r^{\infty} \alpha(\Omega, t) dt \right) \right\} dr \quad (2)$$

donde α es el coeficiente de absorción de la lluvia y T_r es la temperatura de la lluvia en un punto dado del espacio, La ecuación (2) puede ser simplificada asumiendo las condiciones siguientes:

- a) La temperatura promedio en la dirección Ω es $T_r(\Omega)$
- b) La longitud equivalente de la trayectoria de la lluvia en la dirección Ω es S .
- c) La absorción de la energía promedio a través de la lluvia, en la dirección Ω , es $\alpha(\Omega)$.

por lo tanto, la relación resultante entre la temperatura de ruido y la atenuación es:

$$T_b(\Omega) = \left(1 - \frac{1}{L_r(\Omega)} \right) T_r(\Omega) \quad (3)$$

donde $L_r(\Omega) = e^{\alpha(\Omega) \cdot S}$, es la atenuación total a través de la lluvia en la dirección Ω .

La ecuación (3) provee una forma simple de estimar la atenuación $L_r(\Omega)$ si es conocida $T_b(\Omega)$. La temperatura promedio de las gotas de lluvia en la dirección Ω , desde la isoterma de 0°C (donde comienza a producirse la lluvia) hasta la superficie de la tierra, puede aproximarse a:

$$T_r(\Omega) = \frac{273 + T_0}{2} \quad ({}^{\circ}\text{K})$$

donde T_0 es la temperatura promedio sobre la superficie de la tierra (${}^{\circ}\text{K}$). Aproximadamente, este valor es igual a 28°C (301°K) para la región de Iquitos, obteniéndose así un valor de $T_r = 287^{\circ}\text{K}$. El valor de T_0 ha sido hallado a partir de datos proporcionados por el servicio de Hidrografía y Navegación de la Amazonia.

Para obtener $T_b(\Omega)$ de la ecuación (1), el segundo término debe ser conocido. Como la antena empleada tiene una $L_f \approx 1$ y $\int_{\text{tierra}} G(\Omega) \cdot d\Omega \approx 0$, la temperatura de ruido medida será:

$$T_{\text{med}} = \frac{1}{4\pi} \int_{\text{espacio}} T_b(\Omega) G(\Omega) d\Omega \approx T_b(\Omega_0)$$

donde Ω_0 es la dirección del haz principal de la antena, así:

$$T_{\text{med}} = \left(1 - \frac{1}{L_r(\Omega)} \right) T_r(\Omega)$$

la misma que puede ser reescrita como:

$$A(\text{dB}) = 10 \text{ Log} \frac{T_r}{T_r - T_{\text{med}}}$$

donde A es la atenuación $L_r(\Omega)$ expresada en decibelios.

El método aquí desarrollado no tiene en cuenta las pérdidas producidas por dispersión y es posible que la atenuación sea infravalorada. Por lo tanto hay que tener cuidado al utilizar los datos obtenidos para frecuencias en los que la parte de atenuación imputable a la dispersión, revista importancia. La relación aproximada de la tenucción por dispersión a la atenuación total por lluvia es dada en la figura 1.6.

La confiabilidad de los valores de atenuación derivadas de este método son estimados en ± 0.5 dB para niveles cercanos a 3 dB, incrementandose en pasos de ± 1 dB para niveles de atenuación superiores a 10 dB. Por lo tanto, las mediciones radiométricas están limitadas entre 3 y 10 dB. Fuera de estos rangos pierda exactitud.

Por consiguiente, la temperatura de ruido aparente es:

$$T_A = T_s + T_n$$

donde: T_s es el ruido espacial y T_n es el ruido generado por el alimentador y el dicke switch.

Sin embargo, el método de calibración descrito compensa el valor de T_n . La temperatura de ruido aparente percibido por el radiómetro cuando las cargas fría y caliente están sobre el alimentador de la antena, también incluye las contribuciones de ruido T_n del alimentador y la guía de onda por lo tanto, T_n es compensado por un simple establecimiento directo de niveles de ruido en términos de la temperatura absoluta de las cargas fría y caliente.

Realmente existe un pequeño error introducido por este método debido a que la contribución T_n es una función de la temperatura física T_{amb} (K) de la guía de onda y el switch relacionado por la ecuación:

$$T_n = T_{amb} (L-1)$$

donde L es el factor de pérdida de estos componentes. La atenuación total de la guía de onda alimentadora y el switch es alrededor de 0.27 dB, la cual corresponde a un factor de pérdida L de 1.064, obteniendo:

$$T_n \approx 0.064 T_{amb}$$

Así, el valor de T_n variará sólo alrededor de 3^0K cuando la temperatura de ambiente, T_{amb} , varié entre 35^0K (un valor razonable para el rango de variación de la temperatura de ambiente). Por consiguiente el posible error en que se incurre al ignorar las variaciones diarias de la T_{amb} es pequeña, desde que las calibraciones con las cargas fría y caliente son realizados en 2 y 4 semanas.

3.3 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS/ANALISIS DE LA METODOLOGIA

Para el diseño eficiente de un sistema de comunicaciones - por satélite es necesario conocer el porcentaje de tiempo durante el cual es excedido un valor dado de atenuación por lluvia, sobre la trayectoria de propagación. El método más confiable para obtener tales estadísticas es midiendo las atenuaciones durante largos periodos de tiempo.

El periodo de colección de datos del presente estudio abarca desde el 15 de noviembre de 1983 al 15 de abril de 1984.

La reducción de los datos ha sido realizada a partir de los registros analógicos.

3.3.1 Procesamiento de datos radiométricos

Los registros analógicos de los datos radiométricos de 11.6, 20 y 30 GHz corresponden a niveles de voltaje proporcionales a la temperatura de ruido especial; los mismos que pueden ser convertidos a unidades de atenuación de acuerdo al párrafo anterior.

Los resultados finales que se desea encontrar corresponden al incremento de los niveles de atenuación (con respecto al cielo despejado) visto por la antena cuando su haz es interceptado por precipitaciones pluviales y nubes.

Los desplazamientos de los recorders han sido reducidos directamente a unidades dB emplando una serie de transparencias escaladas en atenuación. Así, la atenuación en cualquier punto del trazo radiométrico es determinada por la escala logarítmica dibujada sobre la transparencia. La escala logarítmica ha sido computada a partir de los desplazamientos de los recorders que son convertidos a niveles de temperatura y éstos a su vez en niveles de atenuación.

3.3.2 Procesamiento de datos pluviométricos

Las distribuciones de las precipitaciones pluviales son obtenidas a partir de datos proporcionados por el pluviómetro. Como se sabe, el pluviómetro proporciona pulsos cada 8 centímetros cúbicos (0.254 mm) de agua de lluvia. Cada pulso llega hacia la interfase radiométrica donde es integrada hasta formar escaleras de 10 pasos. Las escaleras así formadas son graficadas en el registro análogo conjuntamente con pequeños pulsos (producidos por el propio graficador) que aparecen cada minuto, obteniéndose de esta manera una relación de milímetros de lluvia por minuto.

El intervalo de muestreo del registro de lluvia es de un minuto. La velocidad de precipitación de lluvia durante un minuto cualquiera está dado por:

$$V = (0.254) (60)n$$

$$V = 15.24 (n) \quad \text{mm/hr}$$

donde n es el número de pulsos del pluviómetro provocados por la lluvia.

La velocidad mínima de precipitación fue escogida igual a 2.54 mm/hr que equivale a un pulso pluviométrico cada 6 minutos.

3.4 PREDICCIÓN TEORICA DE LA ATENUACION PRODUCIDA POR LA LLUVIA METODO CCIR

Anteriormente se explicó que basados en la teoría clásica de Mie era factible relacionar una atenuación específica producida por la lluvia (dB/Km), a una frecuencia determinada, con una intensidad de lluvia R (mm/hr). Estos resultados son mostrados en las figuras 1-4 y 1-5. Empleando estos datos es posible calcular la atenuación que se prevé será excedida para distintos porcentajes de tiempo en las distintas condiciones climáticas, en el supuesto de que tam

bién se conoce la longitud del trayecto a través de la lluvia.

La representación esquemática de un trayecto tierra- espacio con las variables que se utilizaran en el proceso de predicción de atenuación son mostradas en la figura 3-1.

Previamente al empleo del metodo desarrollado para calcular las estadísticas a largo plazo de las atenuaciones debida a la lluvia en trayectos oblicuos, es preciso conocer los parametros siguientes:

R_p : Intensidad de la lluvia en el punto que se esta tratando durante los porcentajes de tiempo requeridos(mm/hr).

h_0 : Altura de la estación terrena (Km) sobre el nivel del mar.

ϕ Latitud de la Estación Terrena (grados)

θ Angulo de elevación (grados)

El metodo propuesto consta de los siguientes pasos: (hasta el paso 7 para el caso de 0.01% del tiempo y el paso 8 para otros porcentajes)

Paso 1: La altura de la lluvia h_R se obtiene a partir de (ver parrafo 3.4.1)

$$h_R = 5.1 - 2.15 \text{ Log} \left(1 + 10^{\frac{\phi - 27}{25}} \right) \text{ Km}$$

Paso 2: La longitud del trayecto oblicuo L_s , por debajo de la altura de la lluvia se obtiene de la formula:

$$L_s = \frac{2 \cdot (h_R - h_0)}{\left[\text{Sen}^2 \theta + 2 \cdot \frac{(h_R - h_0)}{R_e} \right]^{0.5} + \text{Sen} \theta} \text{ Km}$$

para $\theta < 10^\circ$

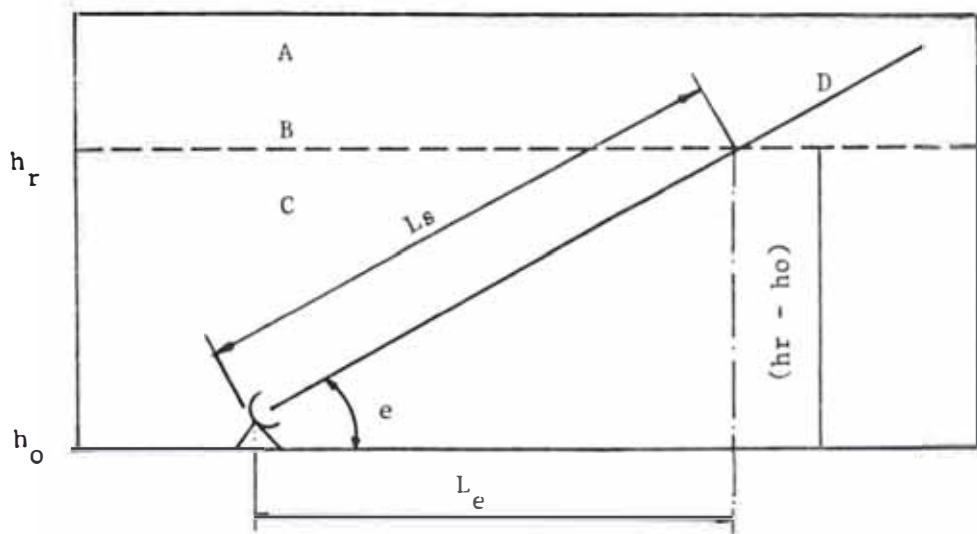


FIG 3.1 - Representación esquemática de un trayecto tierra-espacio con los parámetros que se utilizarán en el proceso de predicción de la atenuación.

- A: Precipitación en forma de hielo
- B: Altura de lluvia
- C: Precipitación en forma líquida
- D: Trayecto tierra-espacio

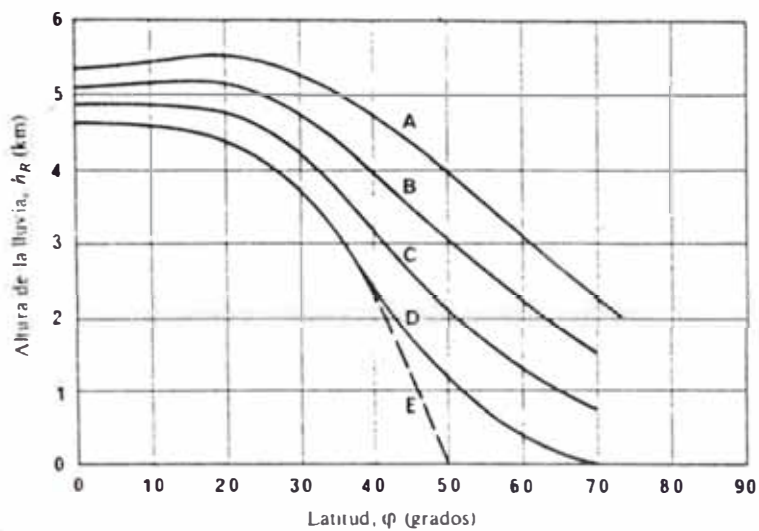


FIGURA 3.2 *Altura de la lluvia h_R (km) por debajo de la cual se prevé atenuación debida a los hidrometeoros, en función de la latitud φ (grados)*

- Curvas
- A: Probabilidad de ocurrencia de intensidad de lluvia asociada: 0,001 %
 - B: Probabilidad de ocurrencia de intensidad de lluvia asociada: 0,01 %
 - C: Probabilidad de ocurrencia de intensidad de lluvia asociada: 0,1 %
 - D: Probabilidad de ocurrencia de intensidad de lluvia asociada: 1,0 %
 - E: Incluye la ocurrencia de lluvia y nieve

donde R_e es el radio efectivo de la tierra (8500 km).

Para $\theta > 10^\circ$, la ecuación anterior puede simplificarse como sigue:

$$L_s = \frac{h_R - h_0}{\text{Sen } \theta}$$

Paso 3: La proyección horizontal L_G , de la longitud del trayecto se obtiene de :

$$L_G = L_s \cdot \text{Cos } \theta \quad (\text{Km})$$

Paso 4: El factor de reducción r_p , para el 0.01% del tiempo se calcula a partir de la formula:

$$r_p = \frac{90}{90 + 4L_G}$$

Paso 5: Obtener la intensidad de lluvia R_p , excedida durante el 0.01% del tiempo (con un tiempo de integración de un minuto). Si no se puede obtener este dato ver parrafo 3.4.2

Paso 6: Obtener la atenuación específica δ_R , utilizando - las figuras 1-4 y 1-5.

Paso 7: La atenuación excedida durante el 0.01% puede obtenerse a partir de :

$$A_{0.01} = \delta_R L_s r_p \quad (\text{dB})$$

Paso 8: La atenuación excedida entre el 0.01% y el 0.1% - puede estimarse a partir del resultado anterior aplicando la formula:

$$A_p = A_{0.01} \left(\frac{p}{0.01} \right)^{-a}$$

siendo:

$$a = 0.33 \quad \text{para} \quad 0.001 \leq p < 0.01$$

$$a = 0.41 \quad \text{para} \quad 0.01 \leq p < 0.1$$

para porcentajes de tiempo superiores al 0.1% el procedi-

miento puede modificarse como sigue:

- (a) Obtener la altura de la lluvia h_R para porcentajes de tiempo del 1%, utilizando la figura 3-2.
- (b) Los pasos 2 y 3 no cambian.
- (c) Emplear un factor de reducción $r_p = 1$
- (d) Obtener la intensidad de lluvia R_p , excedida durante el 1% del tiempo.
- (e) Obtener la atenuación excedida para el 1% del tiempo
- (f) Calcular las atenuaciones del trayecto A_p , durante un porcentaje de tiempo intermedio p , entre el 0.1% y el 1% por interpolación mediante la siguiente fórmula aproximada

$$\frac{A_p}{A_{0.1}} = \left(\frac{p}{0.1} \right)^{-a}$$

Donde $A_{0.1}$ es la atenuación calculada anteriormente para el porcentaje de tiempo del 0.1%.

El valor de a esta dado por:

$$a = \log \left(A_{0.1} / A_{1.0} \right)$$

3.4.1 Altura de la Lluvia

Un modelo razonable para que se produzca agua líquida en una tormenta es suponer que las partículas líquidas están presentes por debajo de la altura de la isoterma de 0°C.

En la figura 3.2 se presentan promedios por zonas (con respecto a la longitud en cada latitud) de la altura de la Isoterma de 0°C, h_R (Km), frente a la latitud, ϕ grados dado por el CCIR.

Para facilitar el análisis, la curva del 0.01% de h_R (Km) frente a la latitud, ϕ (grados), puede ser representada como:

$$h_R = 5.1 - 2.15 \log \left(1 + 10^{\frac{\phi - 27}{25}} \right)$$

3.4.2 Modelos Para la Distribución de la Intensidad de Lluvia

En ausencia de datos apropiados sobre intensidad de lluvia en una localidad determinada pueden emplearse la figura 3.3 que es un resumen de datos proporcionados por el Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicaciones.

Se han desarrollado diferentes ecuaciones que predicen las estadísticas pluviométricas a partir de datos meteorológicos. Un modelo desarrollado recientemente por Rice y Holmberg presenta una relación estadística entre las distribuciones de la intensidad de lluvia integrados por minuto.

La ecuación general es:

$$T_1(R) = \frac{\beta M}{R_{1t}} e^{-R/R_{1t}} + \frac{M(1-\beta)}{R_{2t}} \left\{ 0.35 e^{-0.453074R/R_{2t}} + 0.65 e^{-2.857143 R/R_{2t}} \right\}$$

y para los Estados Unidos:

$$T_1(R) = M \left\{ 0.03 \exp(-0.03R) + 0.2(1-\beta) \left[\exp(-0.253R) + 1.86 \exp(-1.63R) \right] \right\} \%$$

donde:

Número de horas por año que la lluvia excede el nivel R. Para transformar a porcentaje de tiempo necesario dividir $T_1(R)$ entre 87.6

M Precipitación anual en mm

β Relación entre las precipitaciones en forma de tormenta (M_1) y la precipitación anual = M_1/M

R_{1t} (mm/hr): Precipitación promedio durante tormentas = M_1/T_{1t} , siendo T_{1t} el número total de horas con tormenta.

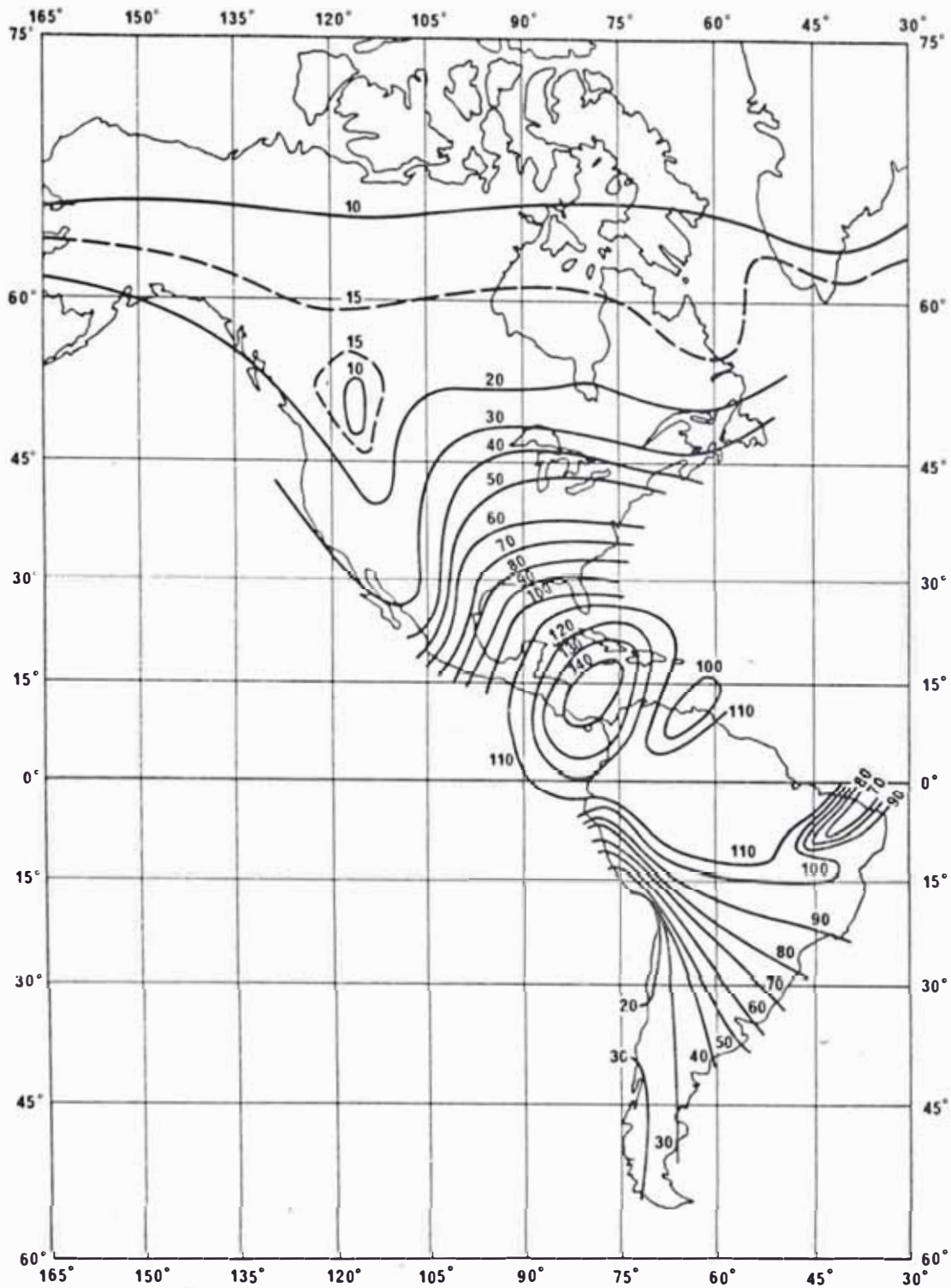


FIGURA 3.3 - Contornos de intensidad de precipitación en forma de lluvia; 0,01 % del tiempo

$$R_{2t} = \frac{R_{1t}}{(1-\beta)^M} = T_{2t}$$

: Contraparte de R_{1t} sin tormentas

La distribución del parámetro β alrededor del mundo es mostrado en la figura 3-4.

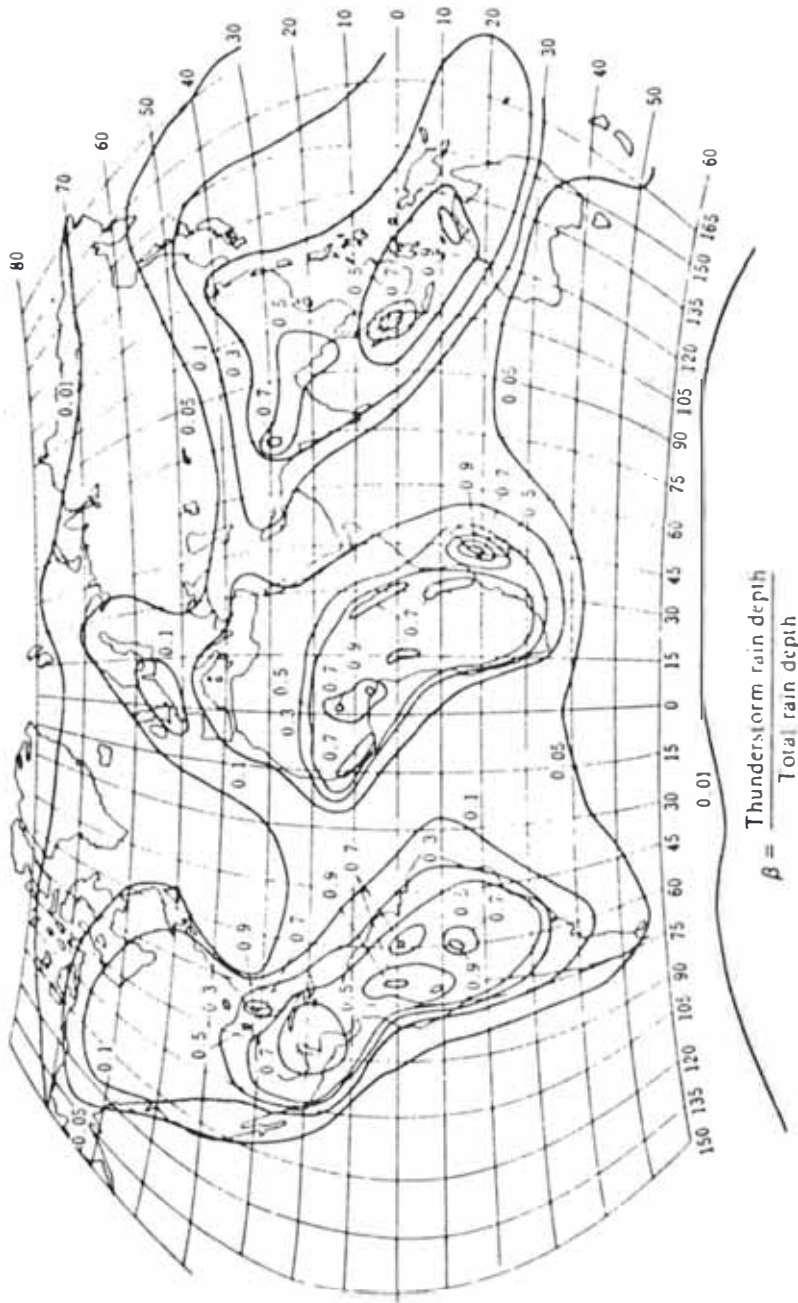


FIG 3.4 DISTRIBUCION DEL PARAMETRO ALREDEDOR DEL MUNDO

CAPITULO IV

4. PRESENTACION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS

4.1 DISTRIBUCION ESTADISTICA DE LA PRECIPITACION PLUVIAL

La distribución estadística de la duración de las lluvias que exceden umbrales preestablecidos para la región en estudio (Iquitos), es dado en la figura 4-1. El tiempo de observación abarca del 15 de noviembre de 1983 al 15 de abril de 1984, con la pérdida de registro de una sola tormenta debido a problemas de energía causados por una descarga atmosférica.

El tiempo de integración elegido fue de un minuto, considerando como nivel de precipitación mínimo, una intensidad de 2.54 mm/hr. El cuadro 4.1 muestra el número de minutos durante los cuales la lluvia excedió un nivel de precipitación dado.

CUADRO 4-1: Total de minutos de precipitación que exceden los valores indicados:

MES mm/hr	NOV 83	DIC 83	ENE 84	FEB. 84	MAR 84	ABR 84	ACUM. (MIN)	% ACUMUL.
5.08	313	689	827	1216	564	760	4369	2.01
15.24	163	345	415	356	202	341	1822	0.838
30.48	99	163	153	98	122	145	780	0.359
45.75	44	118	96	37	85	80	460	0.212
60.96	6	71	56	17	61	38	249	0.115
76.20		40	23	4	28	13	108	0.0497
91.44	1	22	12		13	4	52	0.0239
106.68		13	7		3	1	24	0.0110
121.92		6	2		1		9	0.00414
137.16		2	1				3	0.00138

Tiempo de Observación: 217,440 minutos

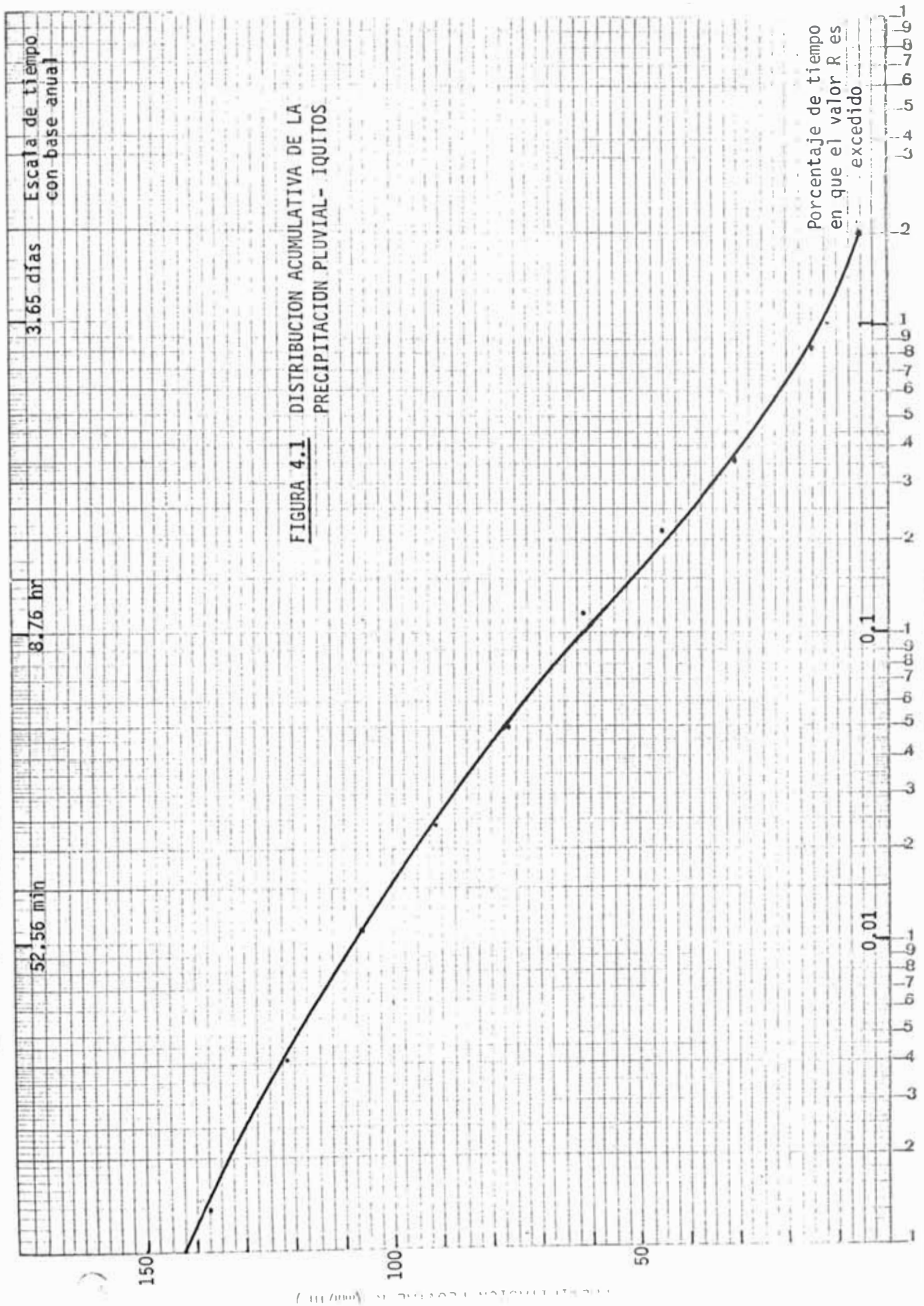


FIGURA 4.1 DISTRIBUCION ACUMULATIVA DE LA PRECIPITACION PLUVIAL- IQUITOS

A partir de la figura 3-2, proporcionada por la CCIR, el nivel esperado de precipitación que será excedido durante el 0.01% del tiempo es igual a 110 mm/hr. En nuestro caso, para este mismo porcentaje de tiempo, el nivel excedido fue de 107.0 mm/h, un valor bastante cercano al pronosticado.

De acuerdo a datos meteorológicos recopilados por el servicio de Hidrografía y Navegación de la Amazonía durante el periodo abril 83 a marzo 84 se registró un total de 2661 mm. de lluvia. Este nivel sitúa a Iquitos como una de las regiones de mayor precipitación pluvial en el mundo.

En las figuras 4-2 al 4-4, se muestran las distribuciones de minutos de lluvia sobre un periodo de 24 horas para diferentes niveles de precipitación, obsérvese que la concentración de las altas intensidades ocurre en horas de la noche. Este resultado era de esperar por cuanto las grandes nubes son formadas como consecuencia de las altas temperaturas que imperan durante el día.

Un análisis reciente indica que la distribución de la intensidad de la lluvia se describe mejor mediante un modelo que se aproxima a una distribución log-normal para pequeñas intensidades de lluvia y presenta una distribución gamma para grandes intensidades de lluvia. La figura 4-5 comprueba tal afirmación.

La función Log-normal empleada está dada por:

$$f(R) = \frac{0.4343}{\sqrt{2\pi} \sigma_R} \exp \left[- \frac{(\log R - m)^2}{2 \sigma^2} \right]$$

con: σ = Desviación estandar de la distribución $\log_{10} R$
 $= 0.3732$
 m = Promedio de la distribución $\log_{10} R = 0.9803$

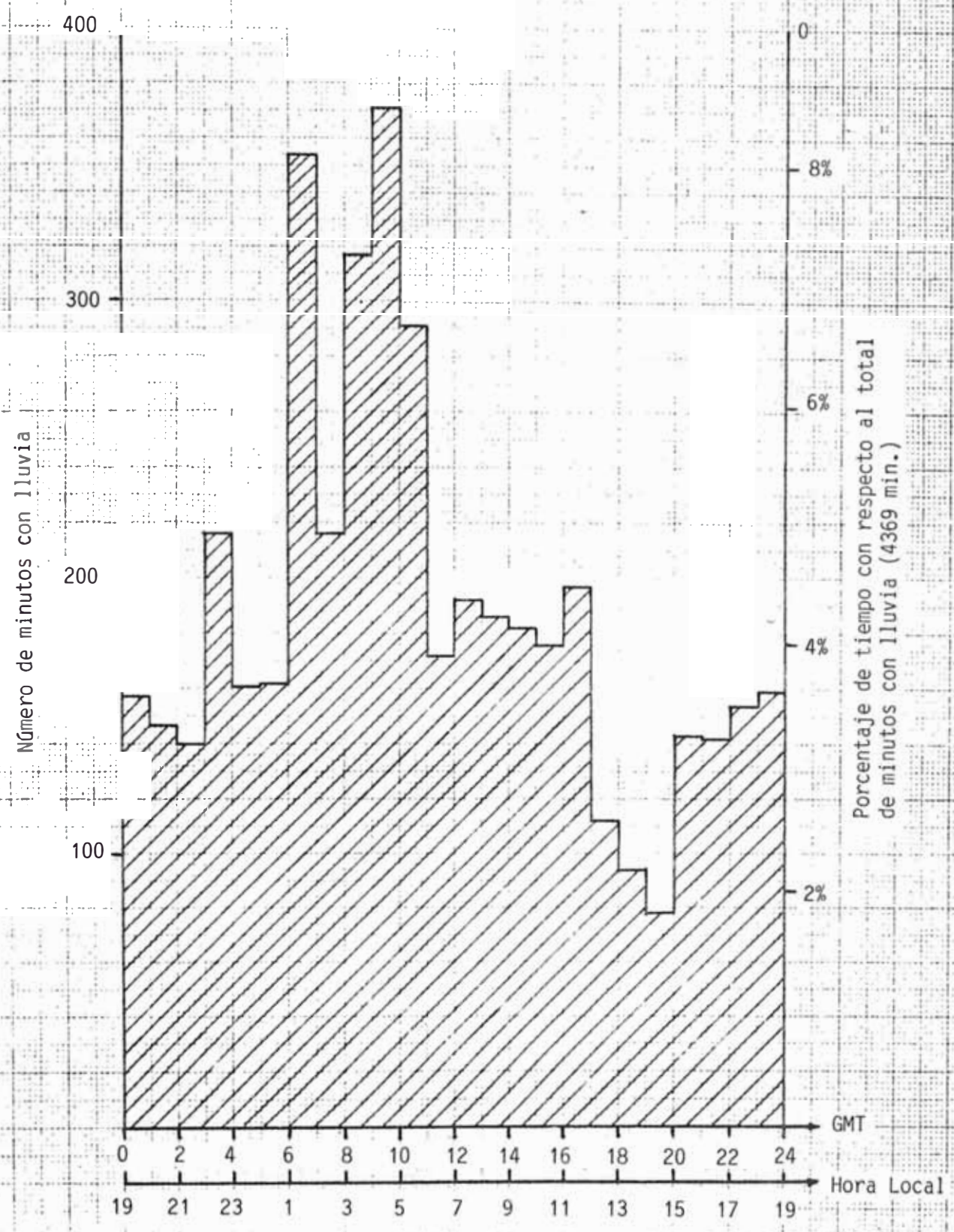
Mientras que para la función gamma la relación empleada fue:

$$f(R) = \frac{\beta^\nu}{\Gamma(\nu)} R^{\nu-1} e^{-\beta R}$$

con: $\nu = 0.511$
 $\beta = 0.0453$
 $\Gamma(\nu) = 1.735$

Donde: ν y β son parámetros de la distribución. El valor medio m y la varianza σ^2 , son representadas como:

Fig. 4.2 - Distribución de minutos con lluvia sobre un período de 24 horas.



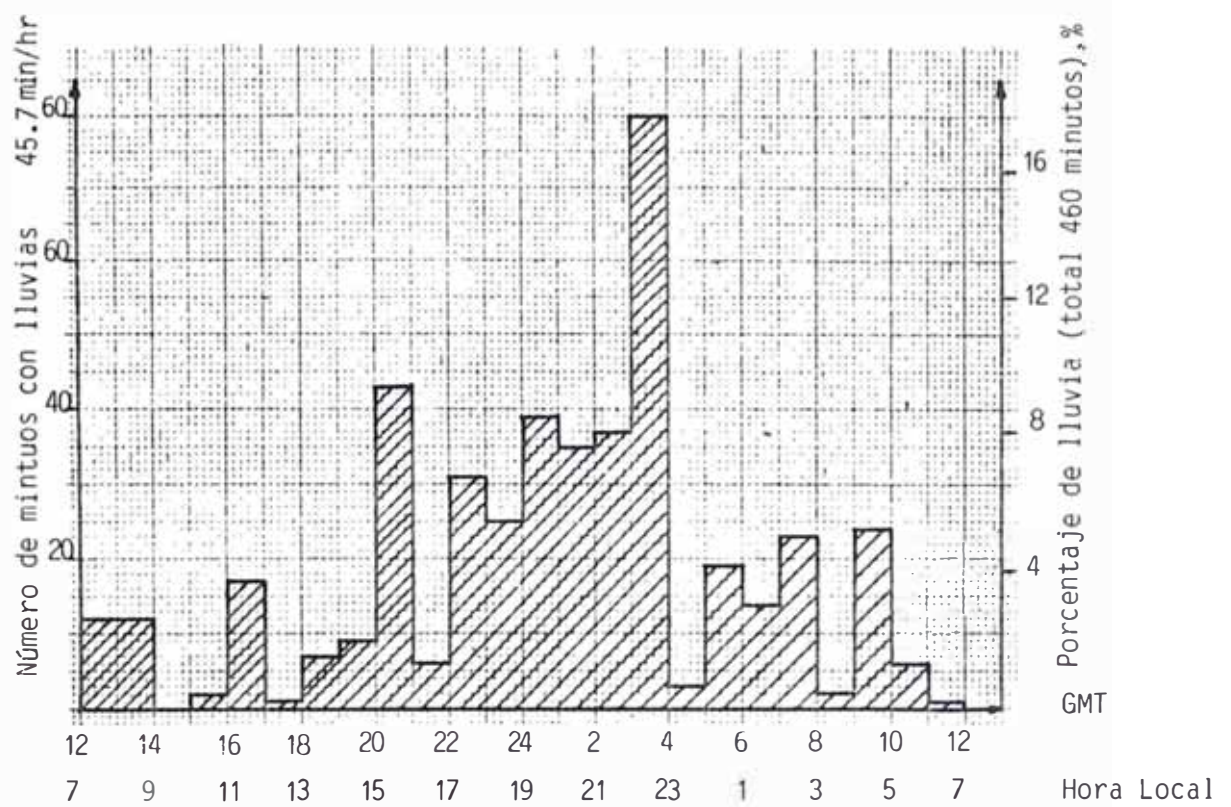


Fig. 4.3 - Distribución de minutos con lluvia 45.7 min/hr sobre un período de 24 horas.

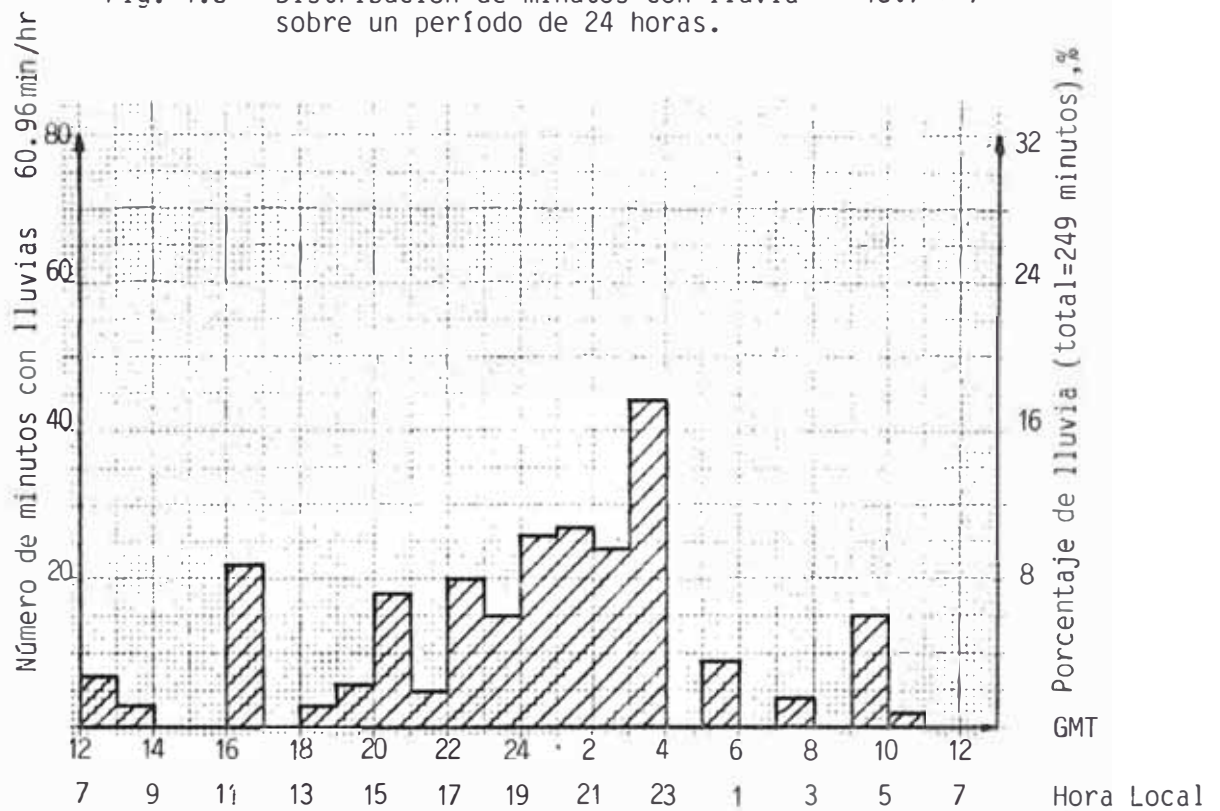


Fig. 4.4 - Distribución de minutos con lluvia 60.96 mm/hr sobre un período de 24 horas.

FUNCION GAMMA
VALORES DE $\Gamma(x)$

x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$
1,00	1,00000	1,25	0,90640	1,50	0,88623	1,75	0,91906
01	0,99433	26	0,90440	51	0,88659	76	0,92137
02	0,98884	27	0,90250	52	0,88704	77	0,92376
03	0,98355	28	0,90072	53	0,88757	78	0,92623
04	0,97844	29	0,89904	54	0,88818	79	0,92877
1,05	0,97350	1,30	0,89747	1,55	0,88887	1,80	0,93138
06	0,96874	31	0,89600	56	0,88964	81	0,93408
07	0,96415	32	0,89464	57	0,89049	82	0,93685
08	0,95973	33	0,89338	58	0,89142	83	0,93969
09	0,95546	34	0,89222	59	0,89243	84	0,94261
1,10	0,95135	1,35	0,89115	1,60	0,89352	1,85	0,94561
11	0,94740	36	0,89018	61	0,89468	86	0,94869
12	0,94359	37	0,88931	62	0,89592	87	0,95184
13	0,93993	38	0,88854	63	0,89724	88	0,95507
14	0,93642	39	0,88785	64	0,89864	89	0,95838
1,15	0,93304	1,40	0,88726	1,65	0,90012	1,90	0,96177
16	0,92980	41	0,88676	66	0,90167	91	0,96523
17	0,92670	42	0,88636	67	0,90330	92	0,96877
18	0,92373	43	0,88604	68	0,90500	93	0,97240
19	0,92089	44	0,88581	69	0,90678	94	0,97610
1,20	0,91817	1,45	0,88566	1,70	0,90864	1,95	0,97988
21	0,91558	46	0,88560	71	0,91057	96	0,98374
22	0,91311	47	0,88563	72	0,91258	97	0,98768
23	0,91075	48	0,88575	73	0,91467	98	0,99171
24	0,90852	49	0,88595	74	0,91683	99	0,99581
1,25	0,90640	1,50	0,88623	1,75	0,91906	2,00	1,00000

Los valores de la función Gamma para $x < 1$ y $x > 2$ pueden ser calculados mediante las fórmulas:

$$\Gamma(x) = \frac{\Gamma(x+1)}{x}, \quad \Gamma(x) = (x-1)\Gamma(x-1).$$

Ejemplos:

$$1) \Gamma(0,7) = \frac{\Gamma(1,7)}{0,7} = \frac{0,90864}{0,7} = 1,2981.$$

$$2) \Gamma(3,5) = 2,5 \Gamma(2,5) = 2,5 \cdot 1,5 \cdot \Gamma(1,5) = 2,5 \cdot 1,5 \cdot 0,88623 = 3,32336.$$

$$m = \sqrt{\beta}$$

$$\sigma^2 = \sqrt{\beta^2}$$

El valor de $\Gamma(\sqrt{\beta})$ es obtenido a partir de la tabla 4-1

4.2 DISTRIBUCION ESTADISTICA DE LOS NIVELES DE ATENUACION

4.2.1 Distribución de los niveles de atenuación para 11.6 GHz
La figura 4-6 muestra la distribución de minutos de atenuación en dB sobre el nivel de cielo despejado que exceden los valores indicados en sus ordenadas, obtenidas durante el periodo de observación. De este tiempo fueron descontados 57 horas debido a problemas en el sistema. Los resultados incluyen el efecto producido por las nubes y el outage solar. El valor de la temperatura de ruido en condiciones de cielo despejado oscila alrededor de 67.8°K, el mismo que corresponde a un nivel de 1.2 dB.

El cuadro 4-2 indica los valores obtenidos del análisis de datos y que han sido empleados para la elaboración de la figura anterior.

CUADRO 4-2: Total de minutos de atenuación (dB) a 11.6 GHz sobre el nivel de cielo despejado y de la temperatura de ruido total que exceden los valores indicados.

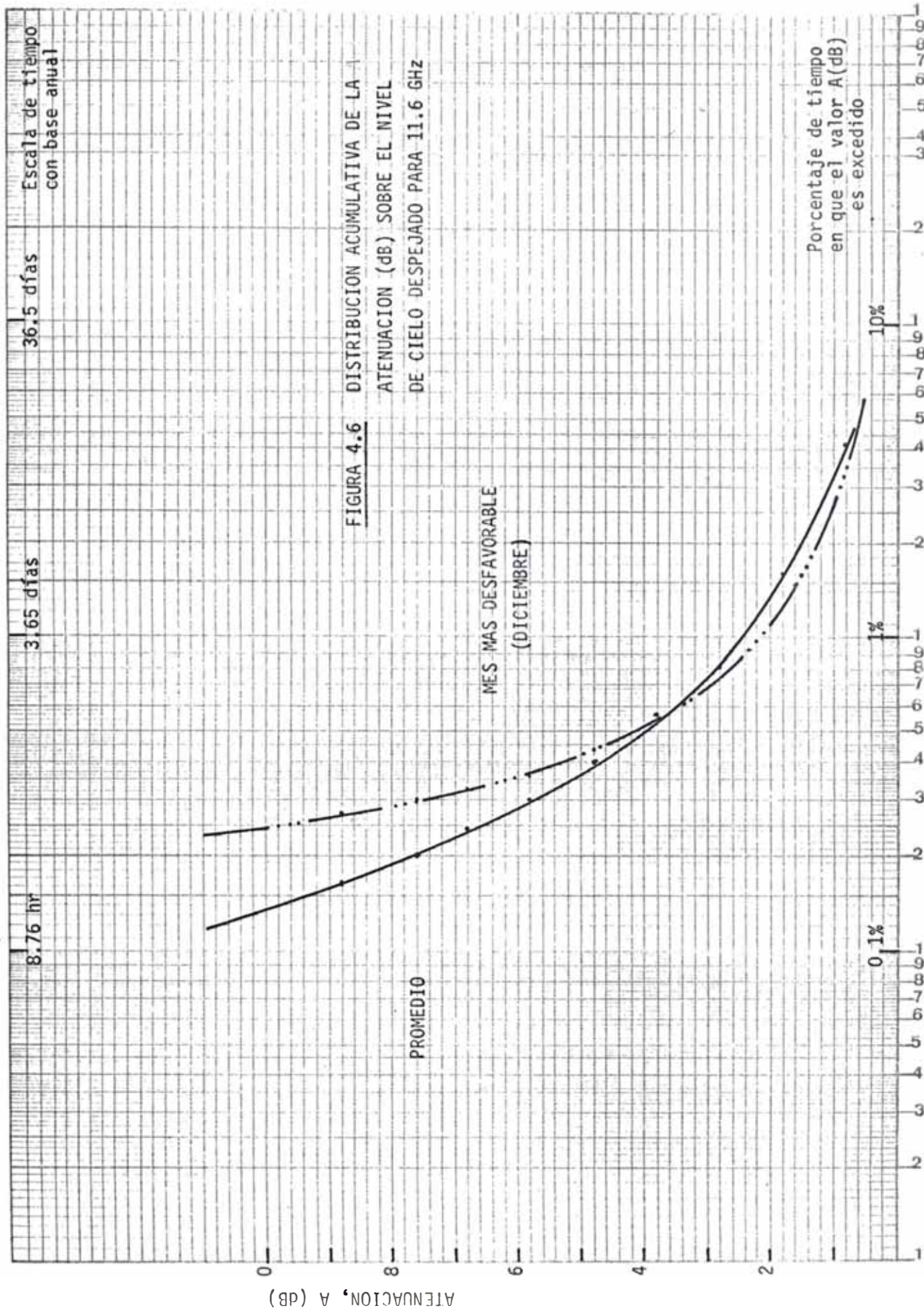
MES		NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MIN	%
°K	dB	83	83	84	84	84	84	ACUM	ACUM.
105.9	0.8	888	1846	1413	2081	1623	1192	9043	4.2
143.2	1.8	193	795	594	737	520	535	3374	1.57
172.7	2.8	159	425	396	233	256	276	1745	0.810
196.2	3.8	114	299	290	128	217	170	1218	0.565
214.9	4.8	71	197	220	65	185	139	877	0.407
229.7	5.8	4	146	173	33	164	121	641	0.298
241.5	6.8		107	146	21	145	108	527	0.245
250.9	7.8		86	116	2	136	91	431	0.200
259.3	8.8		72	80		123	78	353	0.164

Tiempo de observación: 215,420 minutos

A fin de emplear la metodología desarrollada por el comité consultivo internacional de radiocomunicaciones (ver 3-4) para la predicción teórica de la atenuación producida por la lluvia se

FECHA -----

PROG. ACADÉMICO -----



emplearán los siguientes datos:

Angulo de elevación, θ : 27°.7

Longitud de la Estación Terrena, $\varnothing = 3^{\circ}43'48''$

Altitud de la Est. Terrena sobre el nivel del mar, $h_0=105$ m.

con los cuales se obtuvieron los siguientes resultados para diferentes porcentajes de tiempo.

	0.01%	1.0%
Altura de la lluvia, h_R	4.9965 Km	4.646 Km
Trayecto oblicuo, L_S	10.523 Km	9.769 Km
Proyección horizontal, L_G	9.317 Km	8.649 Km
Factor de reducción, r_p	0.7072	1.0
Intensidad de lluvia excedida	107 mm/hr	11 mm/hr
Atenuación específica	4.45 dB/Km	0.28 dB/Km
Atenuación excedida	33.116 dB	2.73 dB

A partir de $A_{0.01} = 33.116$ dB es posible determinar la atenuación esperada en 0.1% del tiempo de acuerdo a la relación:

$$A_{0.1} = A_{0.01} \left(\frac{0.1}{0.01} \right)^{-0.41}$$

Con lo cual:

$$A_{0.1} = 12.88 \text{ dB}$$

Por otro lado, las atenuaciones del trayecto A_p , durante un porcentaje de tiempo intermedio, p , entre el 0.1% y el 1% pueden ser hallados por interpolación, según la relación:

$$\frac{A_p}{A_{0.01}} = \left(\frac{p}{0.1} \right)^{-a}$$

Donde: $a = \log (A_{0.1}/A_{1.0})$, e igual a 0.6737

En el cuadro 4-3, se muestran los valores de atenuación predichos empleando el método CCIR para diferentes porcentajes de tiempo. La figura 4-7 muestra la comparación de las distribuciones teórica y experimental de la atenuación producida por la lluvia a 11.6 GHz.

CUADRO 4-3 Atenuación predecida empleando el método CCIR

% TIEMPO	ATENUACION EXCEDIDA (dB)
0.1	12.880
0.15	9.801
0.2	8.074
0.3	6.144
0.4	5.061
0.5	4.355
0.6	3.851
0.7	3.472
0.8	3.173
0.9	2.931
1.0	2.730

En la misma figura 4-7, se incluye la distribución de atenuación producida por la lluvia a la frecuencia de 11.7 GHz, obtenida en la ciudad de Manáus (Brasil). Los datos fueron recopilados durante cinco meses, desde noviembre 30, hasta abril 27 de 1974, empleando también una estación radiométrica, pero con una antena de 3 m. y un ángulo de elevación de 55°. Lamentablemente, el pluviómetro empleado en Brasil no tuvo la confiabilidad esperada, por lo que no ha sido posible comparar las distribuciones de precipitación.

Combinando los resultados mostrados en la figura 4-6 con la distribución pluvial (fig. 4-1) es posible obtener una curva de atenuación dB versus el nivel de precipitación pluvial para el mismo porcentaje de tiempo. La relación obtenida es presentada en la figura 4-8.

4.2.2 Distribuciones de los niveles de atenuación para 19.5GHz
La distribución acumulada de las mediciones de atenuación a -- 19.5 GHz sobre el nivel de cielo despejado, derivadas a partir de las mediciones de temperatura de ruido espacial, es mostrada en la figura 4-8. Como en el caso anterior, los resultados incluyen el efecto producido por las nubes. El nivel de la tem

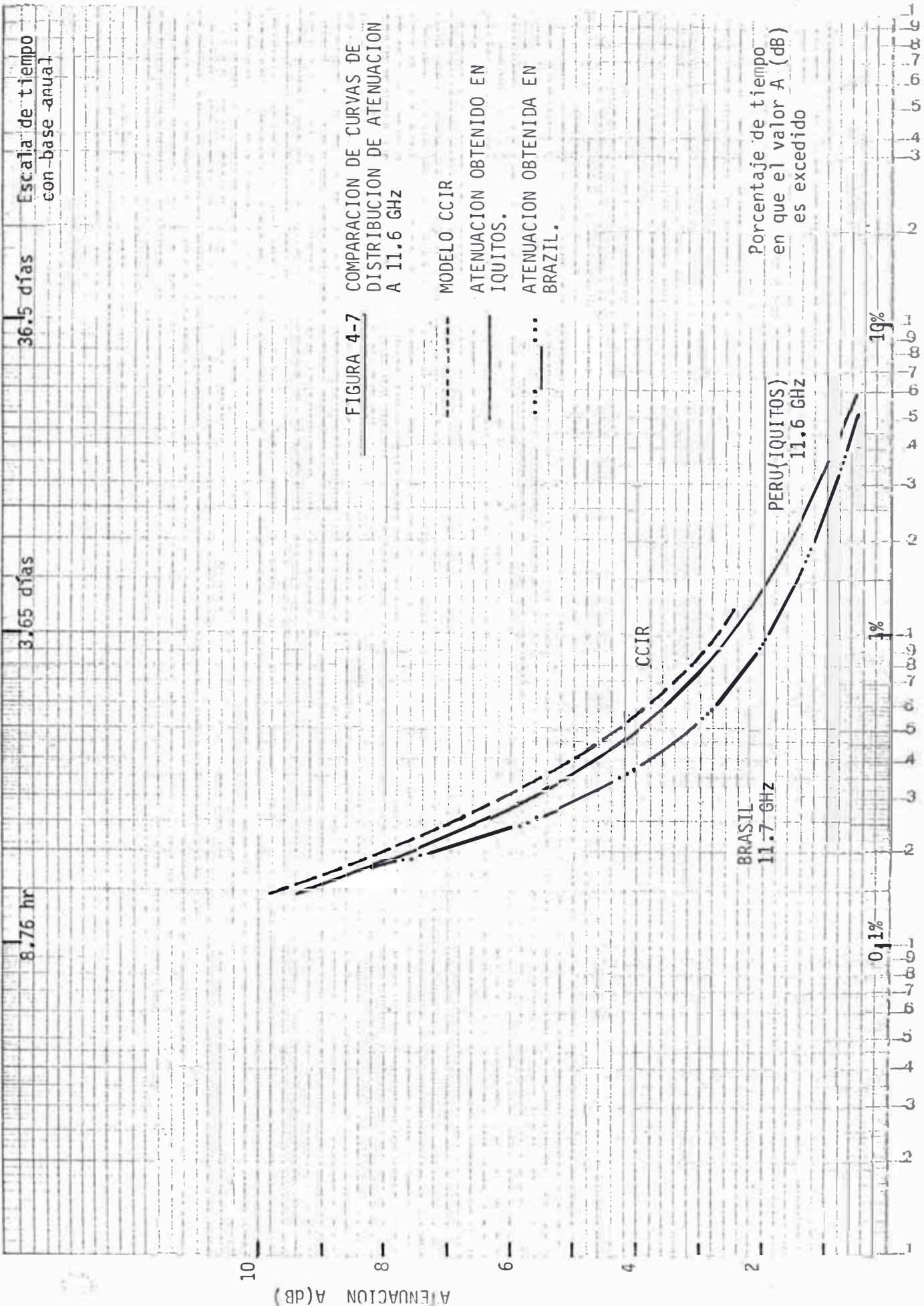


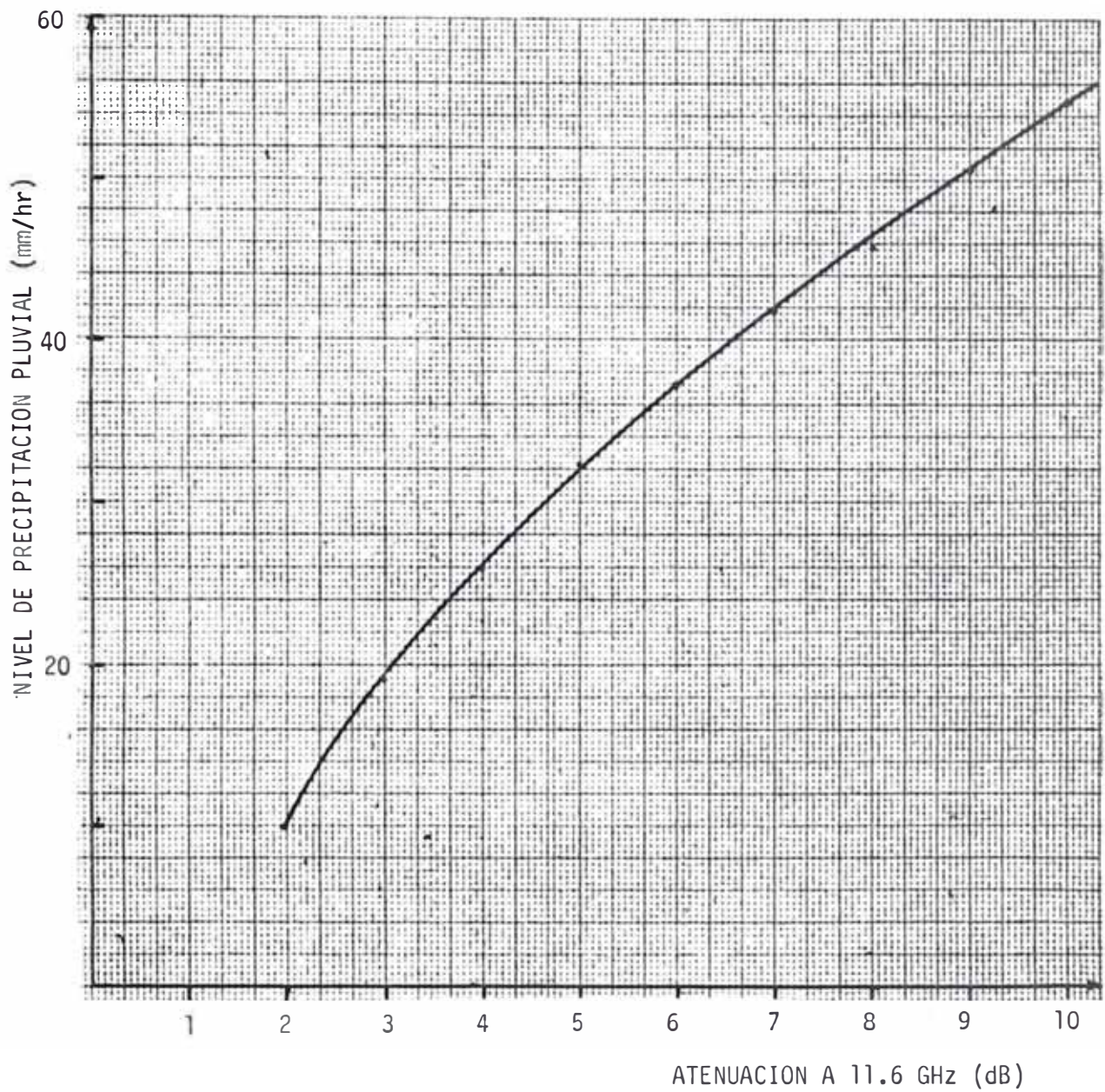
FIGURA 4-7

COMPARACION DE CURVAS DE DISTRIBUCION DE ATENUACION A 11.6 GHZ

MODELO CCIR
ATENUACION OBTENIDO EN IQUITOS.
ATENUACION OBTENIDA EN BRAZIL.

Porcentaje de tiempo en que el valor A (dB) es excedido

FIGURA 4.8 ATENUACION A 11.6 GHz vs
PRECIPITACION PLUVIAL



peratura de ruido en condiciones de cielo despejado, oscila alrededor de 95.5 grados Kelvins, que corresponde a una atenuación equivalente de 1.76 dB. El cuadro 4.4 indica los valores empleados para la elaboración de la figura anterior.

CUADRO 4-4 : Total de minutos de atenuación (dB) a 19.5 GHz sobre el nivel de cielo despejado y de la temperatura de ruido espacial total (°K) que exceden los valores indicados.

MES		NOV 83	DIC 83	ENE 84	FEB 84	MAR 84	ABR 84	MIN ACUM	% ACUM.
°K	dB								
143.2	1.24	1598	2527	1171	2342	2005	1304	10947	5.67
172.7	2.24	458	1529	726	1611	1096	831	6251	3.24
196.2	3.24	345	1209	529	1117	704	634	4538	2.35
214.9	4.24	209	992	405	777	447	511	3341	1.73
229.7	5.24	182	791	309	513	337	351	2483	1.29
241.5	6.24	166	634	273	319	246	272	1910	0.990
250.9	7.24	148	480	242	240	223	247	1580	0.819
258.3	8.24	140	390	211	150	199	187	1272	0.659

Tiempo de observación: 192,960 minutos

Empleando el modelo teórico desarrollado por el CCIR, con los mismos datos anteriores, obtenemos los siguientes resultados para diferentes porcentajes de tiempo:

$$A_{0.01} = 81.86 \quad \text{con } \delta_R^1 = 11 \text{ dB/Km}$$

$$A_{0.1} = 31.85$$

$$A_{1.0} = 8.79 \quad \text{con } \delta_R^1 = 0.9 \text{ dB/Km}$$

De donde, las atenuaciones del trayecto A_p , para porcentajes de tiempo intermedio, p , entre 0.1% y 1% pueden ser hallados por interpolación con $a = 0.559$. Los resultados finales se muestran en el cuadro 4-5.

Estos resultados son graficados en la figura 4-9 y comparados con la curva experimental. En la misma figura ha sido ploteada la distribución de atenuación a 20 GHz obtenida del estudio realizado en Brasil (Manáus).

Obsérvese que para el 1% del tiempo, el nivel que alcanza la -atenuación excedida experimental, en el peor mes, (9 dB), es del mismo orden que el alcanzado por la atenuación teórica --- (8.79) dB).

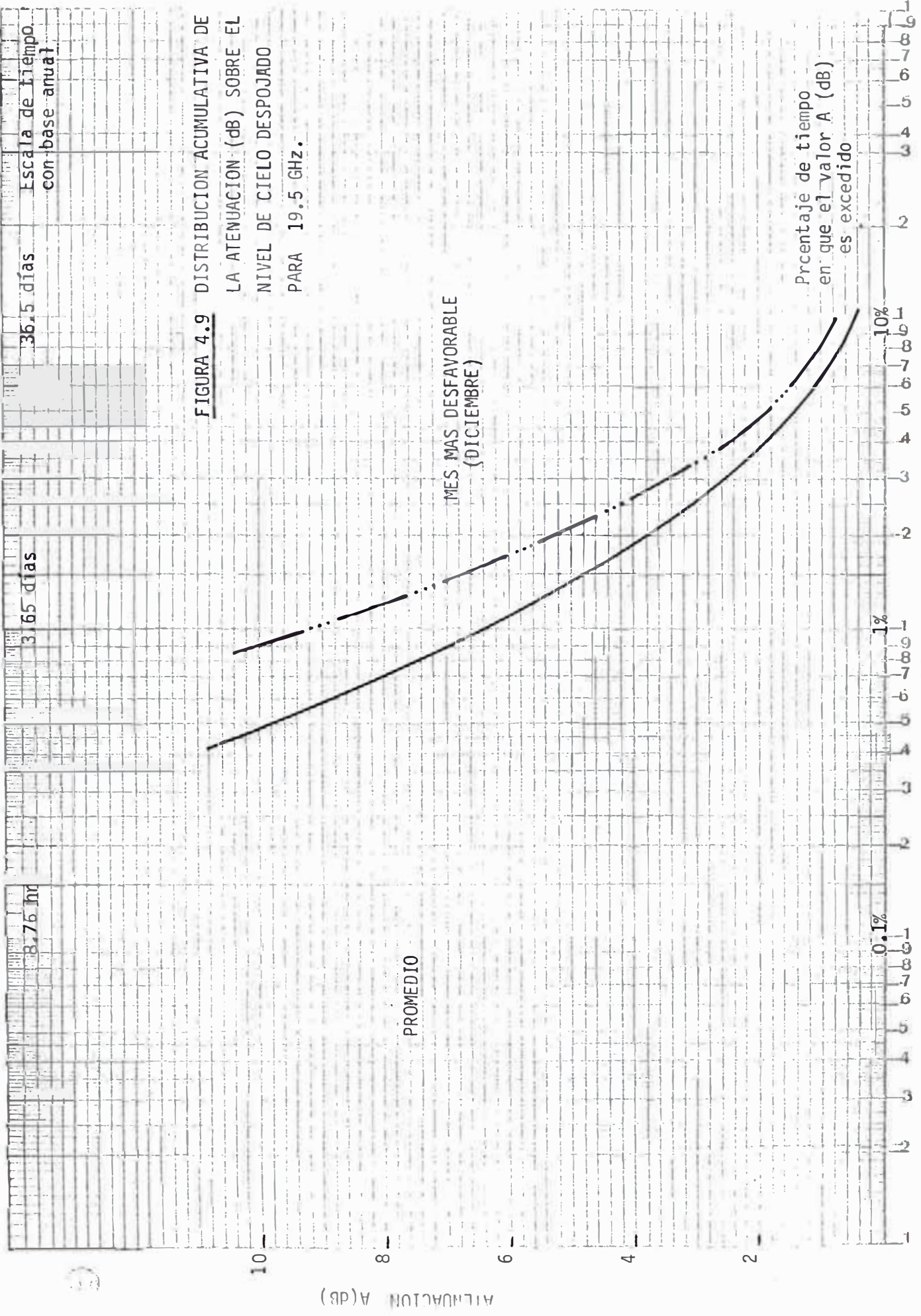
CUADRO 4-5 : Atenuación producida empleando modelo CCIR

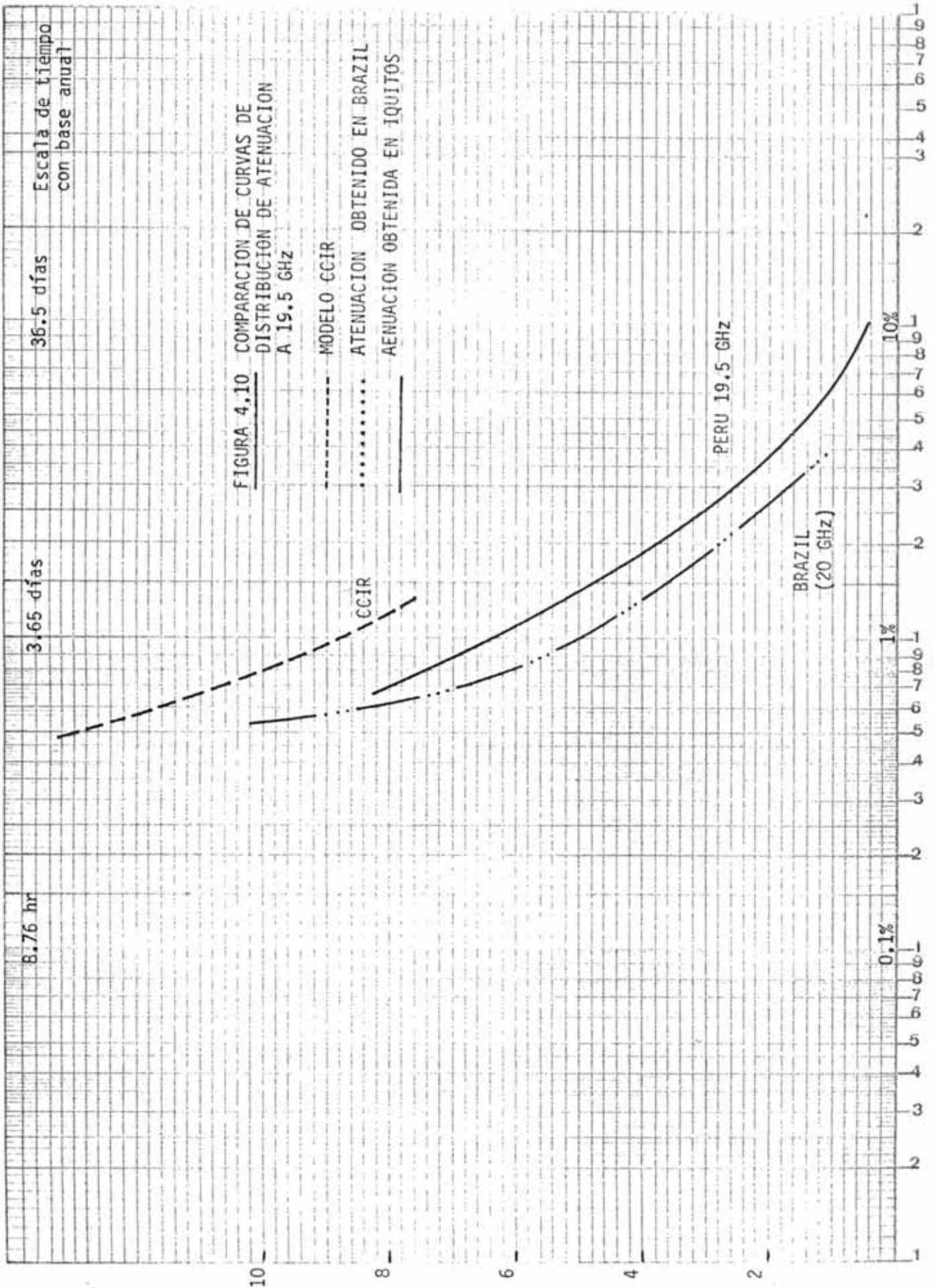
% TIEMPO	ATENUACION EXCEDIDA (dB)
0.1	31.85
0.4	14.67
0.5	12.95
0.6	11.70
0.7	10.73
0.8	9.96
0.9	9.32
1.0	8.79

4.2.3 Distribución de los niveles de atenuación para 28.5 GHz
Bajo las mismas condiciones anteriores , la distribución acumulativa de la atenuación producida por la lluvia a 28.5 GHz - sobre el nivel de cielo despejado, obtenida durante el periodo de observación, es mostrado en la figura 4-11. Los datos empleados son indicados en el cuadro 4-6. La temperatura de ruido en condiciones de cielo despejado oscila alrededor de 88.4°K que - equivale a un nivel de atenuación de 1.6 dB

El relativo mayor nivel de temperatura de ruido en condiciones de cielo despejado, que se observa en la frecuencia de 19.5 GHz es consecuencia de encontrarse más próxima a la raya de absor--ción del vapor de agua centrado en la frecuencia de 22.3 GHz.

CUADRO 4-6 : Total de minutos de atenuación (dB) a 28.5 GHz sobre el nivel del cielo despejado y de la temperatura de ruido espacial total que exceden los valroes indicados.





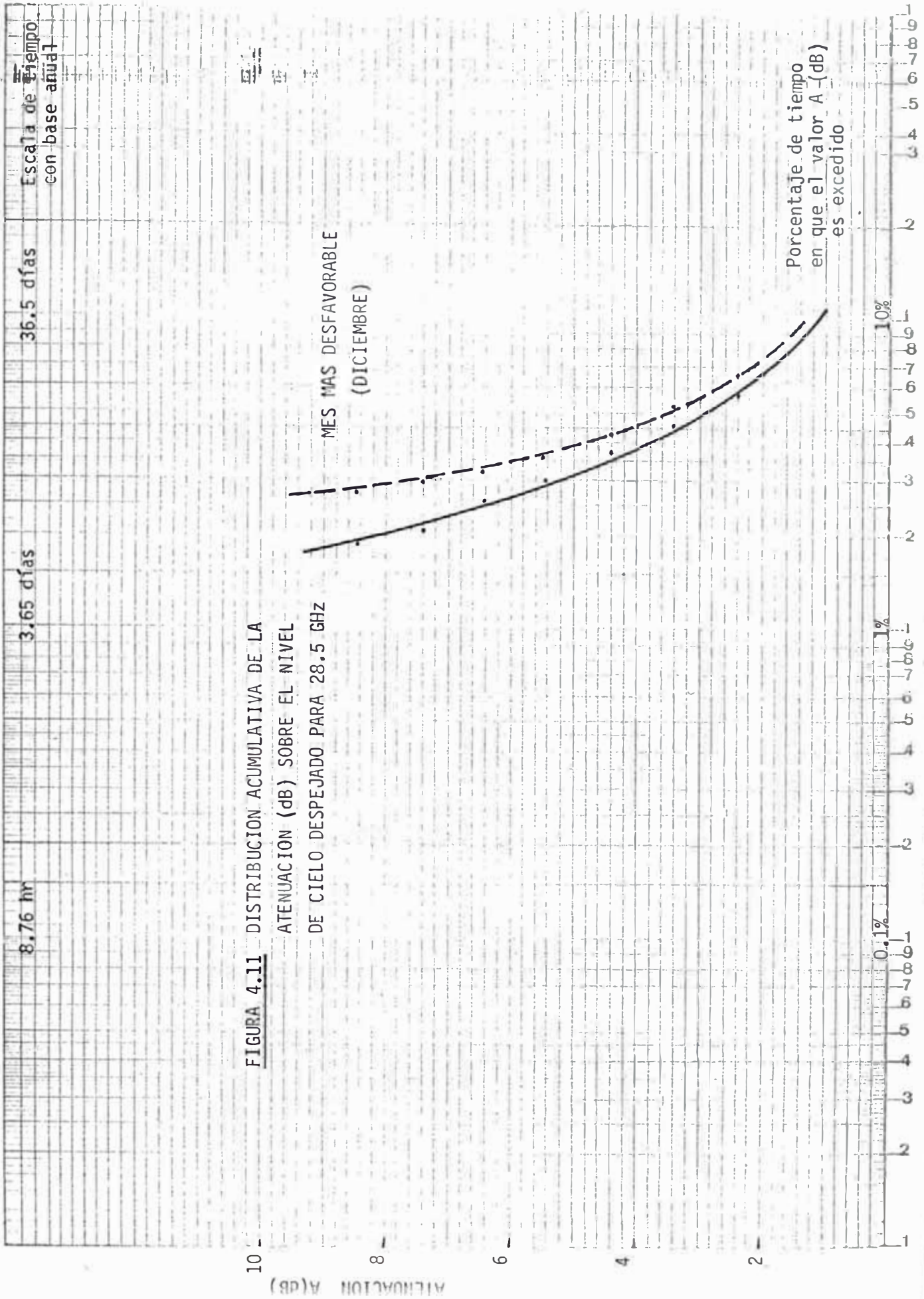


FIGURA 4.11 DISTRIBUCION ACUMULATIVA DE LA ATENUACION (dB) SOBRE EL NIVEL DE CIELO DESPEJADO PARA 28.5 GHz

MES MAS DESFAVORABLE (DICIEMBRE)

Porcentaje de tiempo en que el valor A (dB) es excedido

ATENUACION A (dB)

CUADRO 4-6

MES		NOV.	DIC.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MIN.	%
°K	dB	83.	83.	84.	84.	84.	84.	ACUM.	ACUM.
143.2	1.4	2149	3479	1964	3725	3337	2294	16948	8.78
172.7	2.4	1084	2354	1409	2635	2159	1646	11287	5.85
196.2	3.4	615	1836	1073	2194	1766	1321	8805	4.56
214.9	4.4	478	1542	845	1922	1415	1024	7226	3.75
229.7	5.4	393	1324	698	1562	1064	895	5926	3.08
241.5	6.4	341	1177	599	1292	892	775	5076	2.63
250.9	7.4	278	1092	525	1097	755	686	4433	2.30
258.3	8.4	227	1006	467	871	556	566	3693	1.91

Tiempo de Observación: 192,960 minutos

Empleando el modelo CCIR, con las mismas condiciones anteriores obtenemos los siguientes valores de atenuación para diferentes porcentajes de tiempo:

Para 0.01%, A = 141.39 dB con $\gamma_R^1 = 19$ dB/Km

0.1 %, A = 55.01 dB

1.0 %, A = 18.5611 dB con $\gamma_R^1 = 1.9$ dB/Km

4.3 CORRESPONDENCIA DE LA ATENUACION POR LLUVIA PARA DOS FRECUENCIAS DIFERENTES:

Desde el diseño de un sistema via satélite, implica el uso de dos frecuencias (4/6, 11/14, 20/30 GHz), se hace necesario conocer la correspondencia instantánea de las atenuaciones por lluvia entre el enlace ascendente (frecuencia mayor) y el enlace descendente (frecuencia menor) debido a que los valores de atenuación que presentan, son diferentes.

A partir de este punto de vista, son graficados en la figura -- 4-12, las correspondencias de atenuación entre dos frecuencias diferentes (30/20, 30/11 y 20/11) GHz) basados en los resultados de atenuación para cada frecuencia mostrados en las figuras 4-6, 4-9 y 4-11. Los valores empleados son mostrados en los cuadros 4-7 y 4-8.

(Viene el Cuadro 4-7..)

CUADRO 4-7: Correspondencia de las atenuaciones a 28.5 GHz con las obtenidas a las frecuencias 19.5 y 11.6 GHz.

% TIEMPO	Nivel de Aten. (dB) a las frecuencias indicadas		
	20.5	19.5	11.6
1.8	9	4.2	1.6
2.0	8	3.8	1.5
2.3	7	3.4	1.35
2.7	6	2.9	1.15
3.2	5	2.4	1.0
3.9	4	2.0	0.8
4.9	3	1.5	0.6
6.8	2	1.0	
11.0	1		

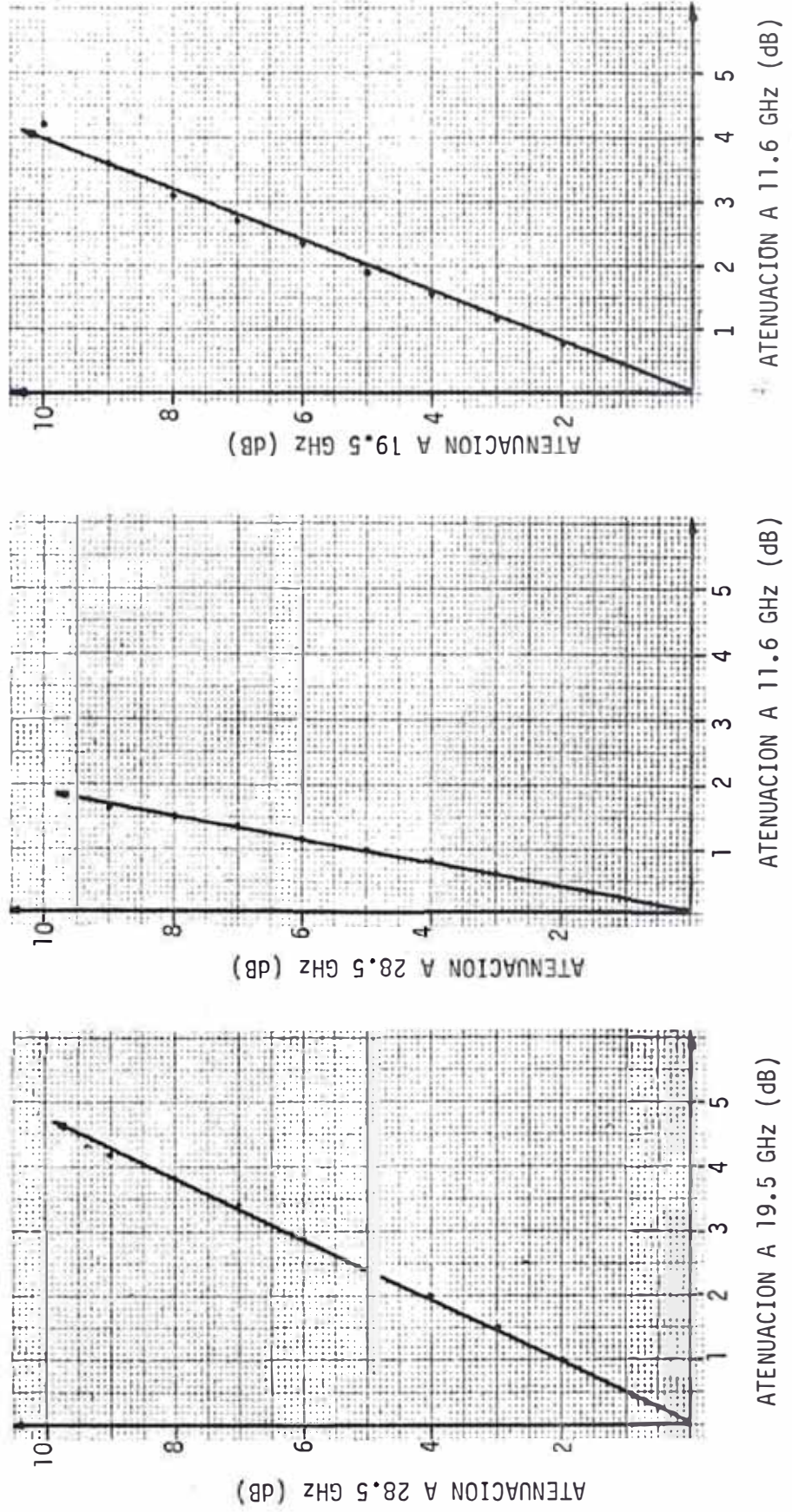
CUADRO 4-8 : Correspondencia de la atenuación a 19.5 GHz con la producida a la frecuencia de 11.6 GHz

% TIEMPO	Nivel de aten.(dB)a las frecuencias indicadas	
	19.5	11.6
0.47	10	4.2
0.57	9	3.6
0.70	8	3.1
0.88	7	2.7
1.10	6	2.35
1.40	5	1.90
1.90	4	1.55
2.60	3	1.20
3.85	2	0.80
6.60	1	

4.4 DISTRIBUCIONES DIURNAS Y ESTADISTICAS DE DURACION DE LOS DESVANECIMIENTOS:

Las distribuciones diurnas de la atenuación excedida, representan la duración de los desvanecimientos acumulados (min) de un

FIGURA 4.12 CORRESPONDENCIA DE ATENUACIONES A DOS FRECUENCIAS



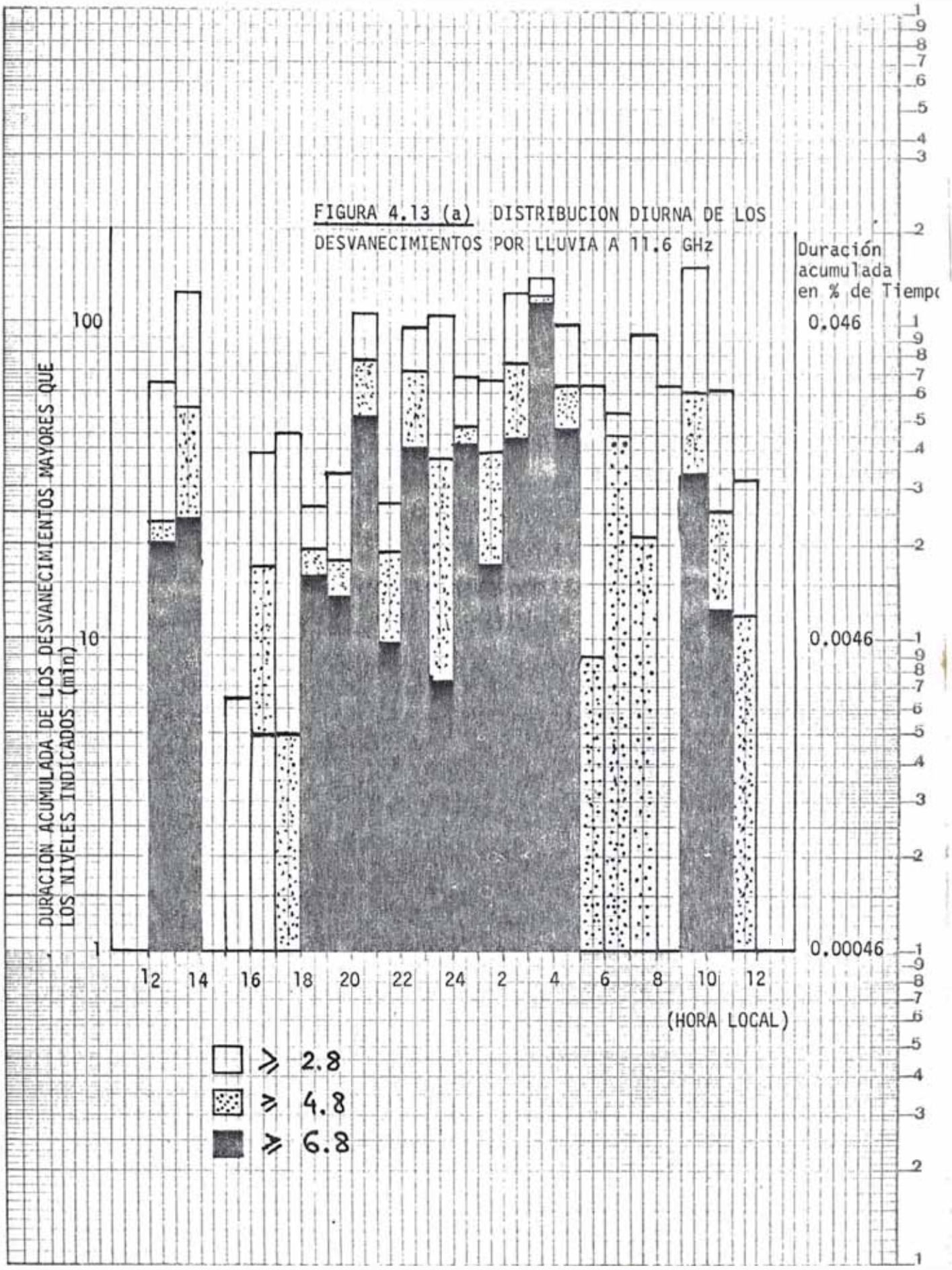
nivel de atenuación dado, que ha sido igualado ó excedido durante una hora particular del día. En las figuras 4-13 (a) hasta la 4-13 (c), se muestran las distribuciones diurnas de la atenuación excedida para las frecuencias 11.6, 19.5 y 28.5 GHz. De la figura 4-13 (a), es claro observar que los valores de atenuación mayores a 6.8 dB para 11.6 GHz están concentrados principalmente entre las 18:00 a 5:00 horas, de la hora local. Las menores atenuaciones se observan en horas de la mañana (6 a 9:00 hora local) y en la tarde, de 14:00 a las 16:00 horas. Las figuras 4-13(b) y 4-13(c) muestran cómo se incrementa la atenuación a toda hora, conforme la frecuencia es incrementada de 19.5 a 28.5 GHz.

Los hitogramas de duración de desvanecimientos producidos por la lluvia (simples y en exceso), dan la información necesaria para conocer cuántos desvanecimientos de un cierto nivel de atenuación han ocurrido durante el periodo de observación y cuánto largo ha sido la duración de cada uno de los mismos. Los gráficos 4-14(a) al 4-14(c) y los de 4-15(a) a 4-15(c), muestran respectivamente los histogmas correspondientes al número de desvanecimientos por duración y el número total de desvanecimientos que exceden un nivel de atenuación dado para cada frecuencia en estudio. Por ejemplo, de las figuras 4-14(a) y 4-15(a) para 11.6 GHz, puede observarse que de los 60 eventos ocurridos, más del 50% (35 eventos), han tenido una duración menor que 20 minutos. Por otro lado, a mayor frecuencia, hay más desvanecimientos a todo nivel, con duraciones mayores a las de 11.6 GHz.

4.5 PERIODOS DE DESVANECIMIENTOS PRODUCIDOS POR EL SOL :

Los desvanecimientos producidos por el sol que afectan a las estaciones terrenas, ocurren cerca de los periodos correspondientes al equinoccio de primavera y del equinoccio de otoño, cuando las posiciones orbitales del sol, tierra y satélite son tales que la antena de la estación terrena está mirando directamente al sol. Geométricamente significa que los ángulos de azimuth y elevación de la antena al satélite y de la antena al sol son iguales y coincidentes. Cuando ésto ocurre, la temperatura de ruido del sistema se incrementa a un gran valor, dejando a la

FIGURA 4.13 (a) DISTRIBUCION DIURNA DE LOS DESVANECIMIENTOS POR LLUVIA A 11.6 GHz



U B S C
 FECHA
 PROG. ACADEMICO

FIGURA 4.13 (b) DISTRIBUCION DIURNA DE LOS DESVANECIMIENTOS POR LLUVIA A 19.5 GHz

PROG. ACADÉMICO ----- FECHA -----

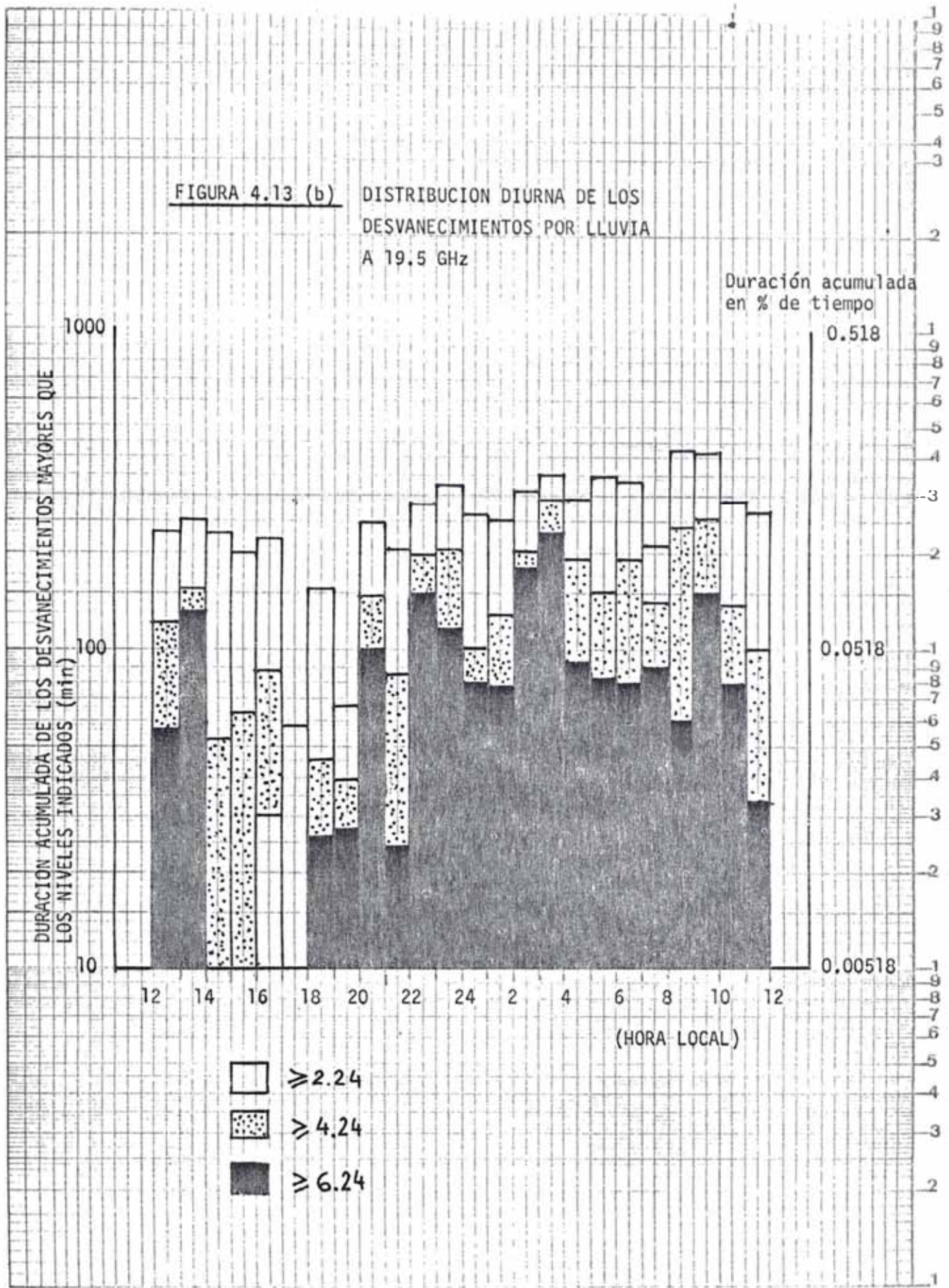


FIGURA 4.13(c) DISTRIBUCION DIURNA DE DESVANECIMIENTOS POR LLUVIA A 28.5 GHz

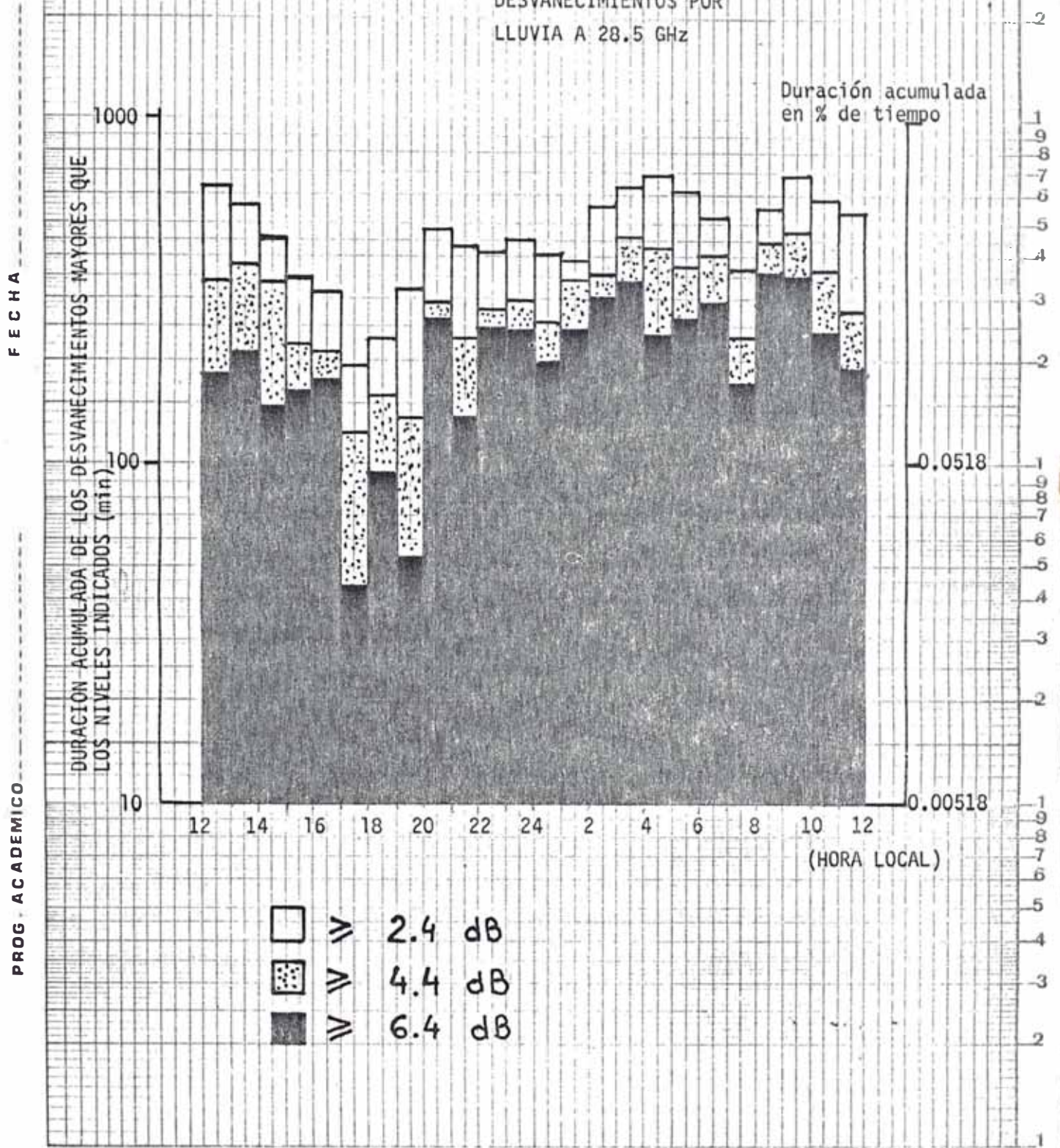
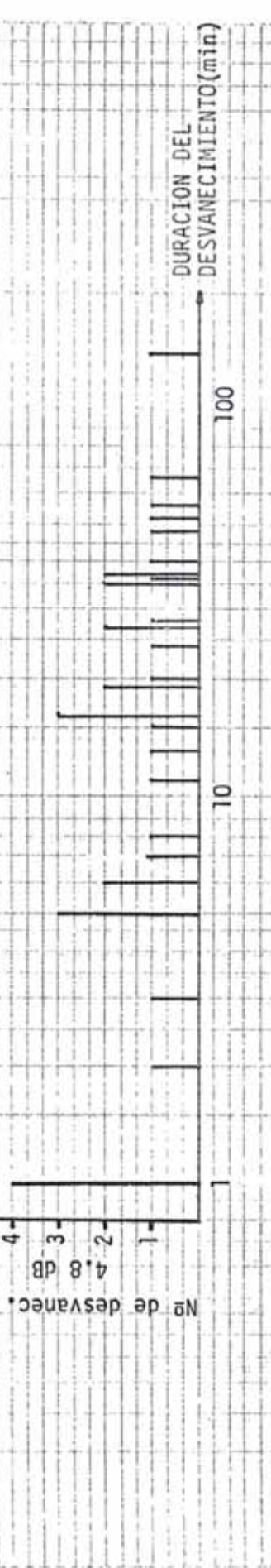


FIGURA 4.14 (a)
A 11.6 GHz

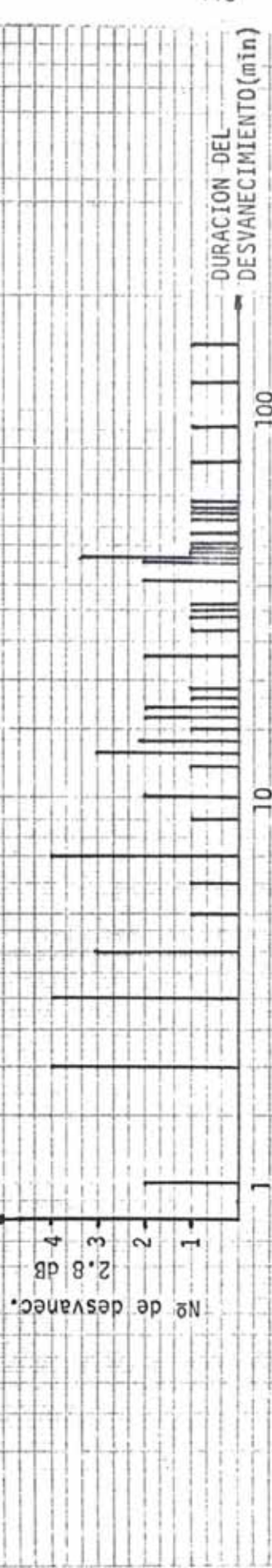
Nº de desvanec. 6.8 dB



Nº de desvanec. 4.8 dB



Nº de desvanec. 2.8 dB



PROG. ACADEMICO ----- FECHA -----

FIGURA 4.14 (b) NUMERO DE DESVANECIMIENTOS

A 19.5 GHZ

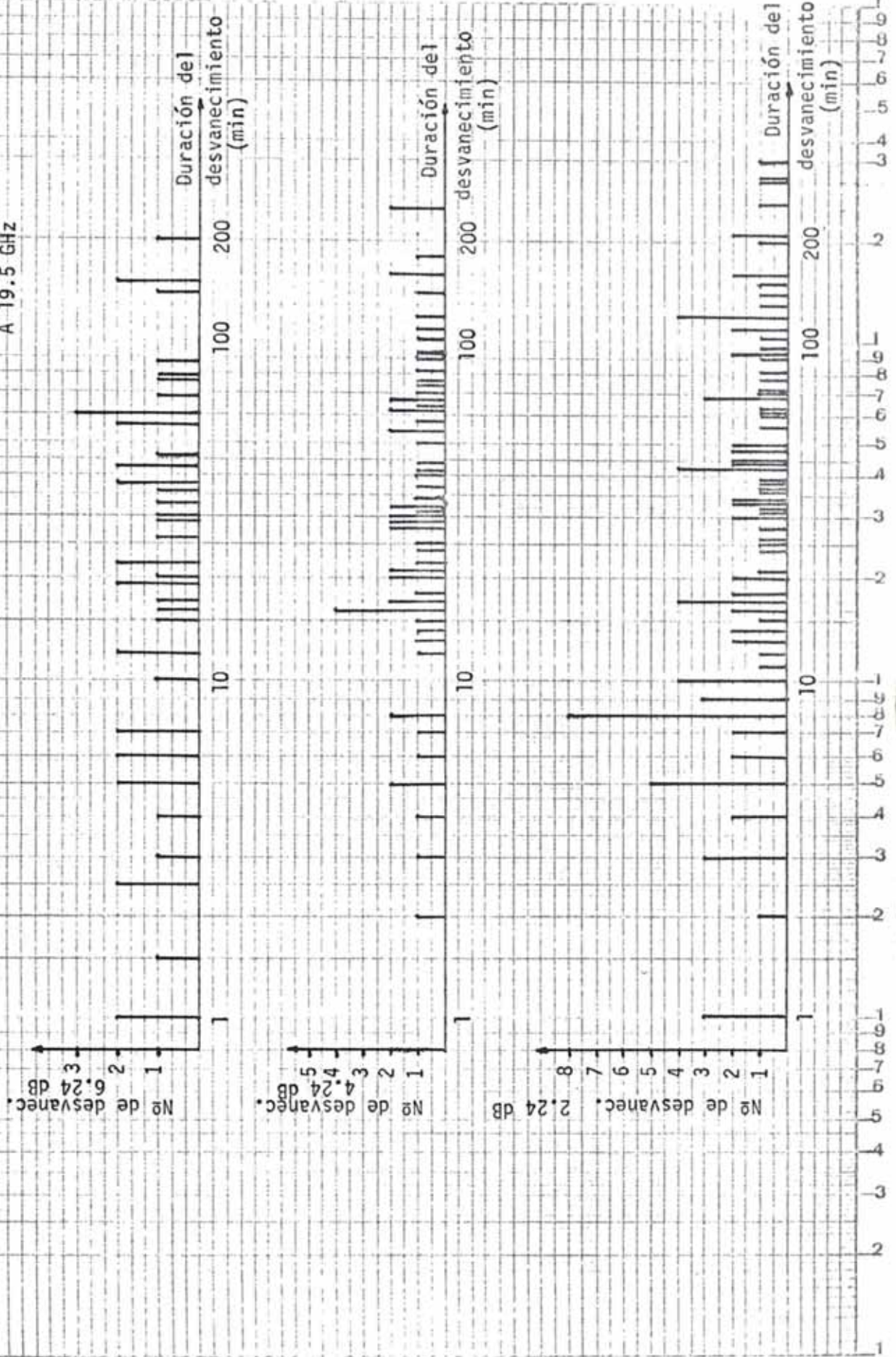


FIGURA 4.14 (c) NUMERO DE DESVANECIMI, TOS
EN
A 28.5 GHz

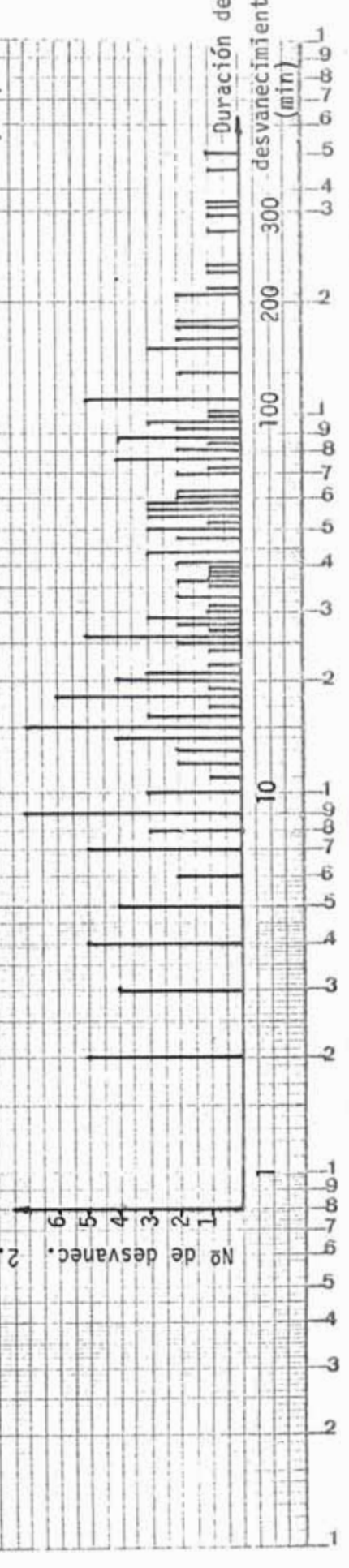
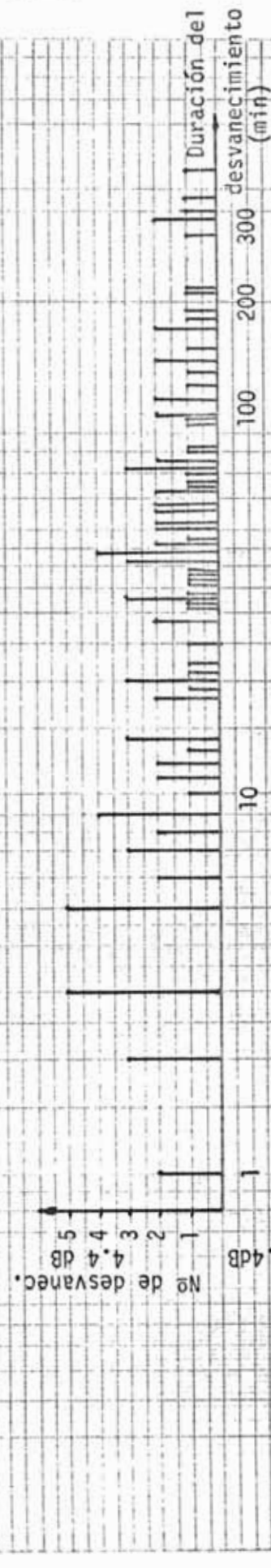
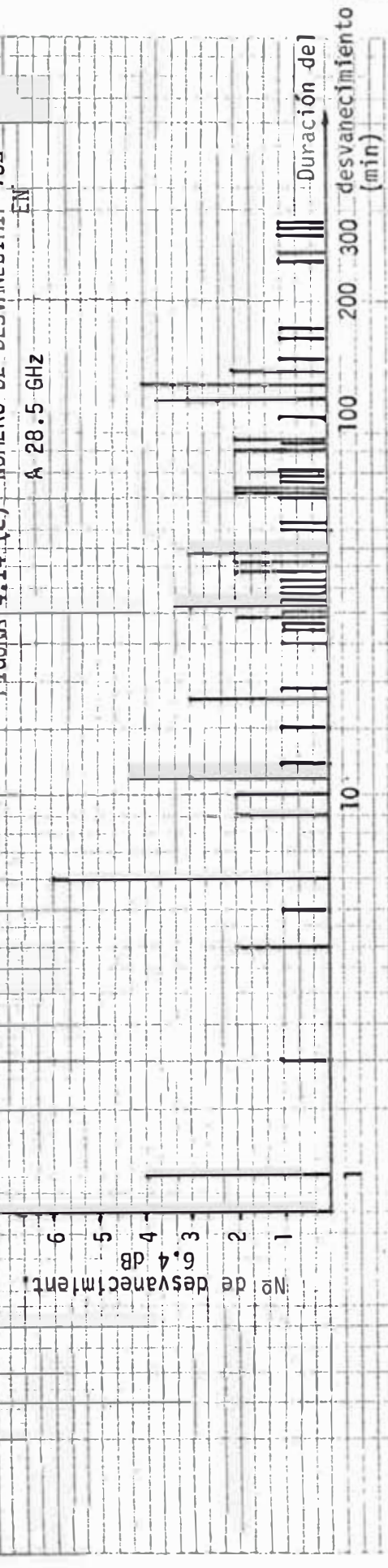


FIGURA 4.15 (a) NUMERO TOTAL DE DESVANECIMIENTOS A 11.6 GHz QUE EXCEDEN LOS VALORES INDICADOS

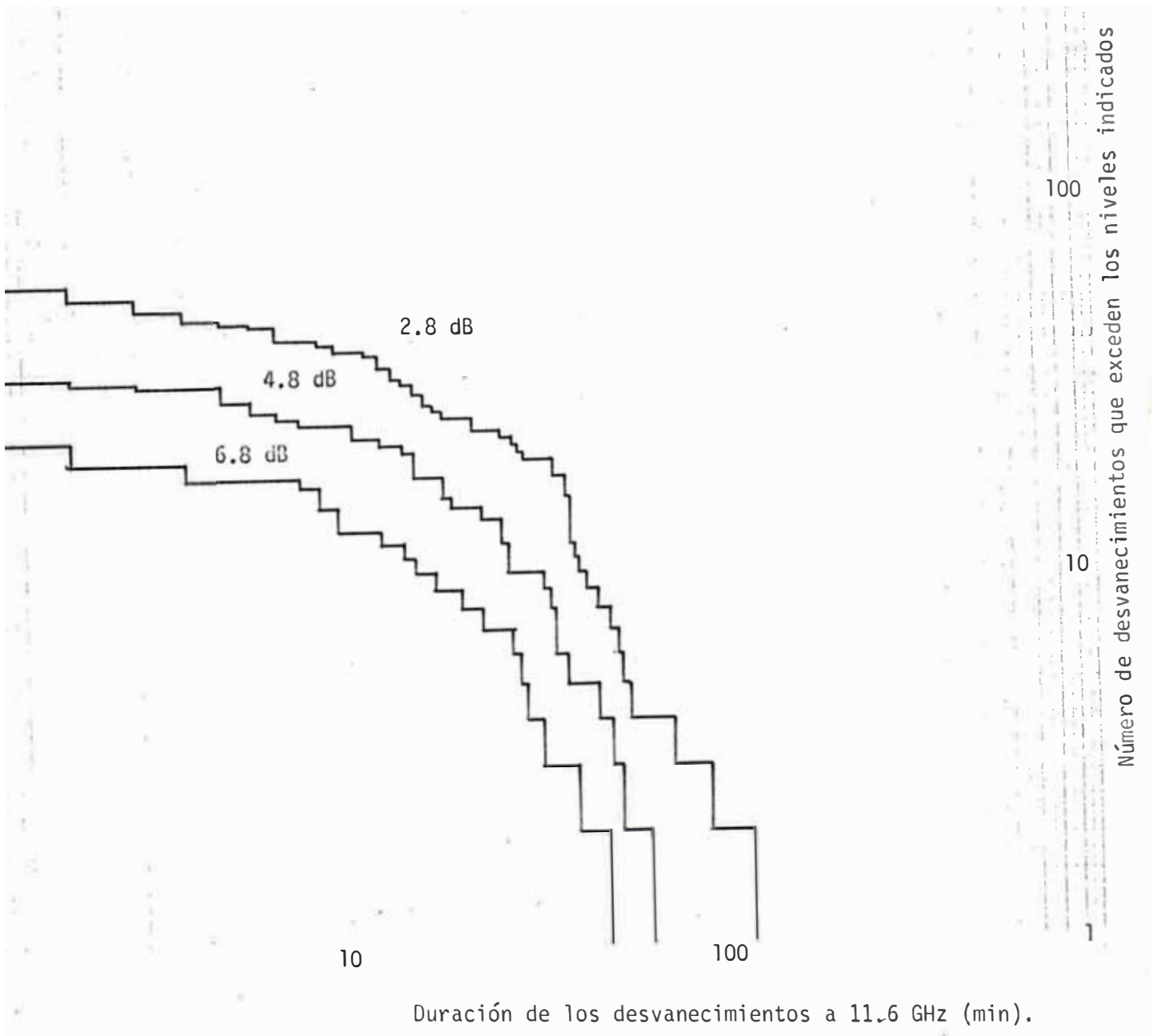


FIGURA 4-15 (b): NUMERO TOTAL DE DESVANECIMIENTOS A 19.5 GHz QUE EXCEDEN LOS VALORES INDICADOS.

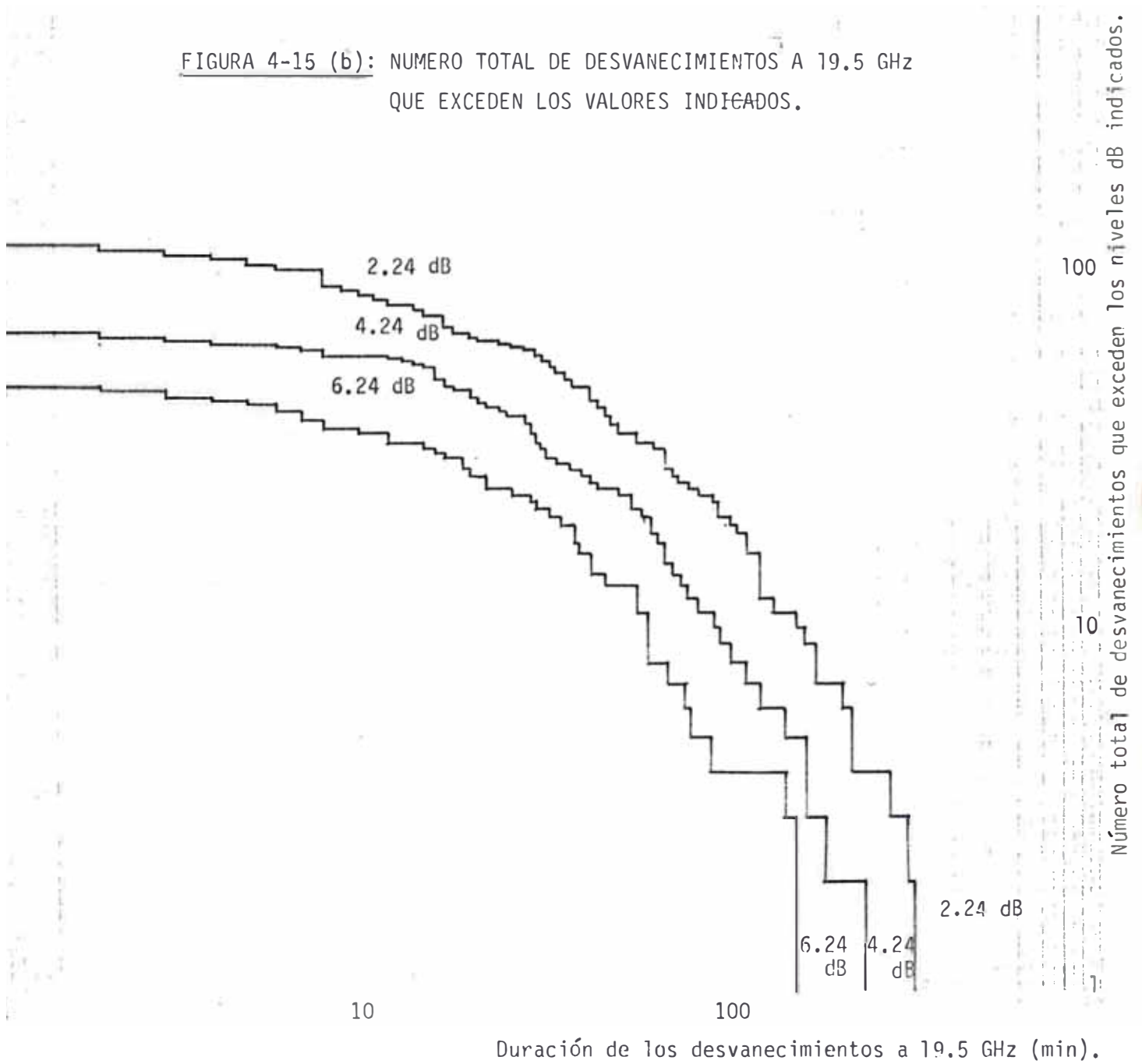
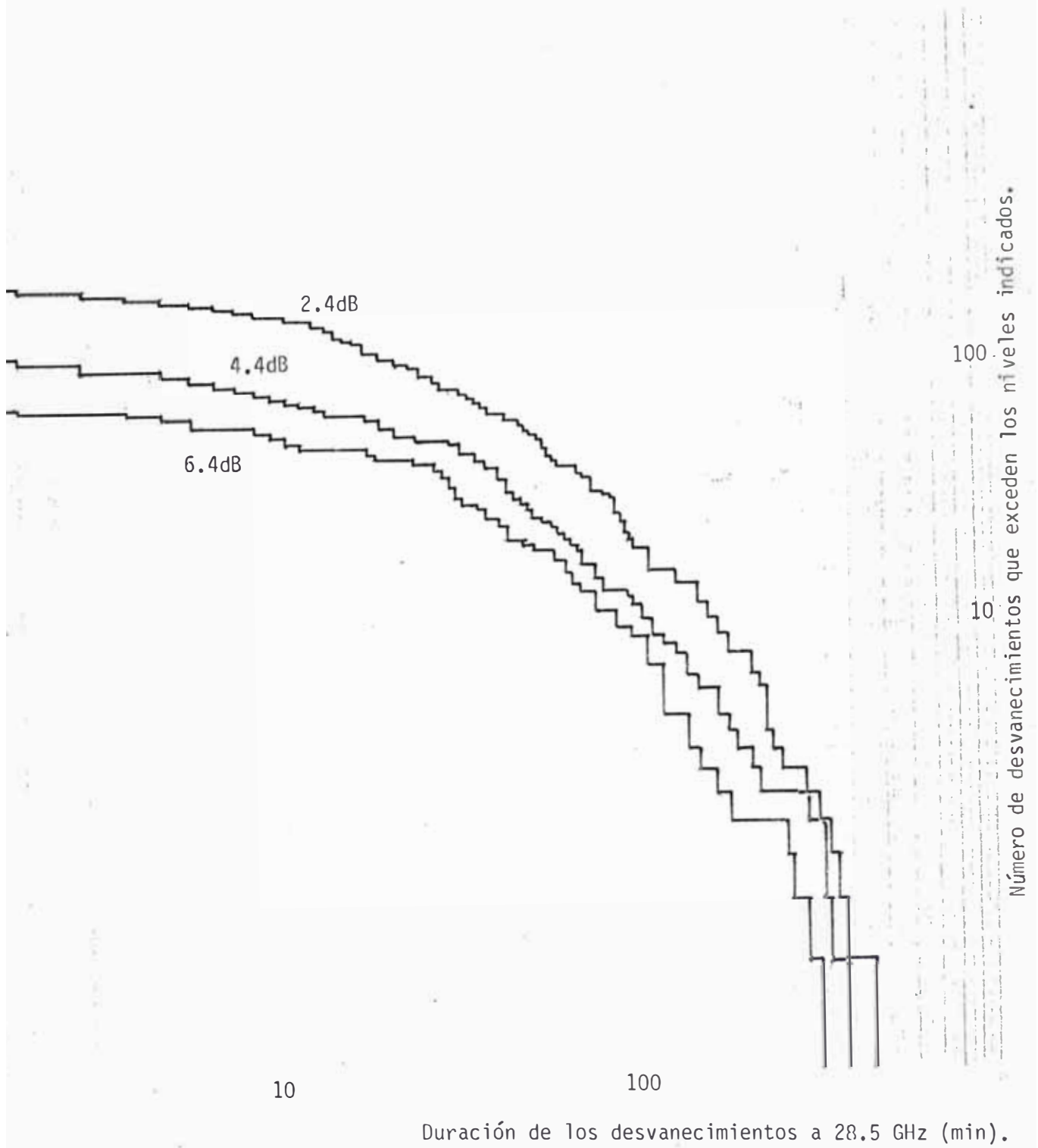


FIGURA 4-15 (C): NUMERO TOTAL DE DESVANECIMIENTOS A 28.5 GHz QUE EXCEDEN LOS VALORES INDICADOS. -



estación fuera de servicio por un corto tiempo.

Los equinoxios son aquellos puntos sobre la superficie terrestre donde la línea ecuatorial y la eclíptica se intersepan. La figura 4-16 muestra las posiciones relativas de estas líneas y los planos sobre la superficie terrestre, así como la órbita del sol. En los equinoxios de primavera y otoño, el sol apunta directamente sobre el Ecuador en su aparente movimiento Norte-Sur. Por consiguiente, cualquier antena sobre la superficie terrestre mirando a un punto sobre el Ecuador, estará apuntando al sol ó muy cerca de él, por algunos minutos durante el día - de estos periodos del año.

Las fechas exactas del año cuando las coincidencias angulares entre el sol y la antena ocurren, pueden ser derivados rápidamente con ayuda de las efemeridades del sol, que son tabulaciones de las posiciones del sol, relativos a ciertos puntos de referencia como una función de la fecha. Los datos básicos necesarios para tal fin, son la longitud y latitud de la ubicación de las estaciones terrenas, así como los ángulos de elevación y azimuth. Una fuente de las efemeridades del sol es el Nautical Almanac, publicado cada año por la Superintendent of Documents,, Government Printing Office, Washington, D.C. En nuestro estudio, el outage solar para el radiómetro de 11.6 GHz se observó el día 7 de abril, alrededor de las 12:45.

Para los radiómetros de 20/30, el desvanecimiento producido por el sol fue observado el día 17 de abril a la misma hora. La diferencia es debido a los distintos valores de azimuth empleados.

La duración de los desvanecimientos producidos por el sol en el día principal, pueden estimarse, considerando que el sol se mueve a 15°/hora, visto desde coordenadas geocentricas. El outage solar empieza cuando un costado del sol es tangente a la proyección del círculo del ancho de banda de media potencia y termina cuando el otro costado sale de dicho círculo. Esto es:

$$\text{Max. Duración del Desvanecimiento} = \frac{\left(2 \cdot \frac{\text{semidiámetro del sol}}{\text{del sol}} + \frac{\text{Ancho del haz de la antena a 3 dB}}{\text{la antena a 3 dB}} \right)}{15^\circ / \text{hora}} \times 60 \text{ min/h}$$

El semidiámetro del sol es aproximadamente igual a 0.267°

Para las frecuencias en Estudio, y utilizando las antenas de 1.8 m., los resultados de los tiempos de desvanecimientos son mostrados en el cuadro 4-9.

CUADRO 4-9 : Periodos de desvanecimientos producidos por el sol en el dia principal

FREC. (GHz)	ANCHO DE HAZ A 3dB	PERIODO DE DESVANECIMIENTO
11.6	1°	6 min 8 seg.
19.5	0.6°	4 min. 32 seg.
28.5	0.4°	3 min. 44 seg.

Los mismos que son comparables con los obtenidos experimentalmente y mostrados en la figura 4-17.

El máximo periodo ocurre cuando el sol se mueve directamente a través del centro del patrón de la antena. Unos días antes y - después a este máximo periodo, también se observa el efecto de los desvanecimientos producidos por el sol, tal como se observa en la figura 4-17.

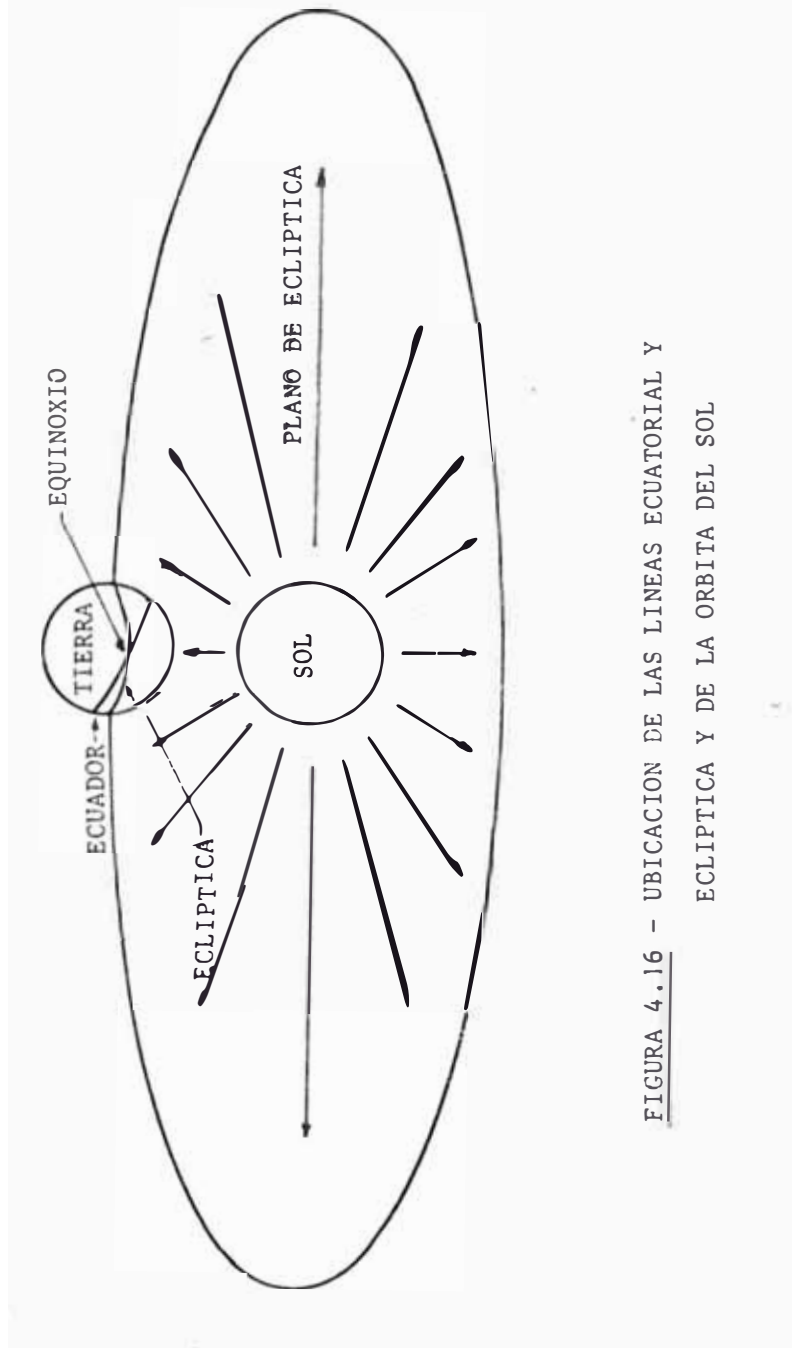


FIGURA 4.16 - UBICACION DE LAS LINEAS ECUATORIAL Y ECLIPTICA Y DE LA ORBITA DEL SOL

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio presenta principalmente las distribuciones acumulativas de la atenuación por absorción producida por la lluvia, para un trayecto tierra-espacio, a las frecuencias de 11.6, 19.5 y 28.5 GHz. Los datos obtenidos han sido recopilados durante cinco meses en la ciudad de Iquitos, empleando radiómetros pasivos.

Estos resultados permiten estimar el margen de desvanecimiento adecuado que se debe considerar en el diseño de un sistema de comunicaciones por satélite, a fin de reducir el tiempo fuera de servicio producido por la atenuación debida a la lluvia.

En adición al margen debido a la lluvia, se deberá incluir un margen por atenuación en condiciones de espacio libre que es producido principalmente por las moléculas de oxígeno y vapor de agua en el aire. Este margen se hace mayor en señales cercanas a las frecuencias resonantes de los gases atmosféricos, como se comprueba de la atenuación obtenida a 19.5 GHz, cercana al pico resonante de 22.3 GHz del vapor de agua.

En la figura 5-1, se muestra las distribuciones de atenuación para las tres frecuencias en estudio. Obsérvese que conforme aumenta la frecuencia, aumenta también el nivel de atenuación para un mismo evento.

La correlación promedio entre las atenuaciones obtenidas a las diferentes frecuencias, tiene una tendencia lineal (ver fig. 5-2), - que puede aproximarse a la siguiente relación empírica:

$$A_2 = \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 A_1$$

FECHA

PROG. ACADEMICO

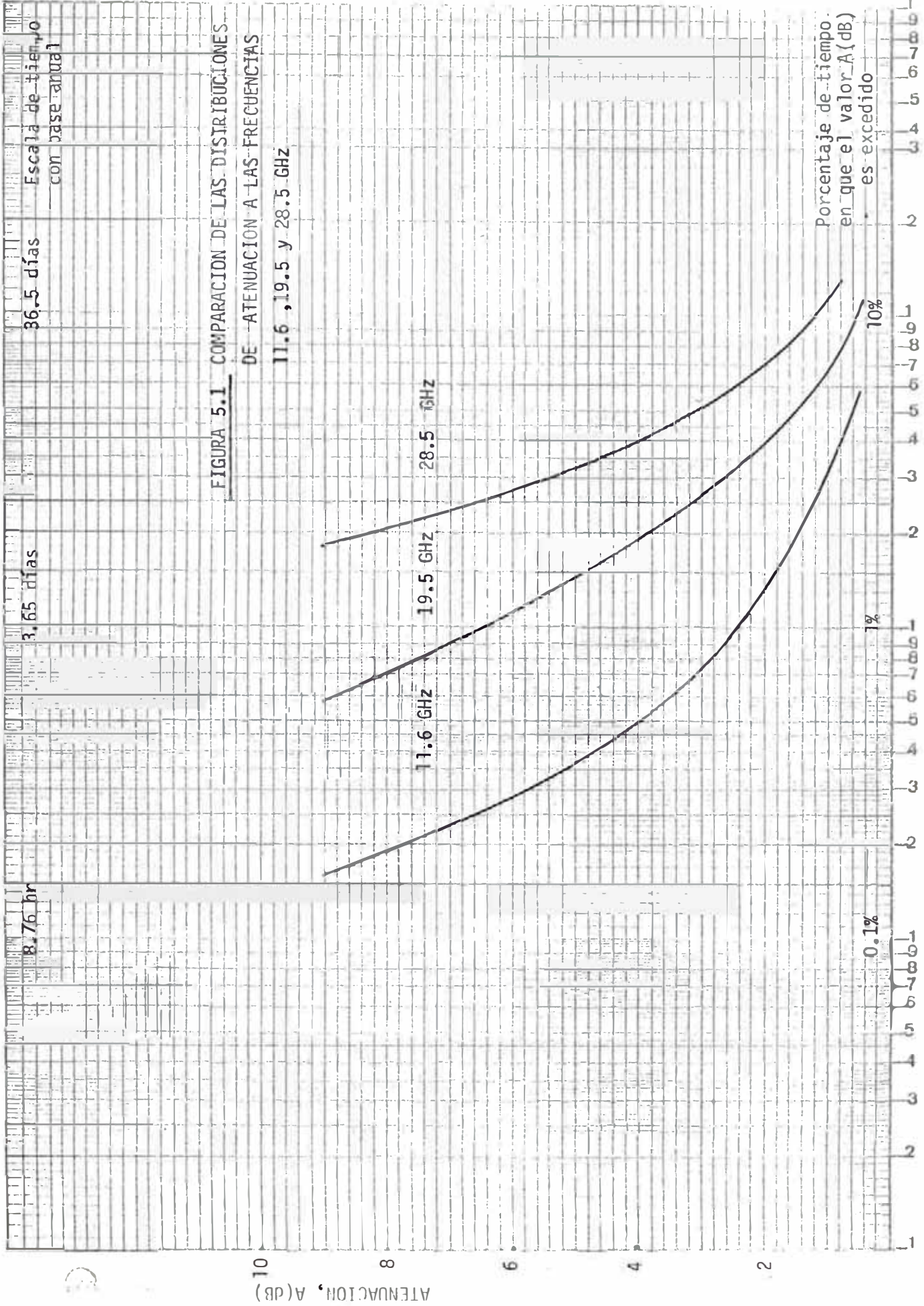
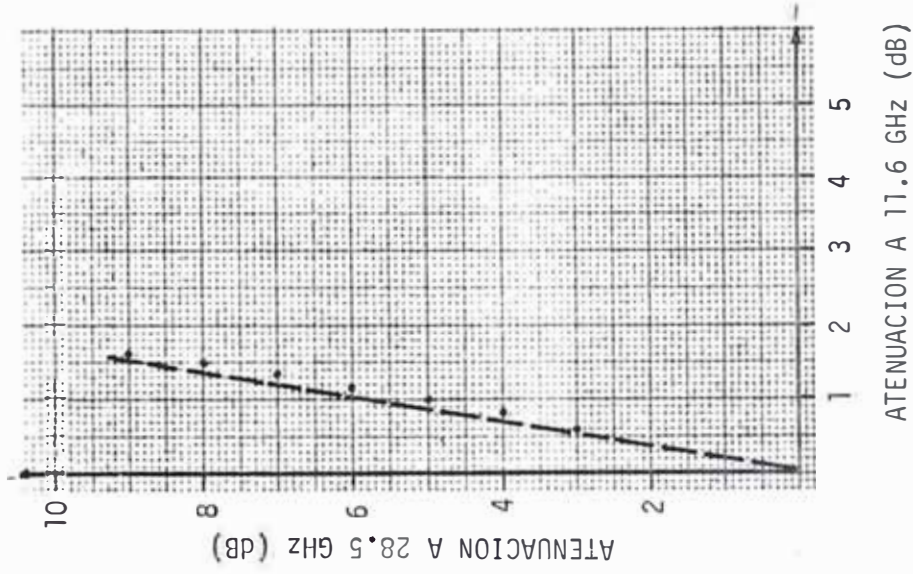
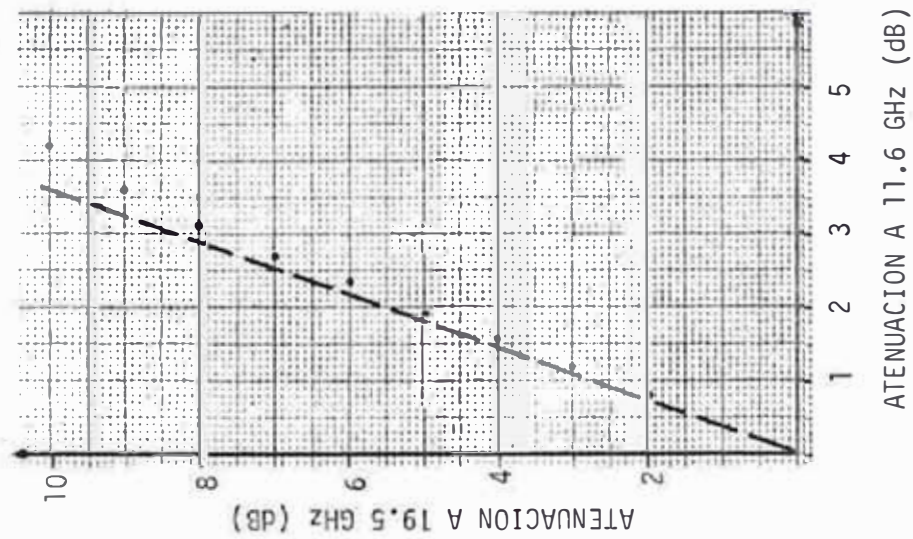
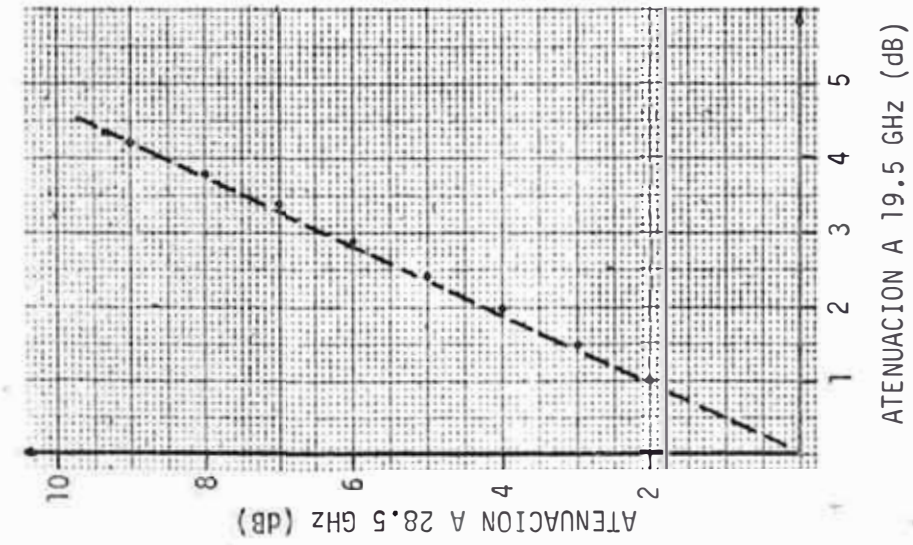


FIGURA 5.2 CORRESPONDENCIA TEORICA DE ATENUACIONES A DOS

FRECUENCIAS

----- CURVA TEORICA

x x x PUNTOS EXPERIMENTALES



Esto último, no implica una relación permanente entre las atenuaciones a dos frecuencias, ya que experimentalmente se observa en todo momento fluctuaciones fraccionales alrededor del valor medio obtenido.

De la relación anterior, es fácil entonces deducir, que el nivel de la atenuación esperada es proporcional al cuadrado de la frecuencia (f^2).

En lo que respecta a los histogramas, se puede observar que el número total de desvanecimientos, así como el nivel de los mismos, se incrementa significativamente con el incremento de la frecuencia - (alrededor del 50%) tienen una duración menos a los 20 minutos, -- aunque son posibles desvanecimientos de largos periodos de duración. Es muy probable que este tipo de desvanecimientos muy prolongados - no se repita de un año a otro. Esta es una de las razones por lo que se recomienda realizar mediciones mayores a un año.

Las comparaciones efectuadas con el estudio realizado en Brasil -- (Manáus), muestran que las atenuaciones observadas para las frecuencias de 11.6 y 19.5 GHz, siguen una distribución similar a las obtenidas en Brasil para las mismas bandas de frecuencia. Así también - comparando con el modelo desarrollado por el CCIR para una distribución teórica, empleando la distribución pluvial experimental, se obtienen valores muy próximos a los obtenidos en 11.6 GHz. Para el caso de las bandas de 20 y 30 GHz, la distribución pronosticada es -- mas cercana a las correspondientes al mes más desfavorable.

En cuanto a los desvanecimientos producidos por el sol, se comprueba que los tiempos máximos de outage solar obtenidos, son muy cercanos a los pronosticados por la relación teórica indicada.

El otro objetivo principal ha sido obtener la distribución acumulada de la precipitación pluvial para el mismo tiempo de observación mediante el empleo de un pluviómetro. La distribución encontrada, sigue mejor un modelo de distribución Gamma, que el modelo log-normal empleado en otros lugares, con niveles de precipitación baja.

A 0.01% del tiempo, nuestro nivel obtenido coincide con el pronosticado por el CCIR, pero no para otros porcentajes. Los 107 mm/h conseguido para el 0.01% del tiempo, sitúan a Iquitos como una de las regiones de mayor precipitación pluvial en el mundo.

La figura 5-3, muestra un trazo radiométrico típico, relacionado con los pulsos pluviométricos. Es interesante observar que las precipitaciones pluviales están retrasadas con respecto a la temperatura de ruido. Esto significa que la lluvia ingresa al haz de la antena antes de llegar el pluviómetro. Sin embargo, si el nivel de la precipitación es baja, es posible que el incremento de la temperatura de ruido coincida con el registro del evento.

En algunas oportunidades, la lluvia cruza el haz de la antena cayendo a una determinada distancia de la estación terrena. Es de esperar que esto se haga más crítico conforme el ángulo de elevación decrece.

De la distribución diurna de las precipitaciones, se puede resaltar que los eventos más severos son esperados especialmente en horas de la tarde y primeras horas de la madrugada.

Los resultados obtenidos pueden ser los esperados en regiones de iguales características, no sólo a nivel nacional, sino también internacional. Como es sabido, Iquitos goza de un clima Ecuatorial. Estos climas corresponden a zonas comprendidas entre las latitudes 10°N y 10°S y se caracterizan por presentar temperaturas elevadas que varían ligeramente y por intensas y constantes lluvias que mantienen una humedad permanente.

Dada su naturaleza, los resultados presentados, tienden a ser modelos promedios (es decir estadísticos). Por lo cual es recomendable continuar realizando las mismas mediciones por un tiempo más prolongado, a fin de obtener resultados promedios más exactos. El CCIR recomienda efectuar registros durante por lo menos 12 meses.

Por otro lado, como consecuencia de los altos niveles de atenuación que se deben esperar para zonas de climas tropicales y con el fin de asegurar la confiabilidad de un sistema de comunicaciones por satélite que operen a las frecuencias en estudio, es casi seguro que en diseño de los mismos se tendrá que considerar necesariamente el empleo de arreglos de diversidad de espacio. Por lo tanto, se recomienda efectuar mediciones de la mejora que se obtiene empleando dicha técnica.

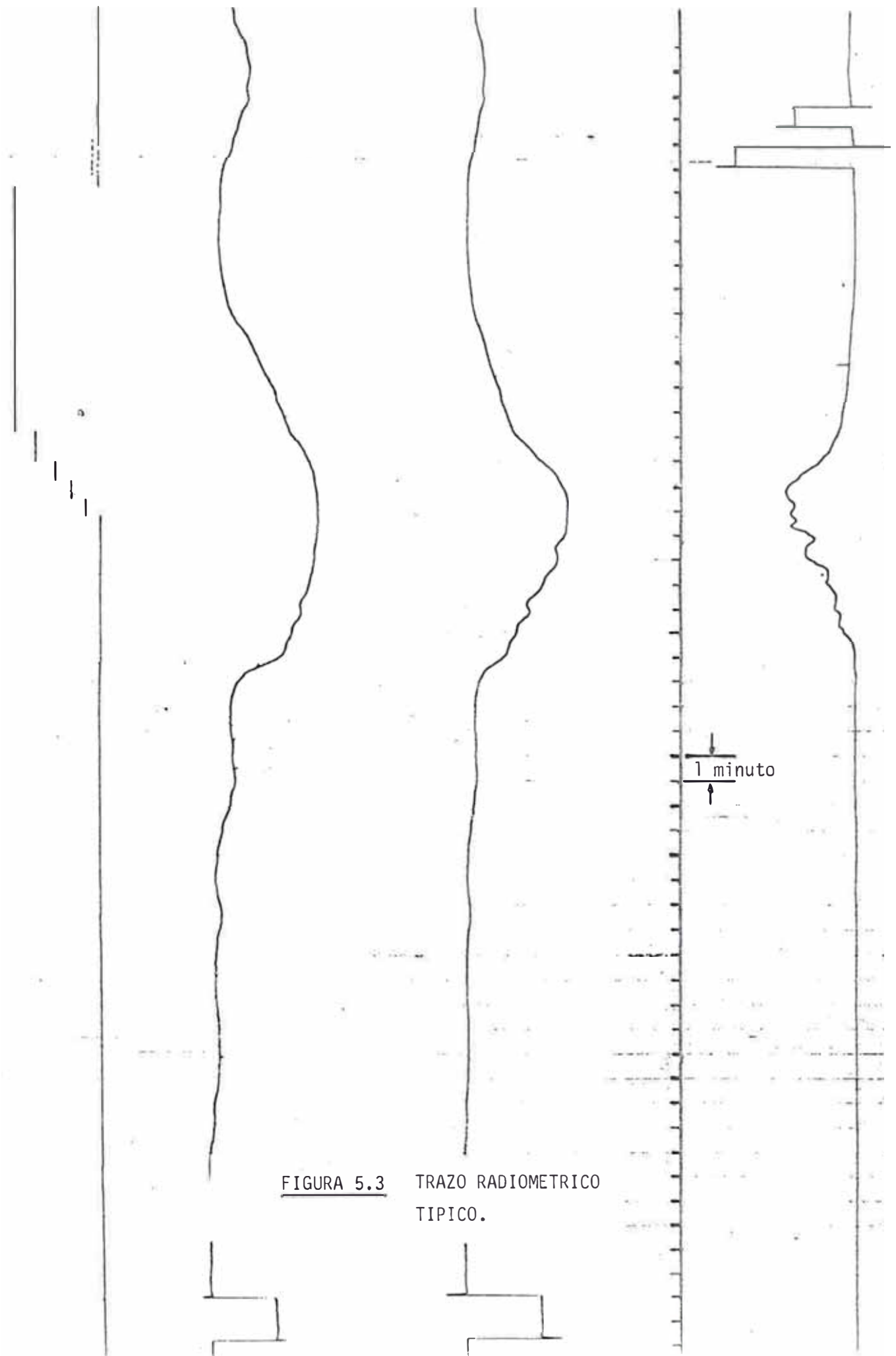


FIGURA 5.3 TRAZO RADIOMETRICO TIPICO.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Y. Hosoya, K. Satoh y T. Nagatsu, "Propagation Characteristics on Slant Path in 20 and 30 GHz Bands", Review of the Electrical Communication Laboratories, NTT, Jap, Vol. 28, No. 7-8, Pag. 588-603 Julio-Ag. 1980.
- 2) H.J. Meyerhoff, A. Buige y E. Robertson, "15.3 GHz Precipitation Attenuation Measurements using a Transportable Earth Station at Utibe, Panamá", COMSAT Technical Review (CTR), Vol. 4, Nº 1, pag. 169-186, spring 1974.
- 3) P. Kumar, "Precipitation Fade Statistics for 19/29 GHz COMSTAR Beacon Signals and 12 GHz Radiometric Measurements", CTR, Vol. 12, Nº 1, pag. 1-25, spring 1982.
- 4) H.J. Meyerhoff, "11.7 y 20 GHz Radiometric Measurements at Brazilian Equatorial Site", CTR, Vol. 5, Nº 2, pag. 309-411, fall 1975.
- 5) V. Rogers y G. Hyde, "Statistics of 11.6 GHz Atmospheric Attenuation and Rainrate Observed in Diverse Climates", COMSAT Technical Memorandum CL-22-78, My 31, 1978.
- 6) D. Hogg y T. Chu, "The Role of Rain in Satellite Communications", Proc. IEE, Vol. 63, Pag. 1008-1331, Sept. 1975.
- 7) H. Arnold, D. Cox, H. Hoffman y R. Leck, "Rain Attenuation Statistics from a 19 and 28 GHz COMSTAR Beacon Propagation Experiment: One Year Cumulative Distributions and Relationships Between the Two Frequencies", Trans. and Comm, Vol. COM-27, Nº 11, pag. 1725-1728, Nov. 1979.
- 8) J. Barewald, "Calculating Earth Station Sun Outage Times", Satellite Communications, pag. 57-62, Ag. 1981.
- 9) CCIR, Recomendaciones e Informe, Vol. 5, 1982. Inf. 563-2, "Datos Radiometereológicos" pag. 109-119, Inf. 719-1, "Atenuación Producida por los Gases Atmosféricos", pag. 138-141, Inf. 721-1, "Atenuación Producida por Hidrometeoros en Particular en Forma de Lluvia y por Otras Partículas Atmosféricas", pag. 167-169, Inf.

564-2, "Datos de Propagación Requeridos para los Sistemas de Telecomunicaciones Espaciales", pag. 333-337.

- 10) H. Yokoi, "Satellite Communications Technology", Cap. 4, pag. 95-137, editado por K. Miya, 1981.
- 11) R. Crane, "Prediction of the Effects of Rain on Satellite Communication Systems", Proc. IEEE, Vol. 65, Nº 3, pag. 456-473, Marzo 1977.
- 12) G. Jenkinson, "Tropical Rain Attenuation at 11 GHz on Earth Space Paths - Radiometric Measurements in Australia", Proc. IEEE, Vol. 65, Nº 3, pag. 480-481, Marzo 1977.
- 13) J.H. Van Vleck, "The Absorption of Microwaves by Uncondensed Water Vapor", Physical Review, Vol. 71, Nº 7, pag. 425-433, Ab 1947.
- 14) J. H. Van Vleck, "The Absorption of Microwaves by Oxigen", Physical Review, Vol. 71, Nº 7, pag. 413-424, Ab 1947.
- 15) D. Fang, J. Harris, "Propagation Phenomeno at 11/14 GHz" COMSAT Technical Memorandum CL-39-75, Set. 1975.