

## RECOMENDACIÓN UIT-R SF.1008-1\*

**POSIBLE UTILIZACIÓN POR LAS ESTACIONES ESPACIALES DEL SERVICIO FIJO  
POR SATÉLITE DE ÓRBITAS LIGERAMENTE INCLINADAS CON RESPECTO  
A LA ÓRBITA DE LOS SATÉLITES GEOESTACIONARIOS EN BANDAS  
COMPARTIDAS CON EL SERVICIO FIJO**

(1994-1995)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

*considerando*

- a) que una vez finalizado el mantenimiento en posición en sentido Norte-Sur, las estaciones espaciales geoestacionarias presentan una deriva «natural» hasta una inclinación máxima de aproximadamente  $\pm 15^\circ$  con respecto al plano ecuatorial y a una velocidad inicial máxima de unos  $0,9^\circ$  por año;
- b) que la utilización de órbitas ligeramente inclinadas con respecto a la órbita de los satélites geoestacionarios (OSG) puede ser adecuada en la explotación del servicio fijo por satélite (SFS) a fin de prolongar la vida útil de las estaciones espaciales;
- c) que la utilización de la órbita inclinada puede diseñarse en las etapas de planificación de los sistemas por satélite;
- d) que un satélite puede ponerse en una órbita previamente inclinada de tal forma que en primer lugar la órbita reduzca su inclinación hasta  $0^\circ$  y a continuación la aumente;
- e) que las propias operaciones en el SFS imponen restricciones que en muchos casos limitan el valor de la inclinación de las órbitas que pueden utilizar las redes del SFS a valores considerablemente inferiores que el límite natural descrito en el § a);
- f) que el número de estaciones espaciales del SFS que utilizarán órbitas ligeramente inclinadas será reducido en la práctica;
- g) que los sistemas del SFS en órbita inclinada que funcionan con los límites de densidad de flujo de potencia indicados en la Recomendación UIT-R SF.358 pueden causar interferencias a los sistemas terrenales exponiendo a un número más elevado de estaciones terrenales a la interferencia directa, pero que no todas estas estaciones del servicio fijo afectadas estarán asociadas a una sola red terrenal;
- h) que, para mantener la cobertura de la zona de servicio, el haz de puntería de la estación espacial permanecerá probablemente dentro de unos límites de tolerancia razonables con respecto a la dirección del haz original, pero que en esas circunstancias los ángulos de llegada a las estaciones terrenales y los ángulos a partir del eje de la antena del satélite variarán con respecto al caso geoestacionario;
- j) que, si bien el comportamiento de extremo a extremo de los sistemas terrenales puede no verse afectado en todos los casos por el grado de inclinación, la probabilidad de que los saltos individuales resulten afectados aumentará con la magnitud de la inclinación;
- k) que las actuales redes del servicio fijo en muchas bandas compartidas actualmente con el SFS han alcanzado un grado de madurez y en muchos países funcionan evitando las direcciones acimutales donde puede producirse interferencias basándose en que las estaciones espaciales están situadas en sus ubicaciones nominales de la OSG;
- l) que la influencia en las estaciones espaciales en órbita inclinada de las estaciones terrenales del SFS que observan los límites señalados en la Recomendación UIT-R SF.406 con respecto a estaciones espaciales en la OSG depende de la inclinación;
- m) que todo requisito para evitar la inclinación de la órbita en el servicio fijo restringiría notablemente el horizonte disponible para futuras instalaciones del servicio fijo (véanse las Figs. 4a y 4b);
- n) que la utilización de órbitas inclinadas puede dar lugar a una zona de coordinación de estación terrena más extensa;
- o) que las estaciones terrenas asociadas a las estaciones espaciales del SFS en órbitas ligeramente inclinadas pueden utilizar dispositivos de seguimiento,

---

\* Las Comisiones de Estudio 4 y 9 de Radiocomunicaciones efectuaron modificaciones de redacción en esta Recomendación en 2000 de conformidad con la Resolución UIT-R 44.

*recomienda*

**1** que una estación espacial transmisora de una red del SFS con una asignación en la OSG y destinada a funcionar sin mantenimiento en posición en sentido Norte-Sur durante parte de su vida en la órbita, se lance con una inclinación previa de:

**1.1** al menos  $N - 5^\circ$ , donde  $N$  es el número de años para el que se ha previsto el funcionamiento de la estación sin mantenimiento en posición en sentido Norte-Sur, o

**1.2**  $5^\circ$ , si esta cantidad es menor que la anterior (véase la Nota 3);

**2** que cuando se prevea que una estación espacial transmisora de una red del SFS funcione con inclinaciones orbitales superiores a  $5^\circ$ , se deberá llegar a un acuerdo con las administraciones afectadas. De forma provisional, se considera afectada una administración si:

**2.1** como resultado directo de un satélite que rebasa los  $5^\circ$  de inclinación orbital, el satélite puede iluminar una estación fija dentro de su territorio con un ángulo de elevación inferior a  $5^\circ$ . Esto no incluye a las estaciones fijas que ven el satélite por debajo de  $5^\circ$  cuando la inclinación de dicho satélite es inferior o igual a  $5^\circ$ , y

**2.2** la densidad de flujo de potencia debida a la radiación del satélite dirigida hacia la estación fija que cumple los requisitos del § 2.1 anterior se espera que alcance los valores mostrados en la Fig. 1 en condiciones de propagación en cielo despejado;

**3** que las estaciones espaciales del SFS en órbitas ligeramente inclinadas con respecto a la OSG continúen observando las disposiciones de la Recomendación UIT-R SF.358 para todas las posiciones dentro de su órbita;

**4** que los sistemas del servicio fijo continúen observando las disposiciones de la Recomendación UIT-R SF.406 con respecto a la OSG;

**5** que se coordinen o, si es necesario, se vuelvan a coordinar las estaciones terrenas teniendo en cuenta el grado de seguimiento necesario para adaptarse a la utilización de las órbitas inclinadas;

**6** que las notas siguientes se consideren parte de la presente Recomendación:

NOTA 1 – Las Recomendaciones UIT-R SF.358 y UIT-R SF.406 presentan valores similares a los del Artículo S21 del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR). Los valores que figuran en el RR tienen prioridad.

NOTA 2 – La información sobre mantenimiento en posición de la estación y puntería del haz presentada de acuerdo con el Apéndice S4 del RR debe incluir toda utilización planificada de órbitas ligeramente inclinadas.

NOTA 3 – Lanzamiento con inclinación previa es aquél que sitúa a un vehículo espacial en una órbita geosíncrona circular inclinada con unos parámetros iniciales que, tras la colocación de dicho vehículo espacial en la citada órbita y sin efectuar ningún ajuste de la inclinación, provocará una reducción en la inclinación de la órbita hasta  $0^\circ$  antes de que vuelva a aumentar dicha inclinación.

NOTA 4 – El § 2 anterior no se aplica a las estaciones espaciales que han iniciado su funcionamiento en órbitas ligeramente inclinadas o, en su caso, han sido notificadas como tales antes de finales de 1993.

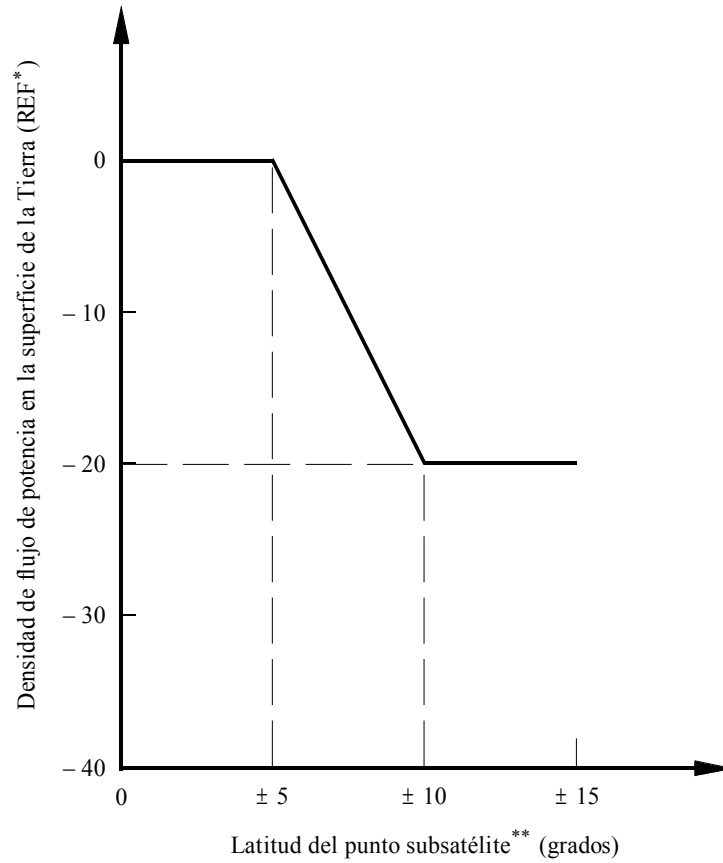
NOTA 5 – En el Anexo 1 figuran algunas consideraciones sobre la compartición de frecuencias entre el servicio fijo y el SFS que utiliza satélites en órbitas ligeramente inclinadas con respecto a la OSG.

NOTA 6 – Aunque se cumpla el umbral de coordinación de la Fig. 1, existe un pequeño, pero quizás significativo riesgo de interferencia considerable causada a los saltos de los radioenlaces terrenales en el caso de antenas de ganancia alta dirigidas a los acimuts correspondientes a la visibilidad de las órbitas inclinadas con inclinaciones inferiores a  $10^\circ$ .

NOTA 7 – La Recomendación UIT-R S.743 trata la coordinación de las redes de satélite que utilizan satélites en órbitas geoestacionarias ligeramente inclinadas y entre dichas redes y las que utilizan satélites en órbitas geoestacionarias no inclinadas.

NOTA 8 – Según el número de satélites de órbita ligeramente inclinada a los que se refiere el § 2.1, que causan interferencia a un sistema particular de radioenlaces de múltiples saltos, quizás resulte difícil cumplir los objetivos de calidad de funcionamiento y disponibilidad de la Recomendación UIT-R SF.615. Se necesitan otros estudios sobre esta cuestión.

FIGURA 1  
Umbral de coordinación con respecto al § 2



\* El nivel REF corresponde al límite señalado en la Recomendación UIT-R SF.358.

\*\* Debe utilizarse el valor correspondiente a la latitud del punto subsatélite en el instante en que el satélite interseca el eje de puntería de la antena de la estación fija.

## **Compartición de frecuencias entre el servicio fijo y el SFS que utiliza satélites en órbitas ligeramente inclinadas con respecto a la OSG**

### **1 Introducción**

Para ampliar la vida operacional de los satélites geoestacionarios en órbita, existen dos estrategias. Se basan en el hecho de que la vida operacional útil viene determinada principalmente por el combustible de mantenimiento en posición en sentido Norte-Sur que se consume a un ritmo diez veces mayor que el combustible correspondiente al mantenimiento en posición en sentido Este-Oeste.

- Si un satélite geoestacionario ha gastado casi todo su combustible de mantenimiento en posición pero por lo demás funciona satisfactoriamente, puede ampliarse significativamente su vida útil en órbita si sólo se utiliza el combustible restante para el mantenimiento en posición longitudinal.
- Un satélite previsto para una misión geoestacionaria se coloca en órbita inclinada al comienzo de su vida operacional pero, con parámetros orbitales que provocan una disminución de la inclinación natural si no se corrige. La órbita irá siendo progresivamente menos inclinada y acabará siendo ecuatorial. La inclinación continuará aumentando a menos que se utilice combustible para contrarrestar el efecto del Sol y de la Luna. Esta estrategia permite el mantenimiento de un satélite en una órbita geosincrónica circular de inclinación relativamente pequeña con una carga inicial de combustible menor que la que exigiría una órbita inicialmente geoestacionaria.

Las disposiciones reglamentarias vigentes en materia de interferencia entre sistemas de satélite geoestacionarios y entre sistemas de relevadores radioeléctricos terrenales y sistemas de satélites geoestacionarios no contemplan el caso en el que la órbita se desvía de manera significativa de la órbita verdaderamente geoestacionaria. No obstante, estos modos de interferencia se ven afectados por cualquier tipo de inclinación de la órbita.

### **2 Interacción estación espacial/estación terrenal**

#### **2.1 Geometría de la órbita**

##### **2.1.1 Iluminación de regiones de la Tierra anteriormente no iluminadas**

Las Figs. 2a y 2b muestran el aumento de la zona de superficie en la Tierra, que tendrá visibilidad directa de un satélite nominalmente ubicado a (0,0) en caso de que dicho satélite derive hacia una órbita inclinada, para inclinaciones de 5° y 15°, respectivamente. La zona sombreada representa la iluminación suplementaria de la Tierra. Si bien la mayor parte de esta nueva cobertura corresponde a regiones polares, las «cuñas Este-Oeste» cubren latitudes bastante bajas.

Algunos receptores de radioenlaces terrenales actualmente protegidos de la OSG (o de partes de ésta) por la curvatura del planeta, tendrán posiblemente visibilidad directa de los satélites en órbita inclinada.

#### **2.2 Zonas orbitales que afectan a los emplazamientos de los radioenlaces**

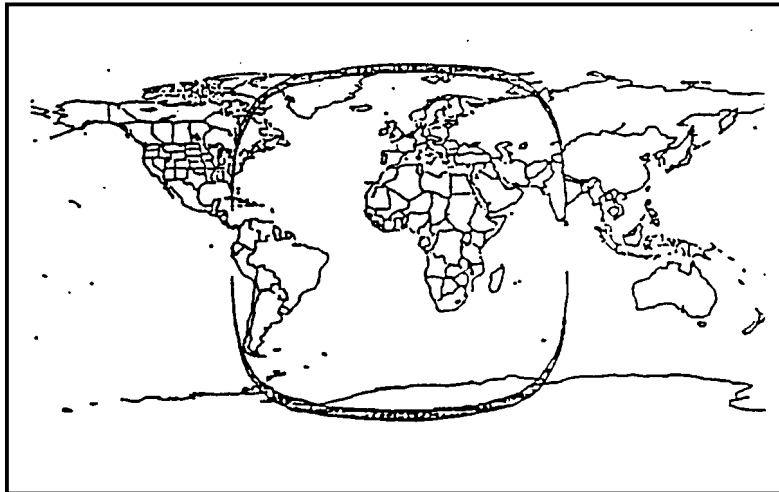
La Fig. 3 muestra el mapa del cielo de 360° visto desde una ubicación con una latitud de 50° N. Este diagrama muestra la OSG vista desde la estación de radioenlace y la forma en que se ensancha, en función de los diversos ángulos de inclinación, la banda en la que los satélites pueden divisarse en algún momento de cada periodo de 24 h. El arco sombreado que rodea a la OSG representa la zona recomendada de margen de error de puntería para radioenlaces, es decir, hasta 2° a cada lado de la OSG para las estaciones que transmiten en la banda 1-10 GHz (número S21.2.1 del RR).

Las «figuras en forma de ocho» muestran los movimientos de los satélites situados con una separación de 10° en la OSG, durante un periodo de 24 h. Los arcos representan los límites superior e inferior de las «figuras en forma de ocho» para el caso más desfavorable, en el que todos los satélites en la OSG se encuentran en órbitas inclinadas de 5°, 10° y 15°, respectivamente.

La Fig. 3 ilustra claramente el caso en que satélites que no eran visibles para la estación terrenal, resultan ahora visibles por encima del horizonte.

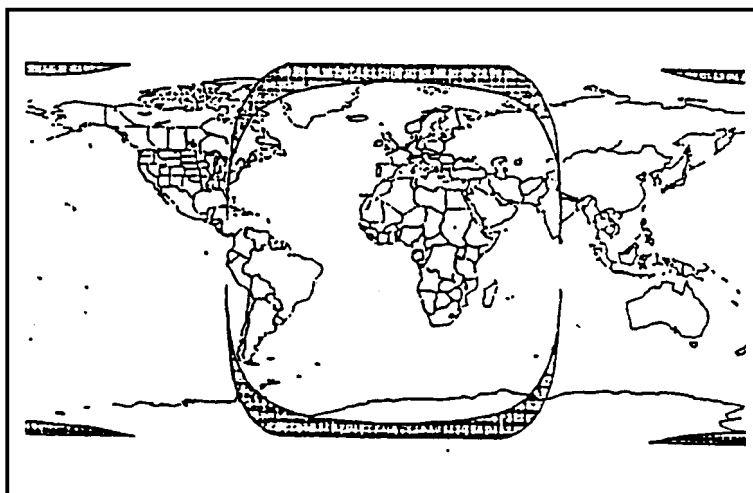
La figura también ilustra cómo aumenta la zona de exposición directa de los radioenlaces a los satélites, y viceversa. El tamaño de esta zona depende directamente del emplazamiento. La Fig. 4a ilustra este punto y muestra la variación con la latitud. Obsérvese que en el caso de enlaces bidireccionales con las dos antenas apuntando en sentidos opuestos, deben considerarse las zonas de exposición directa de al menos una de las dos antenas (véase la Fig. 4b).

FIGURA 2a  
 Aumento en la iluminación de la superficie de la Tierra  
 (Inclinación 5°)



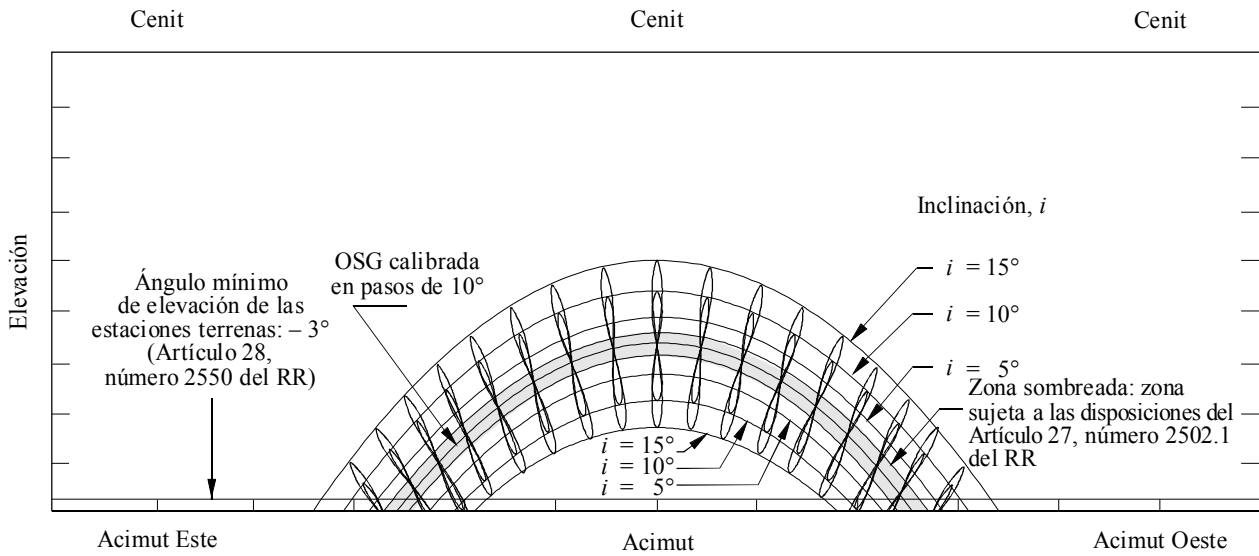
D02

FIGURA 2b  
 Aumento en la iluminación de la superficie de la Tierra  
 (Inclinación 15°)



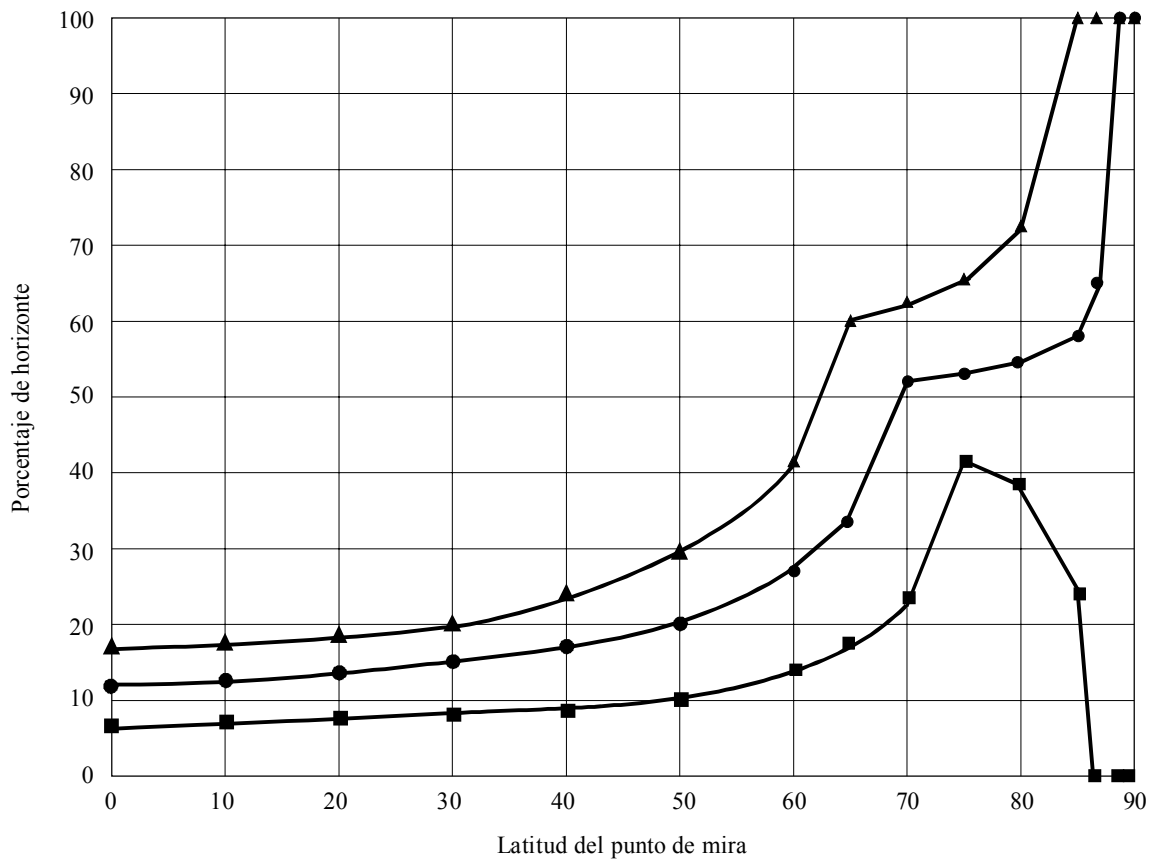
D03

FIGURA 3  
Visión general de la OSG en las bandas de la órbita desde aproximadamente 50° N



D04

FIGURA 4a  
Porcentaje de horizonte con órbita inclinada visible al receptor terrenal

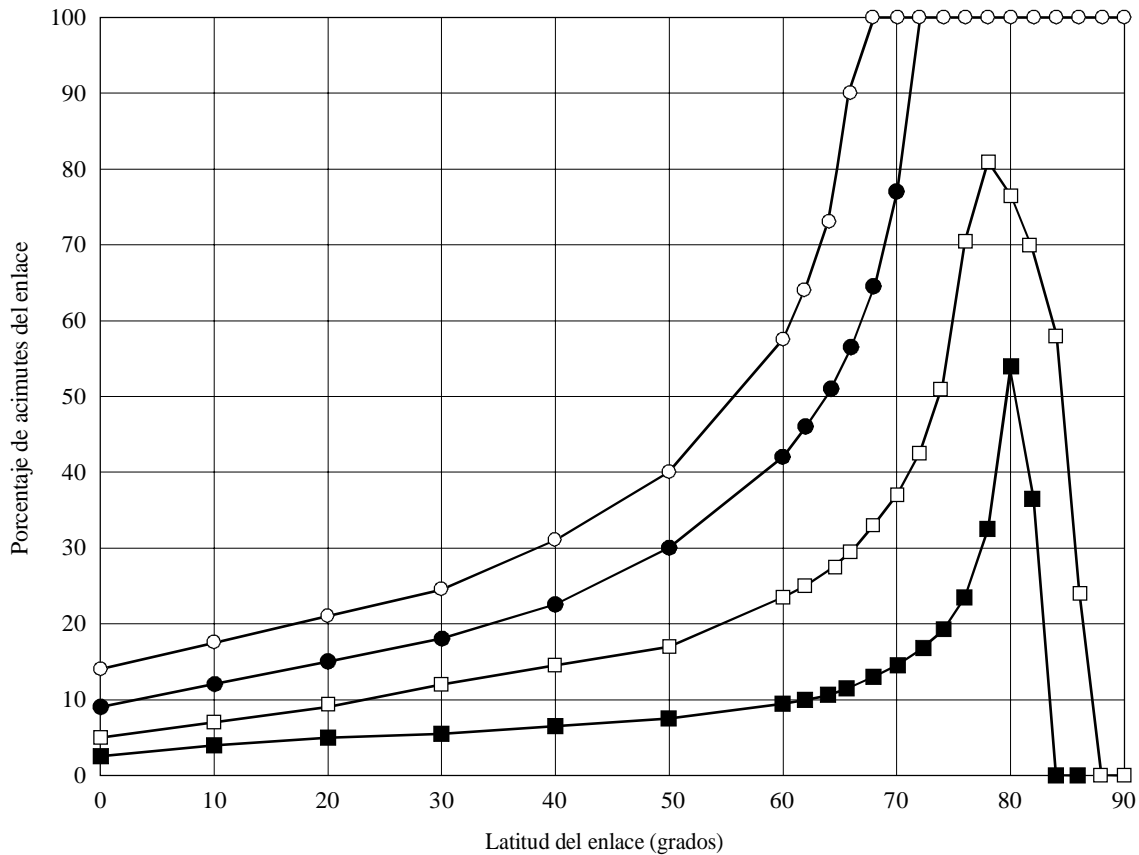


- ▲ Inclinación 15°
- Inclinación 10°
- Inclinación 5°

D05

FIGURA 4b

Porcentaje de horizonte con órbita inclinada visible en cualquier extremo de un salto terrenal bidireccional



- Inclinación 2°
- Inclinación 5°
- Inclinación 10°
- Inclinación 15°

D06

## 2.3 Interferencia de estación espacial causada a estaciones terrenales

### 2.3.1 Introducción

La evaluación de la interferencia entre sistemas del SFS y del servicio fijo, cuando los primeros pasan a una órbita ligeramente inclinada es un tema complejo. Debe tener en cuenta el hecho de que, debido a la inclinación orbital, algunas estaciones terrenales podrían resultar directamente expuestas a los satélites durante periodos de tiempo dependientes de la magnitud de la inclinación y de la orientación de los haces de los radioenlaces. Debe también tener en cuenta que, debido a la inclinación orbital, partes de la red terrenal que podrían sufrir mayor interferencia, serán análogamente aliviadas de la interferencia durante algunos periodos de tiempo. Sin embargo, en los sistemas digitales, aun cuando la duración de la exposición pueda ser menor que la que se produce cuando los satélites no están en órbita inclinada, el tiempo de exposición podría ser considerable.

En este punto se presentan los resultados de diversos estudios, que analizan la indisponibilidad de los sistemas, la exposición a la interferencia y la interferencia combinada sobre un circuito ficticio de referencia.

### 2.3.2 Modelo de indisponibilidad de un sistema

Para mayor sencillez se considera únicamente la interferencia del lóbulo principal y se determinan sus efectos utilizando un diagrama de ganancia de antena rectangular. Un satélite causa interferencia a un receptor terrenal determinado si el acimut del punto en que intersecta el horizonte difiere menos de  $\pm 0,5^\circ$  del acimut del eje de puntería de la antena receptora. Interfiere a ese receptor durante el periodo de tiempo en que se encuentra entre el horizonte y  $1^\circ$  por encima

del horizonte. La relación  $\delta$  del Cuadro 1 da la información necesaria para evaluar ese periodo. Para un satélite que debido a su declinación, se sitúa en el horizonte con una determinada diferencia de longitud,  $\delta$  es el ángulo de elevación que corresponde a un aumento de la declinación de  $1^\circ$ . Para mayor sencillez, el término declinación se utiliza en este punto para designar la latitud del punto subsatélite.

CUADRO 1

**Interferencia terrenal causada por satélites geoestacionarios en órbitas con una separación orbital de los satélites de  $3^\circ$**

a) *Inclinación del satélite:  $5^\circ$*

	$\lambda_S$	$Z_S$	$\delta$	$100 P_I$	$100 P_u$	$100 P_{nu}$
Latitud del receptor interferido (grados N)	Gama de longitudes de visibilidad (grados)	Gama de acimutes de visibilidad (grados)	Grados de elevación por grado de declinación	Porcentaje de saltos cuyos receptores están expuestos a interferencia	Porcentaje de tiempo en que el salto interferido se encuentra indisponible	Porcentaje de tiempo en que un circuito de 50 saltos se encuentra indisponible
20	3,70	10,78	0,35	1,4	0,1429	0,098
30	5,88	11,73	0,51	2,2	0,0980	0,107
40	8,59	13,33	0,65	3,2	0,0769	0,122
50	12,32	16,04	0,78	4,6	0,0641	0,146
60	18,33	21,10	0,88	6,8	0,0568	0,193

b) *Inclinación del satélite:  $10^\circ$*

	$\lambda_S$	$Z_S$	$\delta$	$100 P_I$	$100 P_u$	$100 P_{nu}$
Latitud del receptor interferido (grados N)	Gama de longitudes de visibilidad (grados)	Gama de acimutes de visibilidad (grados)	Grados de elevación por grado de declinación	Porcentaje de saltos cuyos receptores están expuestos a interferencia	Porcentaje de tiempo en que el salto interferido se encuentra indisponible	Porcentaje de tiempo en que un circuito de 50 saltos se encuentra indisponible
20	7,5	22	0,35	2,8	0,071	0,10
30	12	23,5	0,51	4,4	0,049	0,11
40	17,5	27	0,65	6,5	0,038	0,12
50	25	32,5	0,78	9,3	0,032	0,15
60	37,5	43	0,88	13,9	0,028	0,20

A fin de facilitar los cálculos se supone que las declinaciones de un satélite en órbita inclinada tienen una distribución uniforme. Ello equivale a suponer una onda triangular, en lugar de una sinusoidal, en la variación de la declinación de un satélite con el tiempo. Esta suposición reduce el tiempo de exposición de aquellos receptores cuyas antenas están apuntadas más allá del punto en que la órbita geoestacionaria atraviesa el horizonte, pero simplifica considerablemente la estadística para el cálculo de la indisponibilidad de la red.

### 2.3.2.1 Cálculo de la indisponibilidad

Considérese una estación de radiocomunicación terrenal situada en una latitud particular y que todos los satélites se encuentran en órbitas inclinadas un valor de  $\alpha_m$  de  $10^\circ$ . Se puede determinar  $\lambda_S$ , la gama de longitudes desde las que la interferencia es potencialmente observable para una latitud y una inclinación dadas. Esta gama aumenta casi linealmente con el ángulo de inclinación. De forma similar, se puede calcular  $Z_S$ , la gama de acimuts en que aparece interferencia. Como  $Z_S$  es mayor que  $\lambda_S$ , los satélites aparecerán con una separación mayor en acimut que su separación orbital. En consecuencia, cada satélite en el arco  $\lambda_S$  constituirá una fuente de interferencia distinta.

Para una separación de satélites de  $S$  grados en la órbita geoestacionaria, el número de fuentes interferentes potenciales,  $N_S$ , viene dado por:

$$N_S = \frac{\lambda_S}{S} \quad (1)$$



Como los trayectos terrenales son bidireccionales y hay fuentes interferentes tanto al sudeste como al sudoeste, la probabilidad de que un salto sufra interferencia,  $P_I$ , sin tener en cuenta la anchura de haz de las antenas receptoras, y suponiendo que las direcciones de trayecto en la red terrenal están uniformemente distribuidas en ángulo, viene dada por:

$$P_I = \frac{N_S}{90} = \frac{\lambda_S}{90 S} \quad (2)$$

Para un trayecto cuya antena receptora apunta hacia un acimut que difiere menos de  $0,5^\circ$  del acimut en que un satélite cruza el horizonte, puede determinarse la fracción del tiempo durante el cual el trayecto estará sometido a interferencia. Como el satélite alcanza cada declinación dos veces al día, permanece  $12/\alpha_m$  horas cada día en cada intervalo de  $1^\circ$  de declinación. El aumento de elevación por cada grado de declinación,  $\delta$ , es normalmente menor que la unidad y depende más de la latitud que de la diferencia de longitud con respecto al satélite. Por lo tanto, puede utilizarse el valor promedio representativo de  $\delta$  como latitud del trayecto. En consecuencia, el tiempo que un satélite permanece entre el horizonte y un ángulo de elevación de  $1^\circ$  por encima del horizonte viene dado por la expresión  $12/\delta \alpha_m$ , y la fracción del tiempo durante el cual el trayecto está expuesto a interferencia,  $f_I$ , es:

$$f_I = \frac{1}{2\delta \alpha_m} \quad (3)$$

Para evaluar el efecto de la interferencia recibida con ángulos de elevación bajos, supóngase que los satélites iluminan los receptores terrenales con la máxima densidad de flujo de potencia permitida,  $-152 \text{ dB(W(m}^2/4 \text{ kHz))}$ . En el caso de un radioenlace digital terrenal con una anchura de banda de ruido de 15 MHz, una abertura de recepción de  $10 \text{ m}^2$  y una eficacia del 80%, la potencia de interferencia recibida podría ser  $-77 \text{ dBm}$  ( $-152 + 30 + 36 + 9$ ).

Actualmente, las señales de satélite más indeseadas funcionan a niveles de potencia inferiores. Como ejemplo actual tomamos una sola señal de vídeo dispersada con una anchura de banda de 3 MHz, que produce una potencia de interferencia recibida de  $-84 \text{ dBm}$ . La potencia de ruido del sistema a la entrada del receptor, debida al ruido térmico y al ruido del receptor correspondientes a un factor de ruido de 3 dB, sería  $-99 \text{ dBm}$ . Por consiguiente, la interferencia degradará en 15 dB el margen de desvanecimiento por ruido-térmico del receptor.

Un radioenlace digital típico en la banda de 4 GHz tiene un margen de desvanecimiento por ruido térmico de 40 a 44 dB. Tomando un valor intermedio de 42 dB, la interferencia reduciría este margen a 27 dB. Si el radioenlace digital hace uso de un control automático de potencia de transmisión y funciona con un nivel de potencia nominal a 12 dB por debajo del máximo, el margen de desvanecimiento efectivo del receptor sería 15 dB. Un desvanecimiento de esta magnitud en un trayecto terrenal suele variar lentamente en el tiempo y normalmente no es dispersivo. Cabe esperar que un trayecto sufra desvanecimientos de esta profundidad entre el 0,2 y el 2,0% del tiempo. A efectos del cálculo, se tomará el valor del 0,5% como un porcentaje representativo del tiempo en el que el trayecto no está disponible cuando existe interferencia. Por consiguiente, la probabilidad,  $P_u$ , de que un salto interferido no se encuentre disponible puede obtenerse a partir de la ecuación (3):

$$P_u = \frac{5 \times 10^{-3}}{2\delta \alpha_m} \quad (4)$$

En la Recomendación UIT-R F.557 se especifican los objetivos de indisponibilidad para el trayecto digital ficticio de referencia (TDFR) que normalmente comprende 50 trayectos individuales. Las fuentes de interferencia para los distintos saltos que forman un circuito son diferentes e independientes entre sí, al igual que lo son las apariciones de desvanecimiento adicional necesarias para provocar indisponibilidad. Por lo tanto, la indisponibilidad de la red o del circuito debida a la interferencia,  $P_{nu}$ , viene dada por:

$$P_{nu} = 50 P_I P_u \quad (5)$$

o bien, según las ecuaciones (2), (4) y (5):

$$P_{nu} = \frac{\lambda_S \times 10^{-2}}{7,2 S \delta \alpha_m} \quad (6)$$

En el Cuadro 1 aparecen los valores de los parámetros y probabilidades pertinentes en el caso en que todos los satélites tengan una inclinación de  $10^\circ$ . Obsérvese que las indisponibilidades de la red superan en más de un orden de magnitud los objetivos indicados en la Recomendación UIT-R SF.615 para todas las fuentes de interferencia. Además, no se ha supuesto ninguna correlación temporal entre la ocurrencia del desvanecimiento y la presencia de interferencia. Por ello, los cálculos son promedios anuales, y quizás esto haga aún más difícil el cumplimiento de los objetivos de calidad de funcionamiento para cualquier mes de la Recomendación UIT-R SF.615.

Si bien el valor importante de indisponibilidad del circuito puede parecer una consecuencia de la elevada magnitud supuesta para la inclinación orbital, en la práctica es casi independiente de dicho parámetro. La gama de longitudes guarda una relación lineal con la gama de declinaciones. Por consiguiente, la indisponibilidad de la red es independiente de  $\alpha_m$ . Reduciendo la inclinación orbital máxima  $\alpha_m$ , disminuye el porcentaje de saltos que experimentan interferencia  $P_I$  y aumenta el porcentaje de tiempo de indisponibilidad de cualquier salto que sufra efectivamente interferencia  $P_u$ . Además, si se reducen las separaciones orbitales de los satélites, aumentan  $P_I$  y  $P_u$ . Dado que la anchura de haz de la antena receptora se despreció al calcular  $P_I$ , la indisponibilidad del circuito calculada constituye la consecuencia adicional del hecho de permitir que las órbitas adquieran ángulos de inclinación significativos. No todos los satélites en la órbita radian necesariamente en el límite de densidad de flujo de potencia de  $-152$  dB(W(m<sup>2</sup>/4 kHz)). Además, no ocupan de manera uniforme toda la banda de frecuencias.

Sin embargo, los requisitos de funcionamiento del trayecto digital ficticio de referencia de grado alto puede que no permitan la exposición directa de ningún receptor terrenal. En la quinta columna de los Cuadros 1a) y 1b) puede observarse que un aumento de la inclinación orbital hace aumentar igualmente el número de receptores expuestos que pueden necesitar ajustes para satisfacer la calidad de funcionamiento del sistema. Además, puede que también sea preciso satisfacer los requisitos de calidad de funcionamiento con respecto a la interferencia de una sección digital. Esta calidad de funcionamiento puede venir influenciada por la inclinación orbital máxima.

### 2.3.2.2 Efectos de las inclinaciones orbitales pequeñas

Se necesita un análisis más detallado para evaluar los efectos de los ángulos de inclinación, que son tan pequeños que la gama de visibilidad en acimut,  $Z_S$ , resulta comparable a la anchura de haz de la antena. Sin inclinaciones orbitales, el porcentaje de receptores terrenales expuestos a interferencia del haz principal depende del ángulo aparente,  $\epsilon$ , con que la órbita de los satélites geoestacionarios intersecta el horizonte geométrico de un observador terrenal. Para satélites con separaciones de  $3^\circ$ , la fracción  $n_0$  de antenas receptoras con lóbulos de  $1^\circ$  por  $1^\circ$  expuestas a interferencia en las latitudes de interés, suponiendo que las antenas tienen una distribución uniforme en cuanto a su ángulo y emplazamiento a lo largo de una latitud determinada, viene dada por la ecuación:

$$n_0 = \frac{1}{180 S \sin \epsilon} \quad (7)$$

En el Cuadro 2 figuran valores representativos de  $n_0$ , que es la fracción de receptores terrenales que requieren una atención especial para facilitar la compartición de la banda. La fracción adicional de receptores que resultan afectados por cada grado de inclinación orbital máxima puede obtenerse por el cociente entre la mitad de la probabilidad de exposición de cada salto y la inclinación orbital máxima, es decir,  $0,5 P_I/\alpha_m$ , o bien:

$$n_{\alpha_m} = \frac{\lambda_S}{180 S \alpha_m} \quad (8)$$

El Cuadro 2 muestra que la dificultad de compartición se duplica aproximadamente en latitudes superiores a  $20^\circ$  con inclinaciones orbitales inferiores a  $1^\circ$ . Obsérvese que los valores inscritos en ambas columnas son inversamente proporcionales a las separaciones orbitales de los satélites.

Los resultados que aparecen en el Cuadro 2 indican que el número de receptores terrenales expuestos a interferencia aumenta con la inclinación orbital, lo que pone en evidencia la necesidad de limitar dicha inclinación. Se necesitan estudios ulteriores, con ayuda de modelos de antenas de recepción terrenales más completos, para determinar si es necesario restringir aún más la inclinación a fin de limitar a niveles aceptables el número y el nivel de las exposiciones de receptores terrenales a interferencias.

### 2.3.3 Interferencia combinada sobre un circuito ficticio de referencia

Por lo general, los satélites geoestacionarios aparecen frente a los receptores del servicio fijo como fuentes puntuales de interferencia que funcionan desde asignaciones de órbitas fijas. En estudios anteriores, en los que se han utilizado modelos informatizados Monte Carlo, se han calculado los niveles de interferencia causada al servicio fijo, por estaciones espaciales del servicio fijo por satélite de localización fija bajo diferentes supuestos paramétricos.

Para estudiar la influencia combinada en el servicio fijo de estas distintas características geométricas, variables en función del tiempo, se aplicó un modelo que utiliza los parámetros prácticos del sistema de radioenlaces y plena ocupación de la órbita de satélites con separación de  $3^\circ$ , y produciendo cada uno de ellos los niveles de densidad de flujo de potencia admisibles en todos los ángulos de llegada. Además, se modificó el modelo para tener en cuenta la posibilidad de simular la colocación de cada satélite en una órbita geosíncrona inclinada, separada y elegida al azar, con ángulos de inclinación de  $0^\circ$  a  $15^\circ$ .

CUADRO 2

**Porcentaje de receptores terrenales expuestos a interferencia en el lóbulo principal  
procedente de estaciones espaciales con separaciones orbitales de 3°**

	100 $n_0$	100 $n_{\alpha_m}$
Latitud del receptor interferido (grados N)	Porcentaje de receptores expuestos a interferencia en el lóbulo principal sin inclinación orbital	Porcentaje adicional de receptores expuestos por grado de inclinación orbital
20	0,20	0,14
30	0,21	0,22
40	0,24	0,32
50	0,29	0,46
60	0,37	0,69

Utilizando el modelo anterior como instrumento de estudio, se hicieron pruebas para determinar los niveles medios de interferencia que experimentaría el servicio fijo a diversas latitudes y con distintas direcciones de encaminamiento cuando las estaciones espaciales del servicio fijo por satélite ocuparan una determinada gama de inclinaciones orbitales. El estudio demostró que, a cualquier latitud, la interferencia combinada causada al servicio fijo por una geometría del servicio fijo por satélite de órbitas geosincrónicas inclinadas al azar, difiere sólo de manera marginal de la interferencia causada cuando todos los satélites están en la órbita geosincrónica. Las Figs. 5a y 5b muestran de manera resumida los resultados de una de las pruebas efectuadas durante el estudio. En ellos se comparan las distribuciones de probabilidad de interferencia causada al servicio fijo por órbitas del servicio fijo por satélite con inclinaciones de 0° y 15° para encaminamientos de radioenlace centrados a 40° de latitud. En uno de los casos (Fig. 5a) la dirección de encaminamiento se eligió para una interferencia recibida máxima (aproximadamente 77°). Se observa que, en este caso concreto, la interferencia media causada al servicio fijo es menor cuando la inclinación es de 15°.

Otras pruebas (véase la Fig. 5b) indican el efecto opuesto para distintas opciones de dirección de encaminamiento. El estudio llega a la conclusión de que, a cualquier latitud, la interferencia media causada al servicio fijo para todas las direcciones de encaminamiento es independiente de la inclinación de la órbita; pero que determinados encaminamientos pueden experimentar de manera periódica variaciones mensurables en el nivel de interferencia a medida que los satélites se mueven con respecto a los diagramas de antena del servicio fijo. Debe advertirse, no obstante, que estos estudios sólo se ocupan de la cantidad relativa de interferencia causada por el servicio fijo por satélite e imputable a las órbitas inclinadas y que no se hace ningún comentario sobre el número total de estaciones del servicio fijo que pueden verse afectadas a consecuencia de la inclinación.

### 2.3.4 Interferencia combinada en una red del servicio fijo real

Se han emprendido estudios para examinar el efecto que tiene la admisión de órbitas geosíncronas con diversas inclinaciones en las redes principales del servicio fijo.

#### 2.3.4.1 Estudio A

El modelo de servicio fijo utilizado fue el de la red transcanadiense a 4 GHz desde Vancouver a Halifax (129 saltos). Los satélites identificados fueron los de la Lista A de la ex IFRB de diciembre de 1988 con los adecuados parámetros de publicación avanzada. El número total de satélites fue de 167. La p.i.r.e. supuesta se obtuvo a partir de la densidad de potencia máxima en una banda de 20 MHz y hasta una potencia máxima de 10 W por 20 MHz.

Se calculó la interrupción de cada salto combinando la interferencia procedente de todos los satélites situados en diversas órbitas inclinadas. La interrupción de extremo a extremo total se determinó como la suma de las interrupciones en cada salto. De esa forma se obtuvo la interrupción relativa debida a los diversos niveles de órbita inclinada.

Se observó que la mayoría de los 129 saltos no experimentaban un aumento significativo de la interrupción cuando los satélites estaban situados en órbitas con inclinaciones de hasta  $\pm 7^\circ$ . Sin embargo, en algunos saltos se apreciaron modificaciones importantes; en algunos aumentó la interrupción y en otros disminuyó. No obstante, la interrupción de extremo a extremo ocultó estos cambios y varió en menos del 5% de aumento en un sentido y en aproximadamente el 10% de aumento en el otro sentido.

Basándose en ese estudio, que cubre una amplia gama de circunstancias, puede llegarse a la conclusión de que desde el punto de vista estricto de la interferencia a satélites, puede aceptarse una inclinación orbital de hasta  $\pm 7^\circ$ . Sin embargo, si se tienen en cuenta otras consideraciones tales como la zona de coordinación de la estación terrena/estación fija, pueden aparecer nuevas restricciones que definirían la máxima inclinación de la órbita admisible.

FIGURA 5a  
Distribución de la interferencia

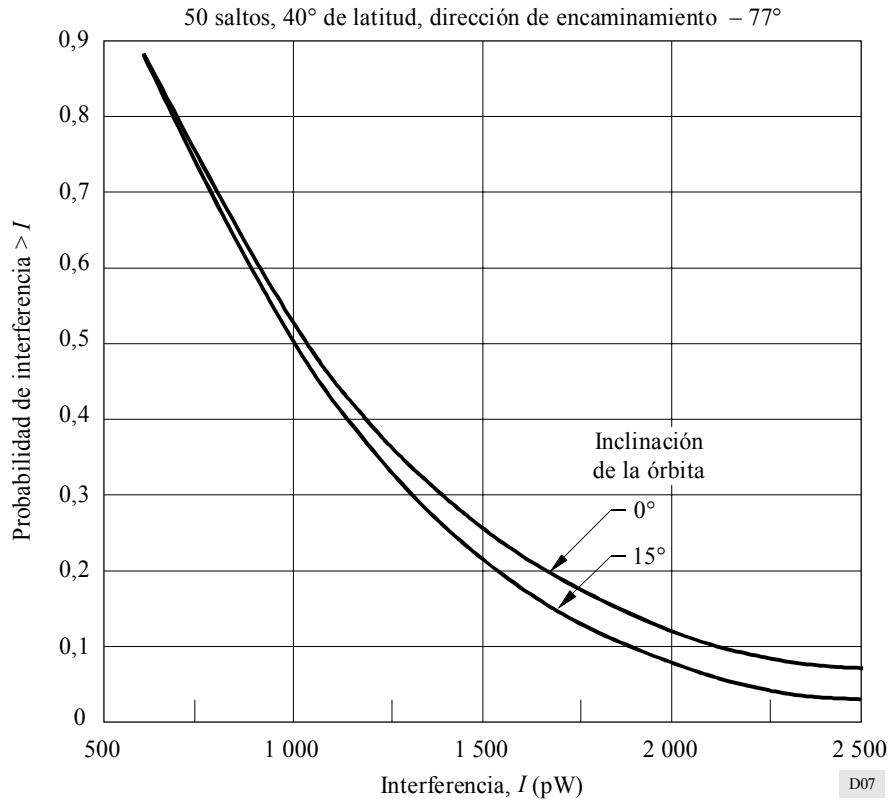
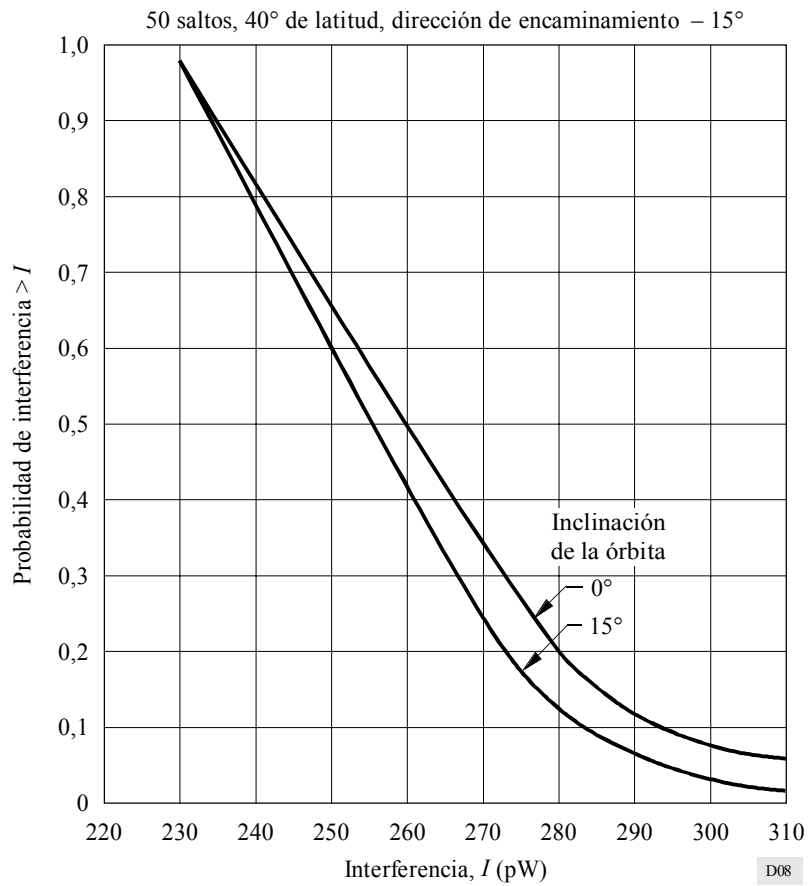


FIGURA 5b  
Distribución de la interferencia



2.3.4.2 Estudio B

El modelo de servicio fijo utilizado fue la ruta que conecta Tokio y Osaka en la banda de 4 GHz (61 saltos y 122 antenas). Se supuso un diagrama de radiación de antena con las características descritas en la Recomendación UIT-R F.699, con un valor  $D/\lambda = 50$ . Las pérdidas en el alimentador se consideraron de 3 dB y el factor de ruido del receptor, de 4 dB. Se supuso que cada satélite producía la máxima densidad de flujo de potencia como especifica la Recomendación UIT-R SF.358. No se tuvo en cuenta la pérdida atmosférica.

Se consideró que los satélites funcionaban con un ángulo de inclinación de  $i^\circ$ . En tal caso, la densidad de probabilidad  $p(x)$  de que un satélite tenga un ángulo de separación de  $x^\circ$  con respecto a la OSG puede expresarse aproximadamente por la siguiente fórmula:

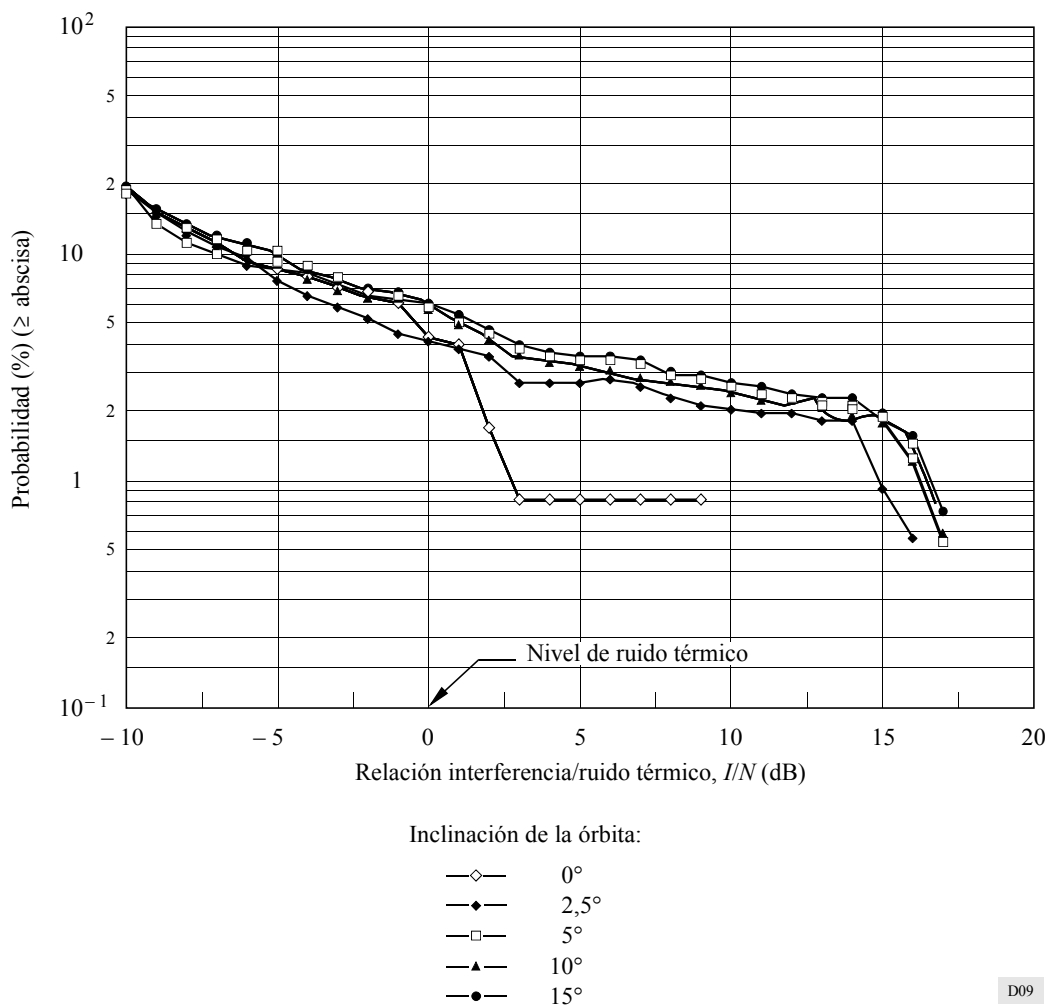
$$p(x) = \frac{1}{\pi\sqrt{i^2 - x^2}} \tag{9}$$

El ángulo de separación entre la antena del radioenlace y la órbita inclinada se calculó para cada valor  $x$ , teniendo en cuenta la refracción atmosférica del haz de antena y considerando la función de densidad de probabilidad  $p(x)$ . También se tuvieron en cuenta los efectos del horizonte.

Se calculó la potencia de interferencia a cada receptor del radioenlace procedente del satélite más cercano.

Los resultados aparecen en la Fig. 6. El eje de abscisas representa la relación interferencia/ruido térmico ( $I/N$ ). Cabe señalar que cuando no se permite un funcionamiento con órbita inclinada, la probabilidad de que  $I/N$  rebase el valor de 10 dB es cero y cuando el ángulo de inclinación es de  $2,5^\circ$ , dicha probabilidad es de aproximadamente el 3%. Cuando el ángulo de inclinación es mayor de  $2,5^\circ$ , existe la tendencia de que la citada probabilidad sea mayor, pero el aumento no es significativo.

FIGURA 6  
Estadísticas sobre la potencia de interferencia en el satélite



Estos resultados muestran que, si se acepta el funcionamiento en órbitas inclinadas, aumentará el porcentaje de que exista una relación  $I/N$  alta, aunque el ángulo de inclinación sea pequeño. Ello obedece a que las rutas de los radioenlaces se han planificado de forma que las orientaciones de las antenas receptoras eviten la exposición a las órbitas de los satélites geoestacionarios. Pero cabe señalar que estos cálculos son algo conservadores, en el sentido de que se supone que los satélites están ubicados en las posiciones longitudinales más desfavorables cercanas a las direcciones de las antenas receptoras por lo que, en situaciones reales, el aumento del porcentaje de que exista una relación  $I/N$  alta será menor.

Teniendo en cuenta varios factores, incluso el hecho de que sólo unos pocos satélites funcionarán en órbita inclinada, se concluye que el funcionamiento en órbita inclinada dentro de ciertos límites se aceptará desde el punto de vista de la interferencia causada por satélites a sistemas de radioenlaces.

### 2.3.5 Estudio de la evaluación estadística de la interferencia

#### 2.3.5.1 Introducción

Este estudio pretende realizar una evaluación estadística de la interferencia causada a sistemas de radioenlaces por los satélites del SFS que utilizan una órbita ligeramente inclinada. Los valores empleados en este estudio puede que no sean los del caso más desfavorable pero han sido elegidos como valores típicos de las redes de radioenlaces en muchos países. En el § 2.3.5.4 se consideran los efectos de algunos factores tales como diversidad de espacio y ganancia de antena.

#### 2.3.5.2 Modelo de interferencia

##### 2.3.5.2.1 Modelo de sistema de radioenlace

Frecuencia de funcionamiento:	4 GHz y 11 GHz
Diámetro de antena:	3 m (ganancia = 39,7 dB a 4 GHz, 48,5 dB a 11 GHz)
Temperatura de ruido del receptor:	750 K
Pérdidas en el alimentador:	3 dB
Ángulo de elevación de la antena:	0°
Ángulo del acimut de la antena:	uniforme en 360° salvo las direcciones de 2° ó 1,5° hacia la OSG
Diagrama de radiación de la antena:	véase la Recomendación UIT-R F.699

La interferencia procedente de un satélite se evaluó en términos de la relación interferencia/ruido térmico,  $I/N$ . En las condiciones indicadas el valor máximo de la relación  $I/N$  cuando una estación de radioenlace está directamente expuesta a la emisión del satélite es de 15,1 dB a 4 GHz y 17,1 dB a 11 GHz, en condiciones de propagación en el espacio libre y sin pérdidas por absorción atmosférica.

##### 2.3.5.2.2 Modelo de satélite

Se supone que en la órbita ligeramente inclinada sólo existe un satélite. Debido a la gran directividad de las antenas del radioenlace se estima que esta hipótesis es suficiente para la evaluación de la interferencia considerada en esta Recomendación.

La latitud y la longitud de un satélite que funcione en órbita inclinada se determinan de acuerdo con las fórmulas indicadas en la Recomendación UIT-R S.743.

Se supone que el satélite produce la máxima densidad de flujo de potencia en la superficie de la Tierra de acuerdo con la Recomendación UIT-R SF.358 para cualquier ángulo (§ 1.2 para 4 GHz y § 1.3 para 11 GHz).

Se supone igualmente que la densidad de flujo de potencia es constante en toda la anchura de banda del receptor del radioenlace.

##### 2.3.5.2.3 Propagación

Para simplificar los cálculos no se ha tenido en cuenta la refracción atmosférica.

Sin embargo se han considerado, en función del ángulo de elevación, las pérdidas por absorción atmosférica debidas al oxígeno y al vapor de agua (7,5 g/m<sup>3</sup> como valor típico).

Las pérdidas se calcularon de acuerdo con el método indicado en la Recomendación UIT-R P.676. Los valores reales se representan en la Fig. 8.

### 2.3.5.3 Evaluación de la interferencia

#### 2.3.5.3.1 Cálculos

Se han calculado las relaciones  $I/N$  que aparecen en una estación de radioenlace y algunos de los resultados se representan en las Figs. 7a a 7d como sigue:

Fig. 7a: Sistema de 4 GHz, estación a 40° de latitud

Fig. 7b: Sistema de 11 GHz, estación a 40° de latitud

Fig. 7c: Sistema de 4 GHz, estación a 60° de latitud

Fig. 7d: Sistema de 11 GHz, estación a 60° de latitud.

Los efectos de la interferencia normalmente son más acusados en latitudes más elevadas. Por consiguiente, se consideran representativos los cálculos para latitudes de 40° y 60°.

Los cálculos se han efectuado para ángulos de inclinación de 2,5°, 5° y 10°. La abscisa de cada figura es la longitud de satélite con respecto a la longitud de la intersección horizonte/órbita (78,6° para 40° de latitud y 72,4° para 60° de latitud).

Los cálculos se han realizado de la forma siguiente. Para cada longitud de satélite, el ángulo acimutal de la dirección de la antena de la estación de radioenlace se ha elegido uniforme en los 360° salvo para las direcciones de 2° (en el caso del sistema de 4 GHz) o 1,5° (en el caso del sistema de 11 GHz) hacia la OSG.

En cada uno de los casos anteriores, la interferencia se ha evaluado en términos de la relación  $I/N$  para todas las posibles ubicaciones del satélite en la órbita inclinada. Se han determinado los dos siguientes valores. Uno de ellos es la relación  $I/N$  en el caso más desfavorable y el otro es el 10% de la relación  $I/N$ , que es el valor rebasado durante no más del 10% del tiempo. Estos dos valores son funciones del acimut de la antena del radioenlace. Las curvas de «valores del 10%» se determinaron a partir del 10% de las relaciones  $I/N$  rebasadas por no más del 1% de los posibles ángulos acimutales.

Las curvas de puntos y de trazo continuo en las figuras corresponden, respectivamente, a los valores más desfavorables y a los valores del 10% como se define anteriormente.

#### 2.3.5.3.2 Interferencia sufrida por una estación a 40° de latitud

En la Fig. 7a se representa la relación  $I/N$  experimentada por una estación de radioenlace de 4 GHz a 40° de latitud. Las curvas de puntos muestran los valores más desfavorables. Son funciones de la longitud del satélite y el valor más elevado de  $I/N$  es 13,2 dB. Cuando el satélite está situado muy próximo a la intersección horizonte/órbita, el valor más desfavorable es bajo debido a que la antena de la estación del radioenlace está apuntada al menos a 2° de distancia con respecto a la dirección de la OSG. Cuando la longitud relativa del satélite rebasa un cierto límite, el satélite desaparece por debajo del horizonte y por consiguiente no se produce interferencia.

El valor del 10% es algo inferior al valor más desfavorable y este fenómeno es más acusado cuanto mayor es el ángulo de inclinación. Si el ángulo de inclinación es de 10°, el valor más desfavorable es muy elevado entre -10° y +8° pero el valor del 10% se mantiene por debajo de 0 dB salvo para ciertas longitudes cerca de -9° y +7°.

En la Fig. 7b se representan los datos similares para el caso de 11 GHz. El valor más elevado de la relación  $I/N$  es 13,6 dB. Debido a la anchura de haz más estrecho de la antena de 11 GHz, el valor del 10% es mucho menor que en el caso del sistema a 4 GHz. Ello indica que el efecto de la interferencia es más pequeño a 11 GHz que a 4 GHz.

#### 2.3.5.3.3 Interferencia sufrida por una estación a 60° de latitud

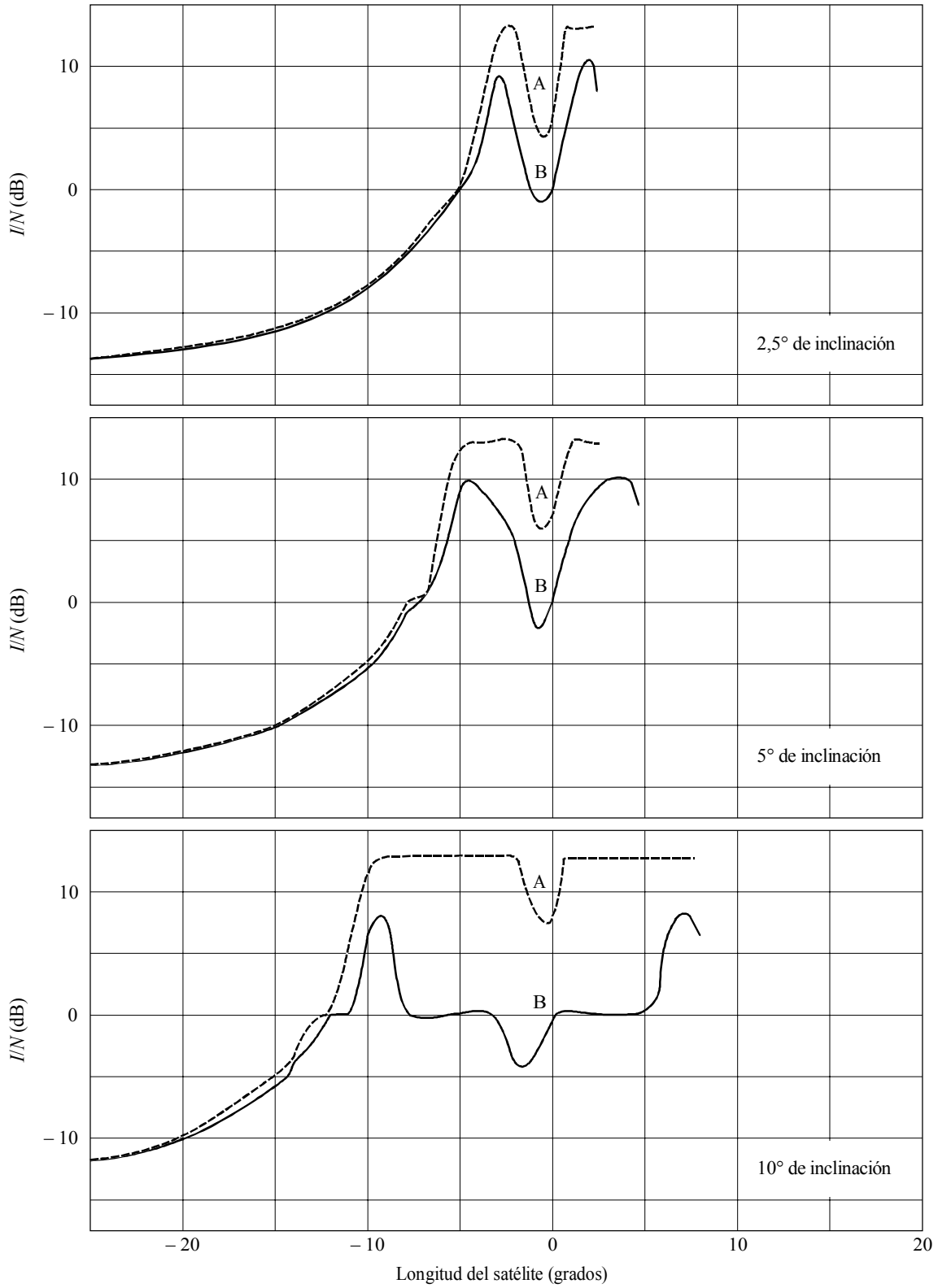
Las Figs. 7c y 7d representan la interferencia causada a una estación de radioenlace a una latitud de 60° para los casos de 4 GHz y 11 GHz, respectivamente.

Las curvas del valor más desfavorable presentan sus valores más elevados para una gama de longitudes de satélite más amplia que la de la estación a 40° de latitud, pero la tendencia general es similar a la indicada en las Figs. 7a y 7b; es decir, el valor del 10% es inferior al valor más desfavorable y si se considera únicamente el valor del 10% el efecto de la interferencia no es tan significativo.

FIGURA 7a

Relación  $I/N$  en una estación de radioenlace a 40° de latitud (4 GHz)

Longitud del satélite respecto a la intersección horizonte/órbita (78,6°)



Curva A: Valor más desfavorable

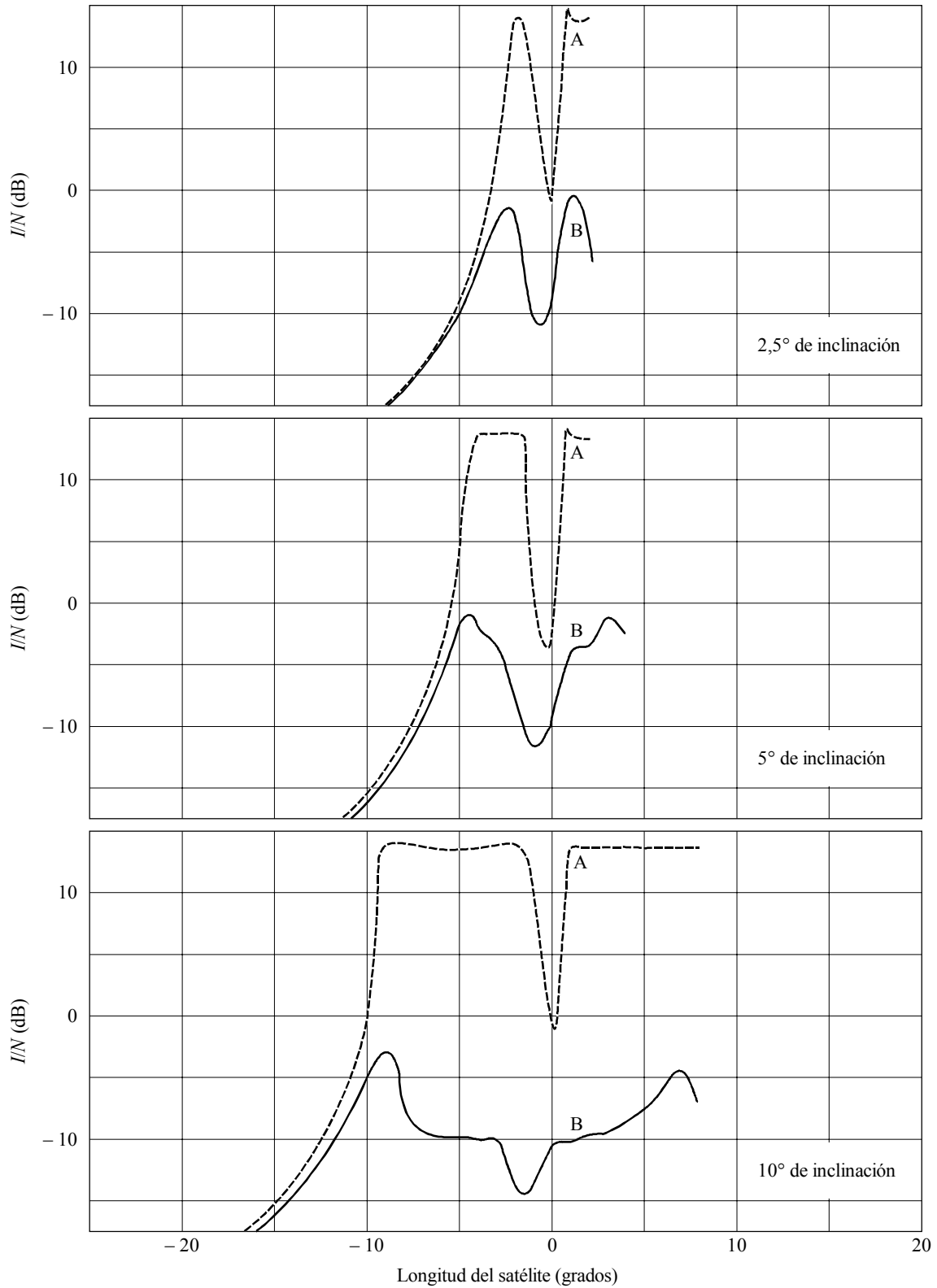
Curva B: Valor del 10% definido en el § 2.3.5.3.1



FIGURA 7b

Relación  $I/N$  en una estación de radioenlace a 40° de latitud (11 GHz)

Longitud del satélite respecto a la intercepción horizonte/órbita (78,6°)



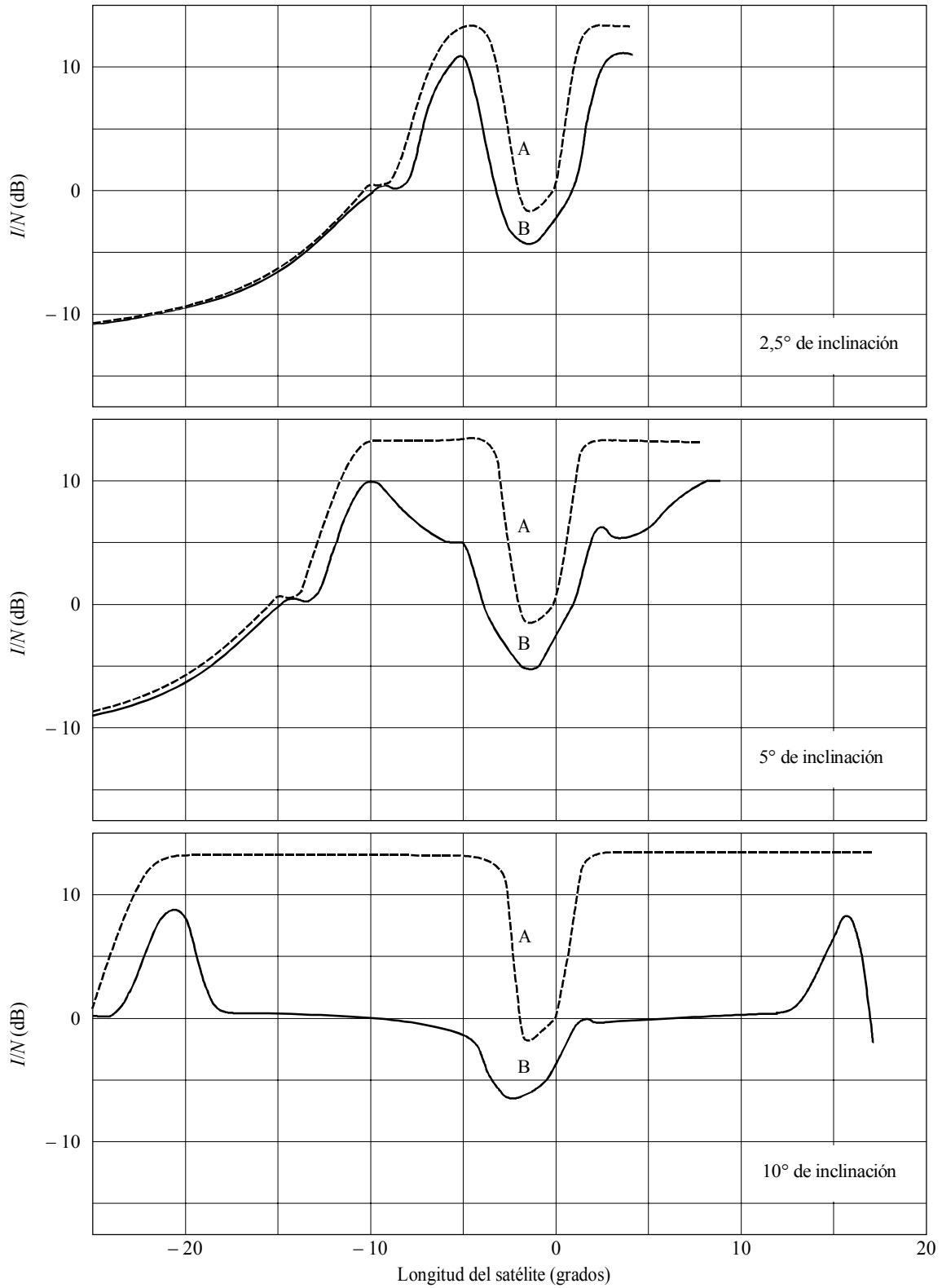
Curva A: Valor más desfavorable

Curva B: Valor del 10% definido en el § 2.3.5.3.1

FIGURA 7c

Relación  $I/N$  en una estación de radioenlace a  $60^\circ$  de latitud (4 GHz)

Longitud del satélite respecto a la intercepción horizonte/órbita ( $72,4^\circ$ )



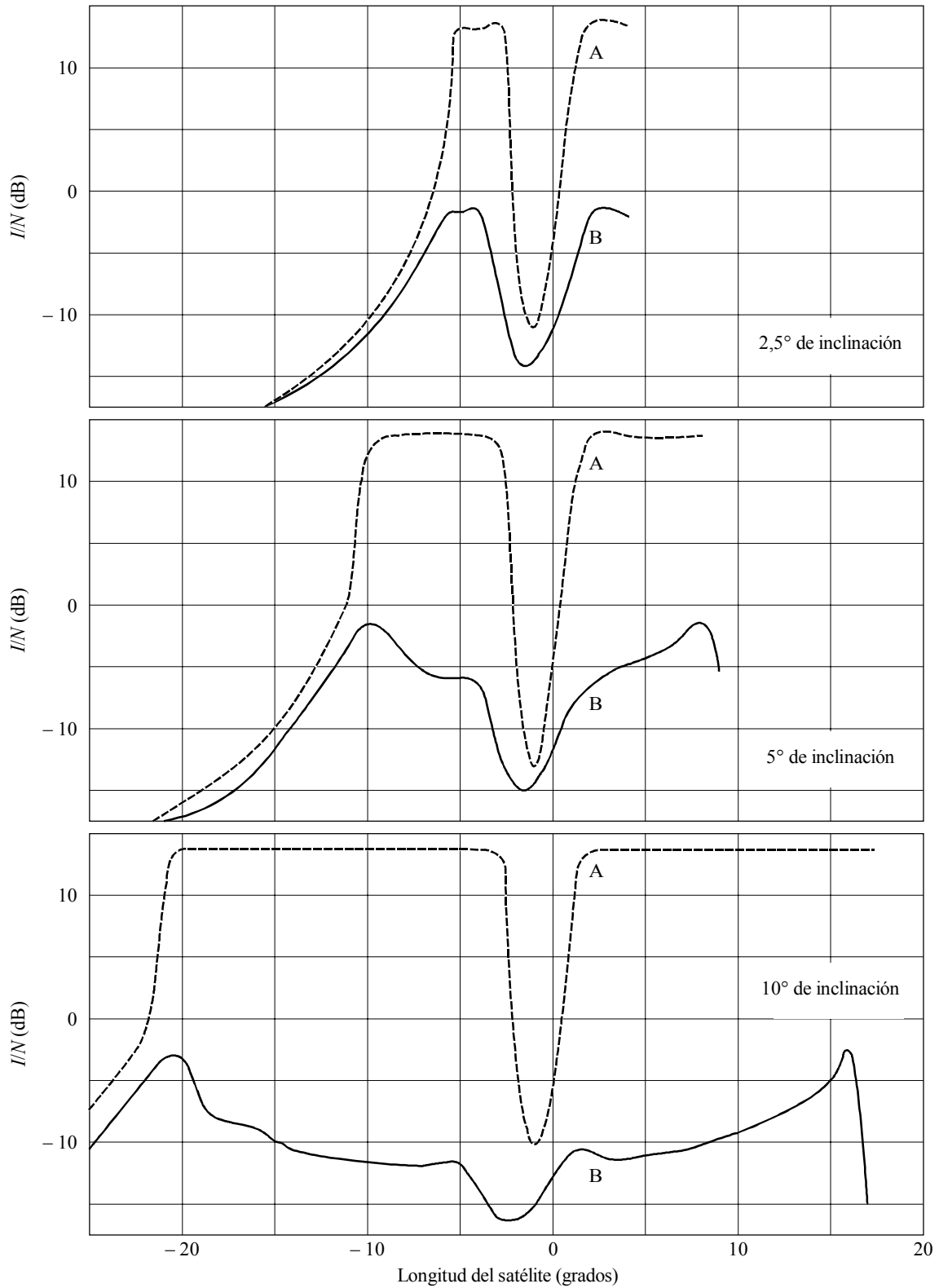
Curva A: Valor más desfavorable

Curva B: Valor del 10% definido en el § 2.3.5.3.1

FIGURA 7d

Relación  $I/N$  en una estación de radioenlace a 60° de latitud (11 GHz)

Longitud del satélite respecto a la intercepción horizonte/órbita (72,4°)

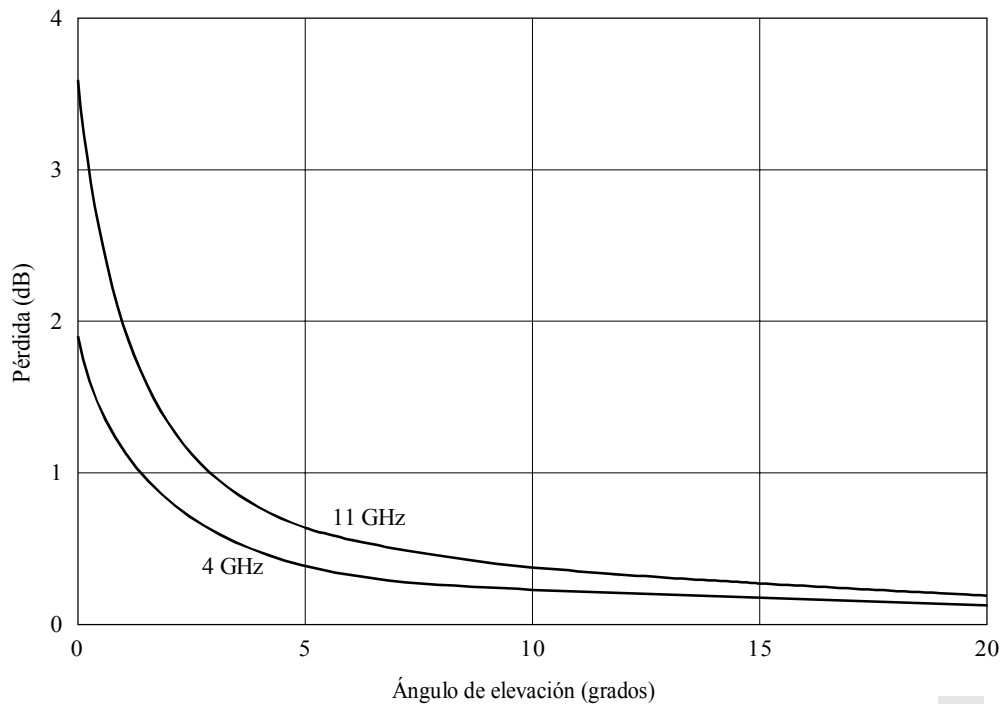


Curva A: Valor más desfavorable

Curva B: Valor del 10% definido en el § 2.3.5.3.1

FIGURA 8

## Pérdidas por absorción atmosférica



D14

### 2.3.5.4 Efectos de algunos factores

#### 2.3.5.4.1 Diversidad de espacio

Si en la estación del radioenlace se utiliza recepción por diversidad de espacio, los valores más desfavorables de la relación  $I/N$  aumentarán en unos 3 dB. Sin embargo, debido a la gran directividad en el plano vertical introducida por este tipo de diversidad, no se produce un aumento significativo en los términos de los valores del 10% de la relación  $I/N$ .

#### 2.3.5.4.2 Ganancia de antena

Si se utiliza una antena de mayor diámetro en la estación del radioenlace los valores más desfavorables de  $I/N$  aumentarán. Por ejemplo, en el caso de una antena de 4 m de diámetro a 4 GHz, estos valores se incrementarán en unos 2,5 dB con respecto a los mismos valores obtenidos con una antena de 3 m de diámetro. No obstante, la anchura del haz principal de una antena con mayor diámetro es más estrecha. De hecho, la ganancia (en el haz principal) de la antena de 4 m de diámetro es inferior que la de la antena de 3 m de diámetro para ángulos por encima de  $0,9^\circ$ . De alguna forma esto compensa el efecto del aumento de la máxima ganancia de antena. Por consiguiente, el aumento de los valores del 10% presenta un valor medio inferior a 1 dB.

#### 2.3.5.4.3 Pérdidas en el alimentador

En algunos casos las pérdidas en el alimentador de la estación del radioenlace pueden alcanzar un valor tan bajo como 0,5 dB. Ello haría aumentar en 2,5 dB todos los valores de la relación  $I/N$  indicados en el § 2.3.5.3.

## 2.4 Interferencia causada por estaciones terrenales a estaciones espaciales

### 2.4.1 Introducción

El análisis del riesgo de interferencia cuando ésta es causada a estaciones espaciales se basa en un cálculo de probabilidades, pues no se dispone de datos específicos sobre las ubicaciones y otros parámetros de las estaciones de radioenlaces. La evaluación del mayor riesgo que plantea la utilización de satélites en órbita inclinada se basa en el cálculo de la probabilidad en el caso de la OSG, seguido de la aplicación del mismo modelo para determinar el riesgo relativo en el caso de la órbita inclinada. En esta última situación, se escogió una inclinación de  $5^\circ$  como representativa de un valor razonable para el análisis. Valores de inclinación más bajos producirían una estimación proporcionalmente menor de interferencia potencial, mientras que valores más altos darían lugar a una estimación más alta.

### 2.4.2 El modelo

Las estaciones de radioenlaces que pueden tener haces principales que intersecten la OSG, se limitan a aquellas con un acimut de radiación particular en una latitud específica, y hay cuatro de esos puntos por cada ubicación de satélite en la OSG, o sea, en las latitudes Norte y Sur, así como al Este y al Oeste de la posición en la OSG.

Asignando un margen para la anchura del haz de la antena del radioenlace y su ángulo de elevación, y teniendo en cuenta los efectos de la refracción, se establece una pequeña franja similar a la de la Fig. 2a, que contiene todas las estaciones que podrían intersectar la OSG o la órbita inclinada de un satélite en un momento determinado. La anchura de esta franja es función de los valores supuestos para los parámetros del modelo.

Los parámetros aquí adoptados para el modelo son los ángulos de elevación de  $-1^\circ$  a  $4^\circ$  para la antena de un sistema de radioenlaces, y una gama de refractividad de 250 a 400 para las señales radioeléctricas. Este último factor añade  $2^\circ$  a la gama efectiva de visibilidad en el borde exterior de la franja. También se supone que el centro del haz está a  $1,5^\circ$  de la órbita en estudio, a fin de proporcionar cierto margen para tener en cuenta la anchura del haz.

### 2.4.3 Caso de la OSG

Con los parámetros supuestos, la anchura de la franja en el caso de la OSG es de unos  $7^\circ$ . El número de estaciones ubicadas dentro de esta franja depende de su área y de una densidad supuesta para las estaciones terrenales. Sólo se necesita calcular el área de un cuadrante desde el ecuador hasta  $70^\circ$  de latitud y, por simetría, esta área se aplica a todos los cuadrantes. La intersección con un punto específico en la OSG puede ocurrir desde los cuatro cuadrantes.

El área de la franja de  $7^\circ$  (775 km) de un cuadrante es de 7 875 000 km<sup>2</sup>.

### 2.4.4 Caso de una órbita inclinada

La anchura de la franja no cambia con la inclinación a latitudes bajas, pero sí aumenta conforme a la latitud, dependiendo de la inclinación. En el caso de una inclinación de  $5^\circ$ , el área de la franja en un cuadrante es de 13 230 000 km<sup>2</sup>, por lo que se espera que el número de estaciones sería 1,68 veces el de las existentes en el caso de la OSG.

Esto variará directamente con la inclinación, y el resultado puede considerarse como representativo de los efectos de la órbita inclinada.

### 2.4.5 Evaluación cuantitativa

Se pueden hacer estimaciones del número de intersecciones posibles, suponiendo una densidad máxima de estaciones de radioenlaces para toda la zona terrestre contenida en la franja cuya población es suficiente para justificar esa suposición. La densidad máxima de una estación por 2 500 km<sup>2</sup> permite instalar una estación cada 50 km en todas las direcciones. Esto corresponde a la distancia normal de un solo salto que emplean los diseñadores de radioenlaces.

Además, teniendo en cuenta la densidad demográfica y los efectos de las regiones oceánicas, se supone que el área de interés ocuparía alrededor del 20% del total. Se da por supuesto un apuntamiento aleatorio de la antena del sistema de radioenlaces, con una anchura del haz de  $2^\circ$ , lo que, aplicado al caso de la OSG, daría un total de alrededor de 14 estaciones que pudieran intersectarla, mientras que en el caso de la órbita inclinada serían unas 24.

### 2.4.6 Consideraciones prácticas

Este modelo contiene varias suposiciones que son muy conservadoras, como son:

- ángulos de elevación de los radioenlaces de  $-1^\circ$  a  $4^\circ$ ,
- utilización de una densidad uniforme de estaciones de radioenlaces,
- gama uniforme de  $2^\circ$  del ángulo de elevación, considerada representativa,
- valor de la refractividad nominal normalizado de 300.

En este modelo pueden introducirse ajustes, cuyo efecto neto es reducir el área de interés al 42% del modelo original en el caso de la OSG, y al 64% en el de la operación en órbita inclinada. El número de posibles exposiciones disminuye a unas 6 en el primero, y a 15 en el segundo.

### 2.4.7 Experiencia

Un estudio de los satélites INTELSAT situados en la OSG que sufren interferencia de estaciones terrenales de radioenlaces ha demostrado que sus efectos han sido de poca importancia. En realidad, sólo se ha registrado un caso en los últimos 10 años.

### 3 Interferencia estación terrena/estación terrenal

#### 3.1 Introducción

La ausencia o cese del mantenimiento en posición Norte-Sur de un satélite geoestacionario hará que éste modifique continuamente su inclinación orbital. Es posible que una estación terrena que funcione con ese satélite tenga que seguirlo con el haz principal de su antena a través de una trayectoria diurna aparente (en forma de ocho alargado). Cuando dicha estación terrena ha sido coordinada con estaciones de servicios terrenales para explotación «estrictamente» geoestacionaria (movimiento de satélites dentro de pequeñas tolerancias de posición prescritas o establecidas), la necesidad de seguir un satélite que tenga o adquiriera una inclinación orbital importante hará que el haz principal de la antena de la estación terrena adopte unos ángulos de elevación  $\epsilon_s$  y, asociados con ellos, unos ángulos de acimut diferentes (ambos mayores y menores respectivamente) a aquellos para los que se efectuó la coordinación. Merece una especial atención el caso en que los ángulos de elevación son inferiores a los necesarios para la explotación geoestacionaria porque en este caso, la ganancia en la dirección del horizonte de la antena de estación terrena puede provocar interferencia desde y hacia una estación terrenal.

#### 3.2 Consideraciones geométricas

##### 3.2.1 Expresiones analíticas

El ángulo de elevación ( $\epsilon_s$ ) y el acimut ( $\alpha_s$ ) del haz principal de una estación terrena en la dirección de la estación espacial en órbita geoestacionaria inclinada en el punto de máxima desviación, vienen dados por las siguientes expresiones:

$$\epsilon_s = \arcsin((KA - 1,0)/B) \quad (10)$$

$$\alpha_s = 90,0 + \arccos(K \cos i \cdot \sin \delta / B \cdot \cos \epsilon_s) \quad (11)$$

$$A = \cos i \cos \zeta \cos \delta + \sin i \sin \zeta \quad (12)$$

$$B = (1,0 + K^2 - 2KA)^{0,5} \quad (13)$$

téngase en cuenta que  $\arccos(-x) = 180,0 - \arccos(x)$

donde:

- $K$ : relación entre el radio de la órbita de satélites geoestacionarios y el radio de la Tierra, que se supone igual a 6,62
- $i$ : inclinación de la órbita (nodo ascendente positivo al Este de Greenwich)
- $\zeta$ : latitud de la estación terrena (positivo Norte)
- $\delta$ : diferencia de longitudes entre la estación espacial y la estación terrena.

##### 3.2.2 Pérdida de discriminación

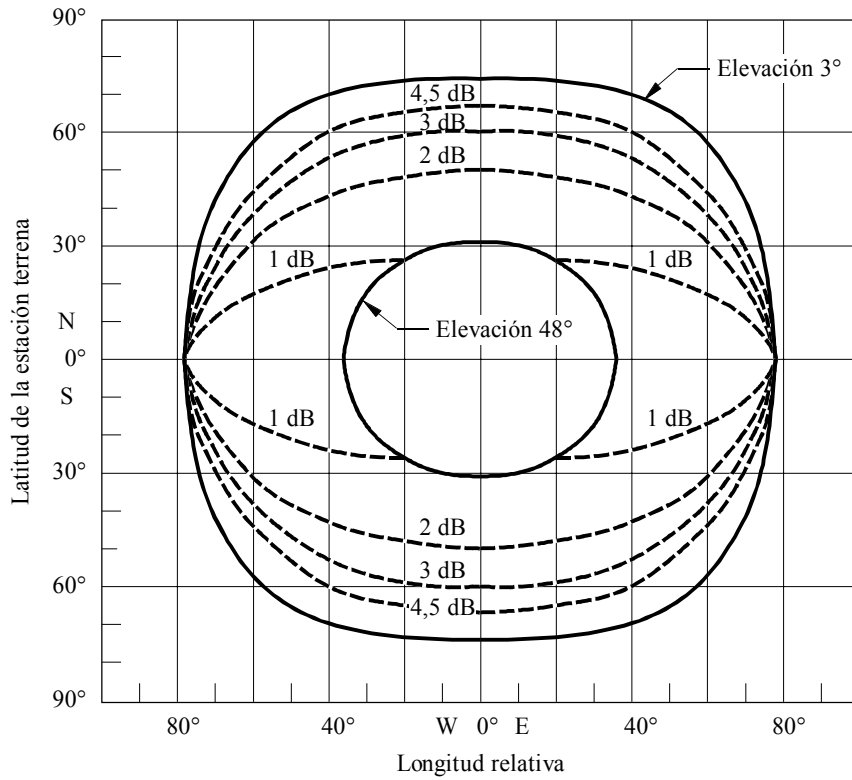
A medida que el satélite pasa a una órbita inclinada, el ángulo de elevación y el acimut varían con el tiempo. Esto puede dar lugar a variaciones de ganancia en dirección al horizonte, como se trata en los puntos que siguen.

Tanto la reducción del ángulo de elevación como el correspondiente desplazamiento de acimut son función no sólo de la inclinación orbital del satélite sometido a seguimiento, sino también de la latitud y longitud relativa (diferencia de longitud con respecto al punto nodal subsatelital) de la estación terrena en cuestión, tal como se muestra en las Figs. 9a, 9b, 9c y 9d para inclinaciones orbitales de 5° y 10° respectivamente.

En las Figs. 9a, 9b, 9c y 9d la circunferencia exterior describe los puntos de la superficie de la Tierra (en términos de latitud y longitud con respecto al punto nodal subsatelital) en los que el ángulo de elevación del haz principal de antena de la estación terrena con respecto al satélite de órbita inclinada no es nunca inferior a 3°. La zona interior, de forma almendrada contiene aquella parte de la superficie de la Tierra en la que el ángulo de elevación no es nunca inferior a 48° y, de este modo, no está sujeta a variaciones de ganancia en la dirección del horizonte de la antena (en la hipótesis de que, más allá de un ángulo de 48° fuera del eje del haz, no se produce un cambio apreciable de la ganancia de antena).

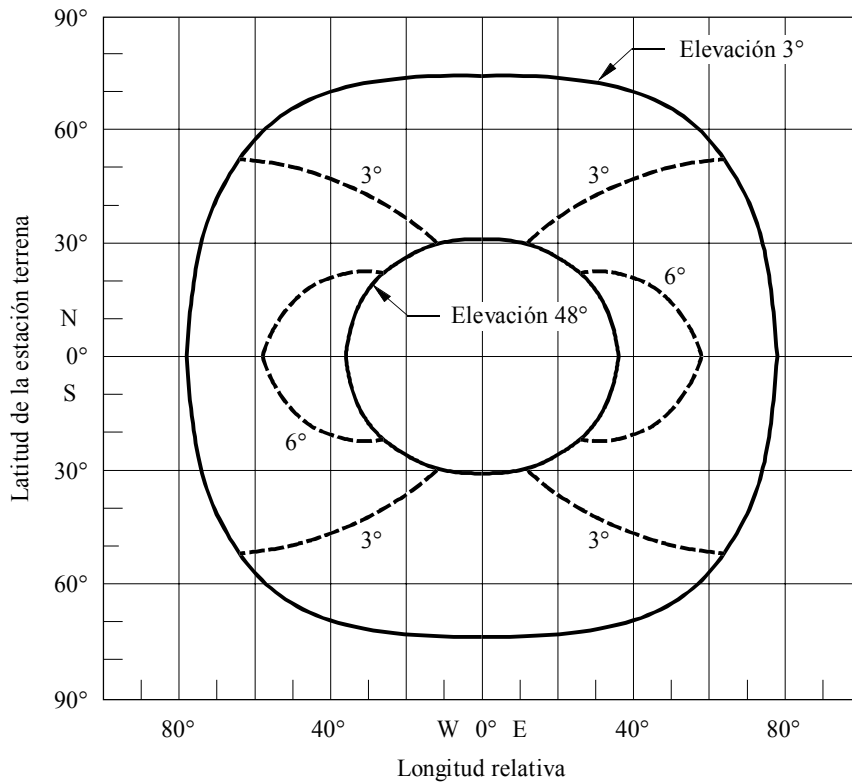
FIGURA 9a

Incremento de la ganancia de la antena de la estación terrena en la dirección del horizonte y desplazamiento del acimut del haz principal (inclinación 5°)



----- Incremento de la ganancia de la antena en la dirección del horizonte D15

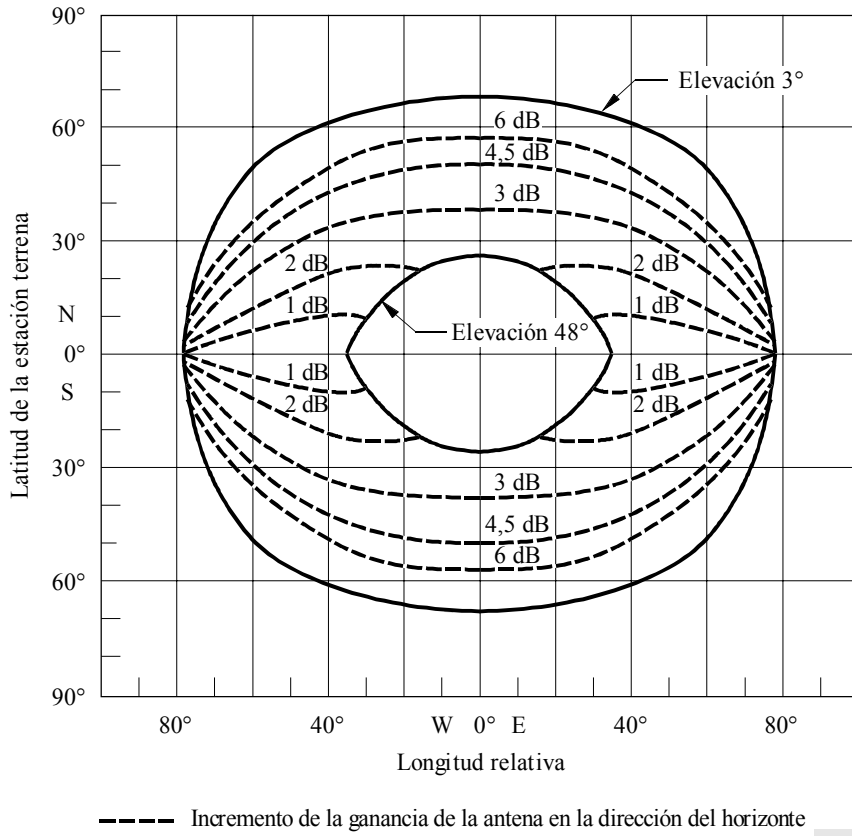
FIGURA 9b



----- Desplazamiento del acimut del haz D16

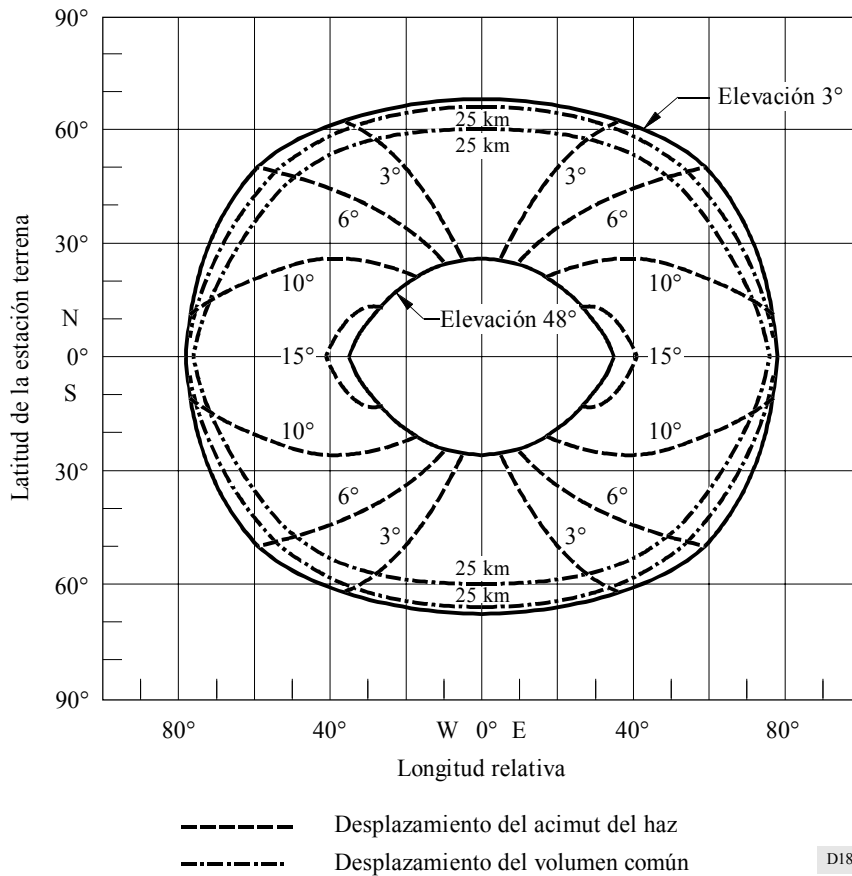
FIGURA 9c

Incremento de la ganancia de la antena de la estación terrena en la dirección del horizonte y desplazamiento del acimut del haz principal (inclinación 10°)



D17

FIGURA 9d



D18



En el diagrama superior de cada figura, las líneas de trazos indican el valor del incremento de la ganancia en la dirección del horizonte de la antena de la estación terrena (dB) sobre la base de un diagrama de antena del tipo  $A - 25 \log \theta$  dB. En el diagrama inferior, las líneas de trazos muestran, para las correspondientes localizaciones de estaciones terrenas, el desplazamiento del acimut del haz principal de la antena de la estación terrena desde el correspondiente a una explotación estrictamente geoestacionaria hasta aquel en el que el satélite se ve bajo el ángulo de elevación más bajo en su órbita inclinada. El desplazamiento del acimut se produce siempre hacia el ecuador. Las estaciones terrenas en la longitud del nodo de satélite tienen los mayores incrementos de ganancia en la dirección del horizonte de la antena, y los menores desplazamientos de acimut; las estaciones terrenas próximas al ecuador tienen los menores incrementos de ganancia en la dirección del horizonte de la antena y los mayores desplazamientos de acimut. Cuanto mayor sea la inclinación, mayores son los incrementos de ganancia y los desplazamientos.

El diagrama inferior de la Fig. 9d muestra, como un conjunto adicional de curvas, el desplazamiento lateral de un «volumen común» a 4 km de altitud. Esa es la mayor altitud a la que cabe esperar que se produzcan interferencias por dispersión debida a la lluvia.

### 3.3 Efecto sobre la zona de coordinación de las estaciones terrenas

Debido a la variación del acimut y del ángulo de elevación, las estaciones terrenas que fueron coordinadas previamente con sistemas terrenales sobre la base de que trabajarían con un satélite emplazado en la órbita geoestacionaria, pueden ser afectadas por el uso de órbitas inclinadas. Pueden ser afectadas también otras estaciones terrenales. Los nuevos contornos de coordinación serían entonces una función de la ubicación o ubicaciones en la órbita geoestacionaria y del arco para los cuales fueron calculados. Se presentará una gran variedad de situaciones que afectarán a muchas estaciones terrenas del mundo.

Se ha examinado una serie de condiciones límite que quizás ayuden a determinar el problema que podría surgir al volver a coordinar estas estaciones terrenas cuando fuese necesario.

#### 3.3.1 Efecto del emplazamiento de la estación terrena

Las estaciones terrenas que pueden trabajar con satélites en órbitas con una inclinación de  $5^\circ$  están limitadas a aquellas con ángulos de elevación de  $5^\circ$  a  $10^\circ$  en la ubicación nominal en la órbita geoestacionaria, dependiendo de la latitud de la estación terrena. En este caso, la dimensión más grande del contorno de coordinación se basa en una ganancia de antena de 7 a 14,5 dB en el plano horizontal. En una estación receptora, esta ganancia fija la sensibilidad a la interferencia y en una estación transmisora, fija la densidad de la p.i.r.e. en el plano horizontal.

En el caso de una estación terrena en el ecuador con un ángulo de elevación bajo, el movimiento en acimut de la antena es aproximadamente el doble del ángulo de inclinación. Sin embargo, en este caso el ángulo de elevación cambia muy poco.

Cuando una estación terrena funcione con un ángulo de elevación nominal de  $5^\circ$ , el aumento en la gama de direcciones acimutales afectadas de  $\pm 50^\circ$  para el caso de una inclinación de  $5^\circ$  oscila entre 0 y 4,9 dB. El efecto en la zona de coordinación de una estación terrena que hubiera sido coordinada a  $5^\circ$  en 6 GHz, usando la densidad máxima de p.i.r.e. permitida de 40 dB(W/4 kHz), es un ensanchamiento del contorno alrededor de la región del haz principal, sin cambios en el acimut nominal.

En el caso de estaciones terrenas situadas en una latitud elevada, el acimut cambia muy poco, mientras que la gama de ángulos de elevación será aproximadamente el doble de la de ángulos de inclinación. Por consiguiente, la operación en órbita inclinada estaría limitada a las estaciones terrenas con una elevación nominal de  $10^\circ$  hacia la órbita geoestacionaria. Esto podría significar el tener que bajar hasta  $5^\circ$  durante una parte del tiempo de seguimiento, y produciría un aumento de ganancia de 7,5 dB en ese acimut, que produce un aumento principalmente a lo largo del acimut del haz principal.

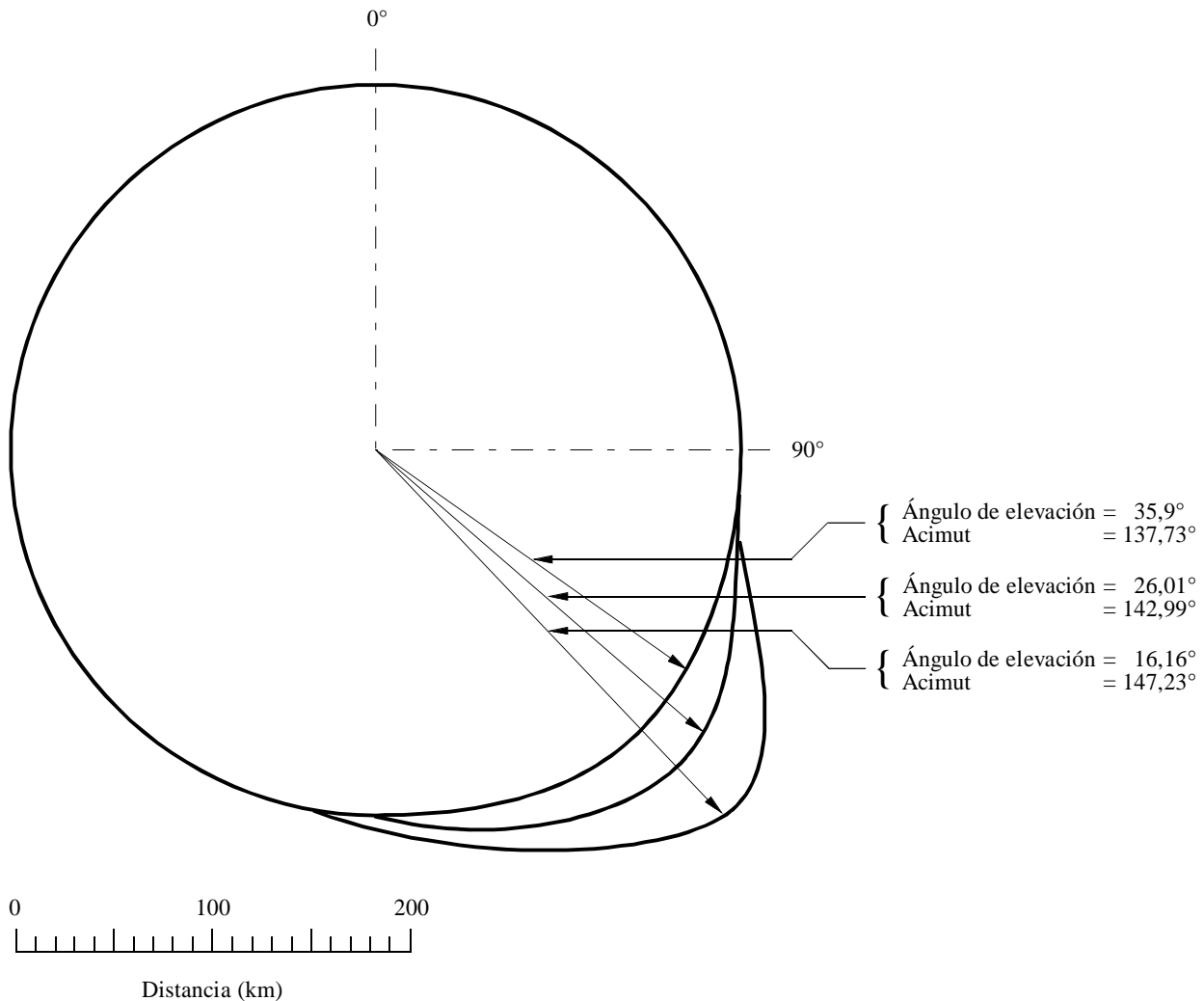
Existen ubicaciones en las que los ángulos tanto de acimut como de elevación cambian casi lo mismo, pero este cambio es inferior al producido en cualquiera de los dos casos anteriores. En esta situación, habrá menos cambios de ganancia que en los casos extremos, y la zona de coordinación en todos los casos cambiará más en la región del haz principal de la estación terrena. La Fig. 10 ofrece una representación de dicho caso.

#### 3.3.2 Cambio en las distancias de coordinación

Los efectos sobre las distancias de coordinación se deben a los cambios en el ángulo de elevación. Para ángulos de elevación nominales de  $15^\circ$  a  $20^\circ$ , el cambio de ganancia tendría un valor máximo de unos 4,4 dB. A ángulos mayores de  $20^\circ$ , un cambio angular de  $5^\circ$  respecto del valor nominal producirá un aumento máximo de ganancia de 3 dB en el plano horizontal. Para ángulos de elevación nominales mayores de  $53^\circ$  no habrá ningún cambio de ganancia.

FIGURA 10

Modo 1, Zona A – Zona de coordinación de una estación terrena transmitiendo en 6 GHz en una órbita inclinada de  $10^\circ$



Latitud de la estación terrena =  $50^\circ$  N  
 Longitud  $\Delta = 30^\circ$

D19

En la Fig. 11 se presentan los resultados de un estudio sobre modificación de la máxima distancia de coordinación en Modo 1 (propagación por círculo máximo) en función de las diferencias de latitud y longitud de la estación terrena, cuando se compara con un contorno de coordinación de estación terrena típica funcionando a 6 GHz. Se ha supuesto una potencia en el transmisor de 20 dBW y una dispersión de energía de 2 MHz. El aumento de la máxima distancia de coordinación es del orden de 10-20% para ángulos de elevación de la antena nominales comprendidos entre  $10^\circ$  y  $20^\circ$  y un pequeño porcentaje para ángulos de elevación mayores. La modificación en el porcentaje no depende de la zona de propagación considerada (zonas A, B y C).

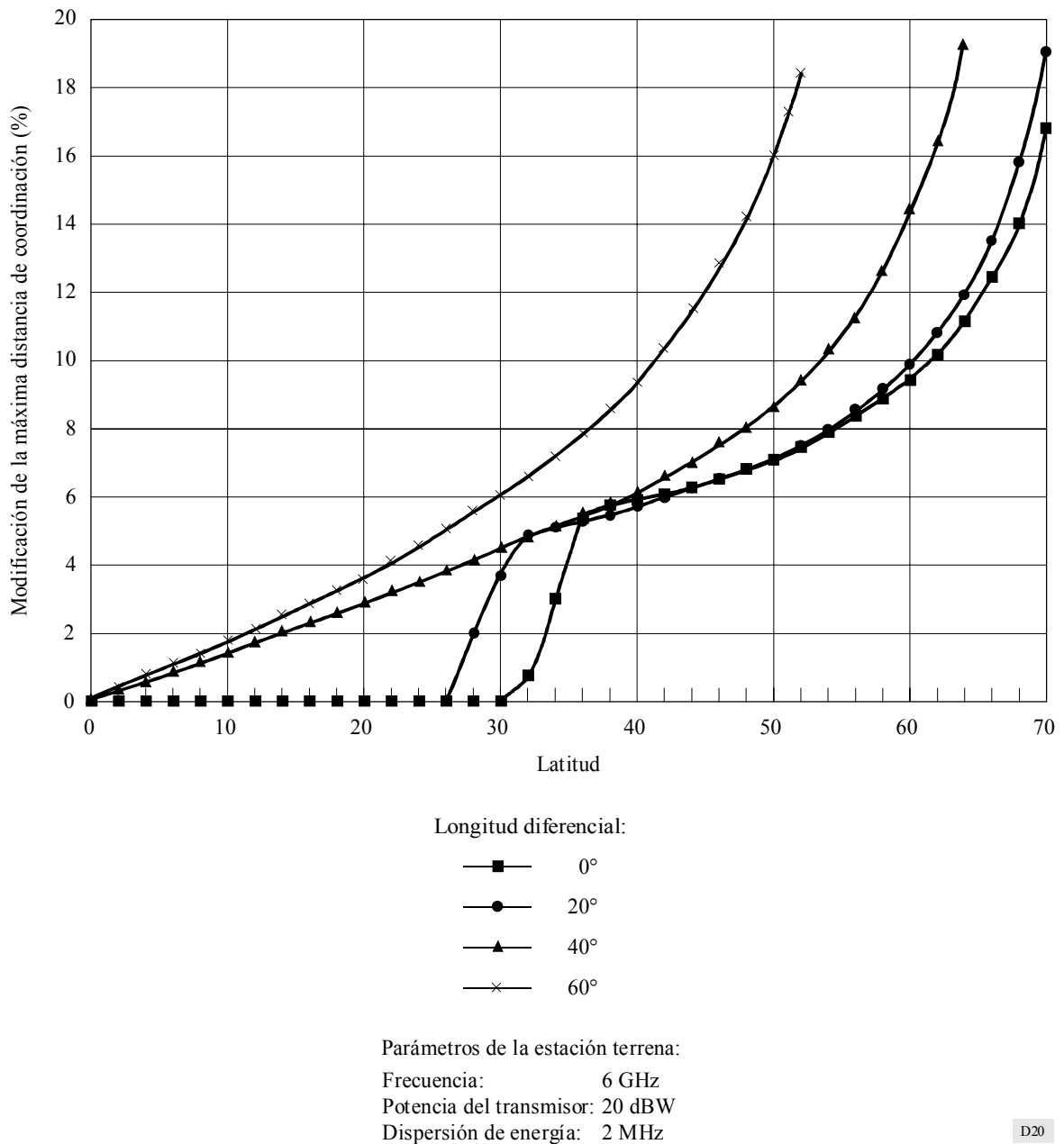
Las modificaciones para la propagación en Modo 2 (dispersión debida a hidrometeoros) son reducidas y, en la mayoría de los casos inferiores al 6%.

### 3.4 Interferencia causada a receptores del servicio fijo por estaciones terrenas

Se ha realizado un estudio estocástico para evaluar la repercusión de las operaciones en órbita inclinada en las estaciones terrenas, en el cual se utilizaban estaciones terrenas con latitudes de  $41^\circ$  N y limitadas de forma que su ángulo de elevación fuese el máximo local hacia la órbita inclinada. Los resultados para una inclinación orbital de  $15^\circ$  fueron un aumento de 4,5 dB para el 23% de los receptores terrenales durante por lo menos el 10% del tiempo (2,4 h diarias), mientras que con  $5^\circ$  de inclinación, el 38% de los receptores experimentaría un aumento de la interferencia de 1,5 dB durante el 10% del tiempo. El aumento previsto de la interferencia será menor cuanto mayores sean los ángulos de

elevación, o en los acimutes del receptor terrenal que tienden a apartarse de la órbita de los satélites geoestacionarios, más que a la distribución uniforme que se ha supuesto. Sin embargo, para mayores latitudes con ángulos de elevación más pequeños, la interferencia esperada será mayor.

FIGURA 11  
**Modificación de la máxima distancia de coordinación (%) cuando se compara con la distancia de coordinación de una estación terrena típica**  
 Inclinación de 5°; Zona A; frecuencia = 6 GHz



D20

### 3.5 Resumen

Los países próximos al Ecuador no necesitarán, por lo general, volver a coordinar sus estaciones terrenas cuando éstas funcionen con un satélite de órbita inclinada. Incluso cuando sus longitudes relativas no se hallen dentro de la zona en forma de almendra en la que el ángulo de elevación es superior a 48°, sólo se producirá un ligero incremento de la ganancia de la antena en la dirección del horizonte, que normalmente puede ignorarse.

Los países que se hallan en latitudes más elevadas se ven afectados de manera creciente y pueden tener, en algunos casos, dificultades para coordinar y especialmente para recoordinar sus estaciones terrenas de modo que funcionen con mayores inclinaciones de órbita de sus satélites. No obstante, en todos los casos es posible llegar a una especie de transacción entre la aceptación de mayores dificultades en la coordinación de las estaciones terrenas y un mayor grado de explotación con órbita inclinada.

#### 4 Conclusiones

En el presente Anexo se ha examinado la situación de compartición entre los servicios fijo y fijo por satélite cuando los satélites se trasladan a una órbita inclinada. La repercusión en las redes terrenales se debe a las estaciones espaciales y terrenas. Análogamente, las redes de satélite también serán afectadas por la interferencia causada a las estaciones espaciales y terrenas.

La situación de compartición cuando los satélites se trasladan a una órbita ligeramente inclinada es compleja. Durante un breve periodo, supone una mayor exposición de los receptores del servicio fijo a la interferencia directa de los satélites y viceversa. El número de estaciones terrenales expuestas a la interferencia aumenta con la magnitud de la inclinación.

Se ha estudiado en este Anexo el efecto de dicha exposición sobre la indisponibilidad de los sistemas, así como en la interferencia total recibida. Se ha desarrollado un modelo que indica que, con las hipótesis de ese modelo, podría esperarse un aumento de indisponibilidad de un orden de magnitud. Estas hipótesis son: un sistema con control de potencia adaptativo, todos los satélites en una órbita inclinada de  $10^\circ$  utilizando una densidad de flujo de potencia de  $-124 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$  y satélites separados  $3^\circ$ . Sin embargo, se señala que, con la tendencia hacia la utilización de pequeñas antenas de estación terrena, es dudoso que los operadores de satélite utilicen un gran ángulo de elevación. Otros modelos basados en una evaluación de la distribución de los haces, a partir de una red real de radioenlaces, indican que la interferencia total extremo a extremo puede en algunos casos reducirse, dependiendo del factor de exposición a la interferencia.

En otro modelo, el cálculo de la interferencia combinada sobre un circuito ficticio de referencia, revela que la interferencia no aumenta, sino que se redistribuye sobre la longitud de la red.

Se necesitan más estudios sobre los modelos que han de utilizarse para los cálculos de interferencia. Se requiere información adicional sobre la distribución de los haces terrenales alrededor de la órbita.

Son necesarios más estudios que ayuden a la elaboración de técnicas para que ambos servicios mejoren la situación de interferencia, particularmente con ángulos de inclinación pequeños. Entre estos estudios se hallan técnicas tales como los métodos de utilizar control de potencia automático, canceladores de interferencia, utilizar límites de dfp de banda ancha, restricciones de puntería de las antenas de satélite, límites de la inclinación, procedimientos de coordinación, apantallamiento del emplazamiento y otras.

Respecto al efecto en la zona de coordinación entre las estaciones terrenas y las estaciones espaciales, la repercusión varía con el ángulo de elevación, el acimut y la longitud de la estación terrena. Los aumentos resultantes de las distancias de coordinación varían con el grado de inclinación. Cuando la inclinación del satélite es de  $5^\circ$  y el ángulo de elevación nominal de la estación terrena se encuentra entre  $10^\circ$  y  $20^\circ$ , el incremento de la máxima distancia de coordinación, comparada con el caso en que no se lleva a cabo la operación con órbita inclinada, es del orden del 10% al 20% y para ángulos de elevación más grandes, un pequeño porcentaje.

---