

## RECOMENDACIÓN UIT-R S.1713-1

**Metodología para calcular el mínimo ángulo de separación en la superficie de la Tierra entre un satélite del SFS de tipo HEO no geostacionario en su arco «activo» y un satélite geostacionario**

(Cuestión UIT-R 241/4)

(2005-2007)

**Cometido**

Esta Recomendación describe métodos para calcular el mínimo ángulo de separación en la superficie de la Tierra entre un satélite de órbita terrestre alta (HEO) en su arco «activo» y:

- a) todos los puntos visibles en el arco OSG;
- b) un *determinado* satélite geostacionario.

El primer método (véase el Anexo 3) resulta conveniente para determinar si el sistema HEO cumple los límites de dfpe en las bandas de frecuencias a las que se aplican los límites de dfpe estipulados en el Artículo 22 del Reglamento de Radiocomunicaciones. El segundo método (véase el Anexo 5) sirve para calcular la interferencia entre una *determinada* red OSG y un satélite del SFS de tipo HEO.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

*considerando*

- a) que en la gran mayoría de los diseños de sistemas de satélites de una órbita terrestre alta (HEO) el apogeo para cada satélite se encuentra en el punto de latitud más elevado de su órbita, y que cada satélite transmite únicamente mientras se encuentra dentro del arco «activo» alrededor del apogeo;
- b) que el parámetro fundamental para determinar el caso más desfavorable de interferencia entre un sistema HEO y un sistema de satélites geostacionarios es el mínimo ángulo de separación bajo el cual cualquier estación terrena que funciona con un satélite geostacionario observa un satélite «activo» HEO;
- c) que el ángulo que forman en la superficie de la Tierra un satélite HEO y un punto en la OSG varía con la latitud y longitud del punto sobre la superficie de la Tierra. Por consiguiente, el ángulo de separación visto desde una estación terrena de una red OSG entre el satélite con el que está funcionando y un satélite HEO varía con la latitud y longitud de esa estación terrena;
- d) que la determinación del mínimo ángulo de separación entre un sistema HEO y una red OSG facilitaría una rápida evaluación preliminar sobre la posibilidad de compartición de una banda de frecuencias entre un sistema HEO y los sistemas OSG;
- e) que en las bandas de frecuencias a las que se aplican los límites de dfpe↓ estipulados en el Artículo 22 del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR), incluidos los sistemas HEO, es obligatorio cumplir los límites de dfpe en la superficie de la Tierra, habida cuenta de los enlaces descendentes desde cada punto visible del arco OSG (independientemente de si existe o no un satélite geostacionario en la longitud correspondiente al caso más desfavorable);
- f) que para los sistemas HEO descritos en el *considerando* a) que funcionan en las bandas de frecuencias a las que se aplican los límites de dfpe estipulados en el Artículo 22 del RR, la máxima dfpe corresponde al mínimo ángulo de separación en la superficie de la Tierra entre un satélite HEO en su arco activo y la longitud OSG del caso más desfavorable, y que se produce cuando el satélite

HEO se encuentra al principio o al final de su arco activo (es decir, el punto de menor latitud en el arco activo);

g) que en las bandas de frecuencias a las que no se aplican los límites de dfpe estipulados en el Artículo 22 del RR, la compartición de frecuencias entre un sistema HEO y una determinada red OSG exige, por regla general, calcular el mínimo ángulo de separación en la superficie de la Tierra entre el arco activo del satélite HEO y la ubicación del satélite geoestacionario correspondiente;

h) que para los sistemas HEO descritos en el *considerando a*), el cálculo indicado en el *considerando g*) da como resultado un mínimo ángulo de separación entre la superficie de la Tierra entre un satélite HEO en su arco «activo» y el satélite geoestacionario correspondiente que no se produce necesariamente cuando el satélite HEO se encuentra al principio o al final de su arco «activo»,

*recomienda*

**1** que se utilice la metodología descrita en el Anexo 1 para calcular el ángulo de separación bajo el cual un satélite HEO determinado en su arco activo es «visto» desde una determinada estación terrena que funciona con un satélite geoestacionario determinado, y luego calcular el mínimo ángulo de separación en la superficie de la Tierra habida cuenta de todas las ubicaciones posibles de la estación terrena y todas las longitudes posibles del satélite geoestacionario;

**2** que se utilice el Anexo 2 para determinar el aumento en la temperatura de ruido en el enlace del satélite geoestacionario debido a la interferencia causada por el satélite HEO.

**3** que se utilice la metodología descrita en el Anexo 5 para calcular el mínimo ángulo de separación bajo el cual un determinado satélite HEO en su arco «activo» es «visto» desde una estación terrena dada que funciona con un satélite geoestacionario determinado.

NOTA 1 – El Anexo 3 aplica de manera iterativa las metodologías de los Anexos 1 y 2 para determinar el mínimo ángulo de separación bajo el cual un satélite «activo» de determinado sistema HEO puede ser «visto» por toda estación terrena que funciona con un satélite geoestacionario, y de este modo se calcula el caso más desfavorable de aumento de la temperatura de ruido en el enlace del satélite geoestacionario.

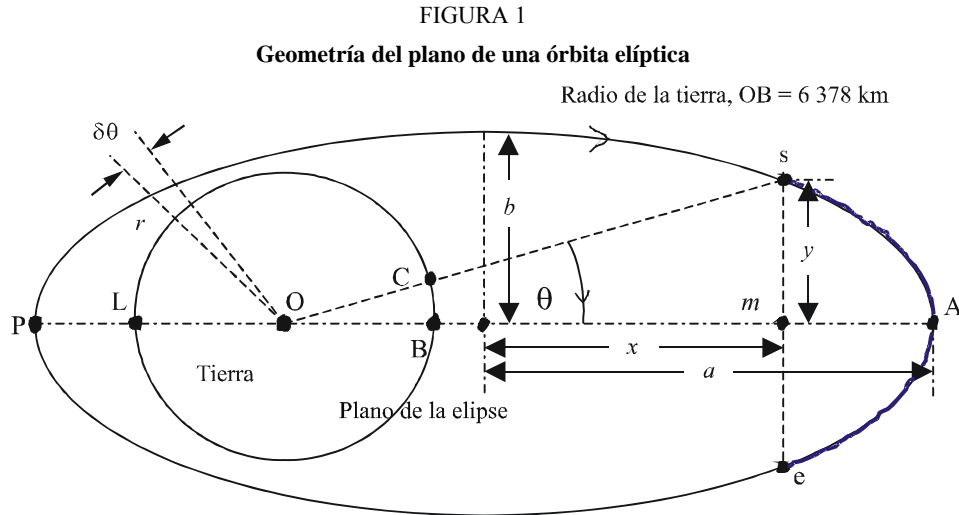
NOTA 2 – En el Anexo 4 se dan ejemplos de aplicación de los Anexos 1 a 3.

NOTA 3 – En el Anexo 6 se dan ejemplos de aplicación del Anexo 5.

## **Anexo 1**

### **Método para calcular el mínimo ángulo subtendido en la superficie de la Tierra entre un satélite HEO que se encuentra en su arco activo y la parte visible de la órbita de los satélites geoestacionarios**

La Fig. 1 representa de forma bidimensional el trayecto recorrido por un satélite en órbita alrededor de la Tierra. En general, se tratará de una órbita elíptica, en la que uno de sus dos focos coincide con el centro de gravedad de la Tierra, O, y el plano de la órbita se encuentra inclinado con respecto al plano del Ecuador de la Tierra. (El satélite geoestacionario es un caso especial en el que la elipse se convierte en un círculo contenido en el plano del Ecuador.)



1713-01

En la mayoría de los sistemas HEO un satélite que recorre ese tipo de órbita transmitirá (y recibirá) únicamente mientras se encuentra en un arco limitado que contiene el apogeo, A y, por consiguiente, causará (o sufrirá) interferencia únicamente mientras se halle dentro de ese arco, que se denomina normalmente arco «activo». La gran mayoría de los sistemas HEO se diseñan de tal manera que el apogeo es el punto de latitud más elevado en la órbita, y en tales casos los máximos niveles de interferencia potencial se producen cuando un satélite se encuentra al inicio o al final de su arco «activo». La longitud del «arco activo» varía de un sistema a otro. En la Fig. 1, el inicio del arco «activo» se indica con una (s) y el final con una (e). Las dinámicas de la órbita son tales que el satélite se desplaza rápidamente en la región del perigeo, P y relativamente despacio en la región del apogeo. (En realidad, el área que barre el vector radial,  $r$  por unidad de tiempo, a saber  $(r^2/2)(\delta\theta/\delta t)$ , es constante en toda la órbita.)

*Paso 1:* En este caso, el primer paso es determinar la longitud Os a partir de las características básicas de la órbita.

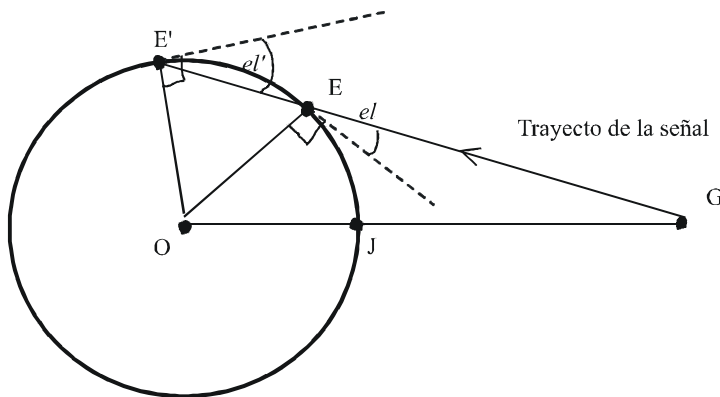
Entre los datos suministrados normalmente al UIT-R relativos al sistema HEO figuran los siguientes: altura del apogeo, AB (km); altura del perigeo, PL (km); excentricidad,  $e$ ; inclinación,  $i$  (grados); anomalía verdadera del inicio (y del final) del arco «activo» (ángulo POs en la Fig. 1, es decir,  $180^\circ - \theta^\circ$ ).

Como una alternativa para las anomalías verdaderas del s y e, a menudo se indican los periodos de tiempo que tarda el satélite en desplazarse desde s hasta el apogeo y desde el apogeo hasta e, por ejemplo,  $\pm 4\text{ h}$ . En tales casos, el valor de  $\theta$  puede deducirse, ya sea mediante una simulación del incremento de tiempo para determinarlo, o mediante la integración basándose en el hecho de que  $(r^2/2)(\delta\theta/\delta t)$  es constante, pero ambas opciones son relativamente complejas. Para los estudios del UIT-R normalmente es más adecuado proporcionar información explícita sobre la anomalía verdadera del s (o e), o el ángulo  $\theta$ , y esto se da por sentado en este caso; sin embargo, la versión electrónica de la hoja de cálculo EXCEL que figura como apéndice a esta Recomendación contiene una rutina de Visual Basic para determinar  $\theta$  a partir del instante antes del apogeo en el que el satélite llega a s (o el instante después del apogeo en el que el satélite llega a e).

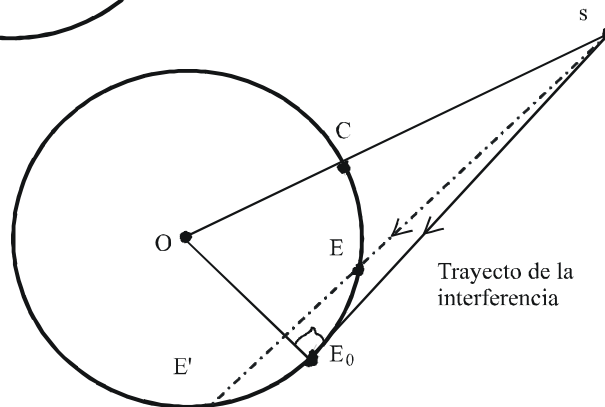
Cabe señalar que la información que se solicita en el Apéndice 4 del RR cuando se presenta a la Oficina de Radiocomunicaciones una notificación para un sistema de satélites no geoestacionarios incluye las alturas del apogeo y el perigeo y la excentricidad, pero actualmente los límites del arco «activo», relativos únicamente a los sistemas de satélites no geoestacionarios del tipo HEO, no figuran entre los datos que deben proporcionarse. Sin embargo, para los sistemas de satélites no geoestacionarios (incluidos implícitamente los sistemas HEO) que tienen previsto usar bandas en las que se aplican los límites de  $dfpe$  descritos en el Artículo 22 del RR, uno de los parámetros exigidos por el Apéndice 4 del RR es la mínima altura sobre la superficie de la Tierra a la que transmite cualquier satélite del sistema. Para un satélite HEO, se trata de la distancia  $sC$  de la Fig. 1.

A partir de la Fig. 1 y utilizando las ecuaciones trigonométricas de la elipse y el plano puede establecerse una ecuación de segundo grado en  $x$  con coeficientes  $AB$ ,  $PL$ ,  $e$  y  $\theta$  y resolver dicha ecuación para  $x$ , calculando así la distancia  $Os$  a partir del triángulo  $Oms$ .

FIGURA 2  
Ejemplos de triángulo plano



Es poco probable que un enlace OSG se diseñe para funcionar con una elevación,  $el$  inferior a  $5^\circ$ , para la cual EG tendría una longitud de 41 124,624 km.  $el'$  puede rebasar los  $5^\circ$ , pero en ese caso E'G superaría claramente esa longitud. Por consiguiente, el requisito para que E sea «visible» desde G es que  $35\,786\text{ km} \leq EG < 41\,124,624\text{ km}$ .



E es visible desde s pero la Tierra impide ver E'.  $E_0$  se encuentra en el contorno en el cual s está a  $0^\circ$  de elevación. Por consiguiente, el triángulo  $OsE_0$  es rectángulo y por lo tanto  $sE_0 = ((Os)^2 - (6\,378)^2)^{0.5}$ . De este modo, el requisito para que E sea visible desde s es  $sE < ((Os)^2 - (6\,378)^2)^{0.5}$ .

1713-02

*Paso 2:* El siguiente paso es determinar la latitud de  $s$  y su longitud relativa con respecto a la longitud del apogeo simultáneo, utilizando la Fig. 3, que se trata de una representación tridimensional de la órbita que emplea los mismos símbolos que los de la Fig. 1, de manera que el valor de  $Os$  se calcula en el Paso 1. Aplicando la regla del coseno esférico a los triángulos esféricos  $OBCD$  y  $CODF$  de la Fig. 3 y aplicando a continuación la regla del seno esférico al triángulo esférico  $ONBC$ , puede deducirse que la longitud de  $s$  con respecto a  $A$  ( $\alpha_C$ ) y su latitud ( $\lambda_C$ ) vienen dadas por:

$$\alpha_C = -\angle FOD = -\text{tg}^{-1}(\text{tg}(\theta) / \cos(i)) \quad \text{y} \quad \lambda_C = \angle FOC = \cos^{-1}(\text{sen}(\theta) / \text{sen}(\alpha_c))$$

FIGURA 3

Coordenadas geográficas del inicio del arco «activo» HEO

A, B, C, L, O, P, s y  $\theta$ , son los mismos parámetros que en la Fig. 1.

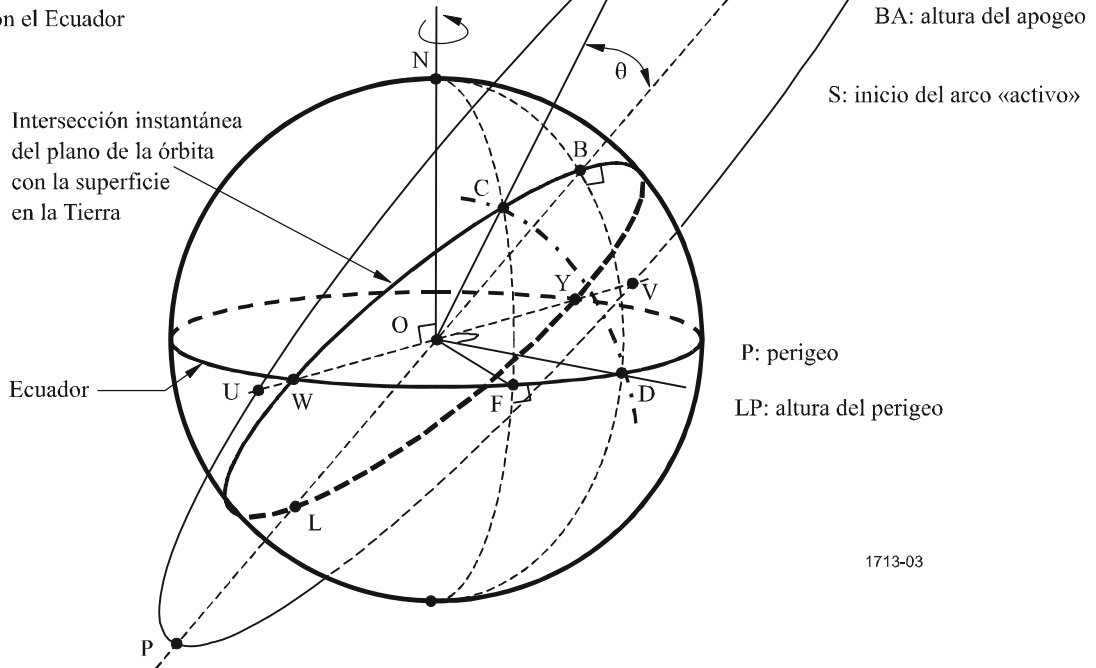
Ángulo BOD: inclinación de la órbita ( $i$ )

U: nodo ascendente

V: nodo descendente

OD: ortogonal a UOV

W e Y: intersecciones de la línea del nodo con el Ecuador



1713-03

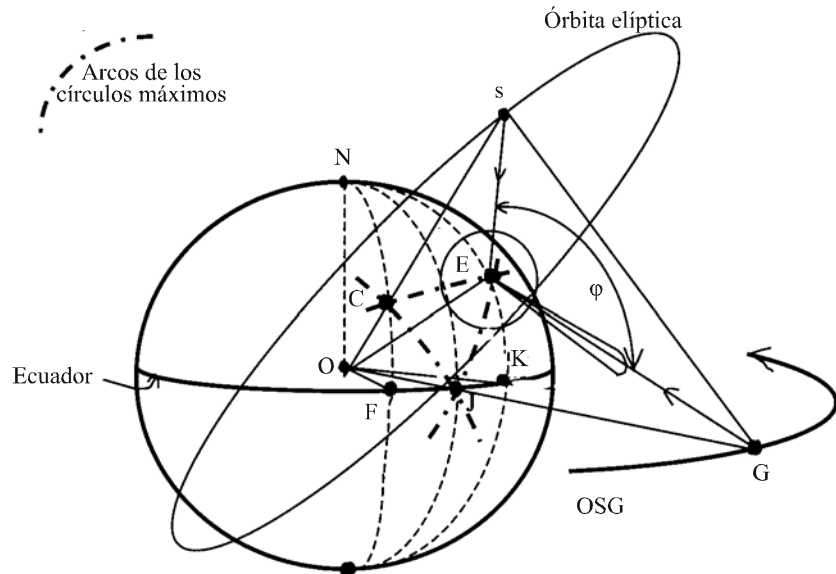
**Paso 3:** Tras determinar la latitud y la longitud relativa instantánea de s, el correspondiente ángulo de separación de interferencia ( $\phi$ ) en cualquier estación terrena, E, que funciona con cualquier satélite geostacionario, G, puede calcularse utilizando la Fig. 4, en la que los puntos C, O, F, N y s son idénticos a los de la Fig. 3. De este modo, en la Fig. 4 la latitud de E es  $\lambda_E$  y su longitud relativa con respecto a la longitud de A es  $\alpha_E$ , y la longitud relativa de G con respecto a la longitud de A es  $\alpha_G$ . Por esta razón, como se conocen o se han calculado los valores de  $\alpha_C$ ,  $\alpha_E$ ,  $\lambda_C$ ,  $\lambda_E$ ,  $\alpha_G$ , OE (radio de la Tierra), OG (radio de la órbita del satélite geostacionario) y Os,

- puede determinarse la distancia sE aplicando la regla del coseno esférico al triángulo esférico ONCE y aplicando a continuación la regla del coseno plano al triángulo plano OsE;
- puede determinarse la distancia sG aplicando la regla del coseno esférico al triángulo esférico OCFJ, y aplicando a continuación la regla del coseno plano al triángulo plano OsG; y
- puede determinarse la distancia EG aplicando la regla del coseno esférico al triángulo esférico OEJK, y aplicando a continuación la regla del coseno plano al triángulo plano OEG.

Por último, en el triángulo plano EsG, dado que se han calculado los tres lados sE, sG y EG, puede obtenerse el ángulo  $\phi$  utilizando la regla del coseno plano.

FIGURA 4

**Geometría de la interferencia causada por un satélite HEO ubicado al inicio del arco «activo» a una estación terrena de la red OSG (es decir, trayecto sE)**



C, F, N, O y s, son los mismos parámetros que en la Fig. 3.

G: satélite geoestacionario

E: estación terrena que recibe de G

1713-04

Por consiguiente, mediante este procedimiento puede calcularse el ángulo de separación de la interferencia,  $\phi$ , para cualquier enlace descendente OSG (es decir, para una estación terrena situada en cualquier posición geográfica que recibe señales de un satélite geoestacionario ubicado en cualquier longitud), si se conocen el ángulo de inclinación HEO, la altura del apogeo, la altura del perigeo, la excentricidad y la anomalía verdadera o del tiempo correspondiente al apogeo del inicio (o del final) del arco «activo».

Para determinar el mínimo valor de  $\phi$  puede crearse un programa informático sencillo con objeto de calcular una serie de combinaciones de  $\alpha_E$ ,  $\lambda_E$  y  $\alpha_G$ , utilizando el procedimiento antes mencionado a fin de hallar el valor de  $\phi$  para cada combinación, y finalmente seleccionar el valor más pequeño. Dado que la interferencia sólo puede producirse para combinaciones de  $\alpha_E$ ,  $\lambda_E$  y  $\alpha_G$  en las que E es visible tanto desde G como desde s (véase la Fig. 4), pero por otro lado deben considerarse todas las combinaciones, sería conveniente elaborar un programa sencillo para incluir una amplia gama de las tres variables y luego excluir del cálculo todas las combinaciones donde la Tierra impide ver totalmente E desde G o s o desde G y s. Esta explicación se ilustra en el triángulo plano extraído de la Fig. 4 indicado en la Fig. 2.

## Anexo 2

### Cálculo del aumento de ruido en el enlace OSG debido a la interferencia causada por un satélite HEO ubicado al inicio de su arco «activo»

En la Fig. 4 puede observarse que la interferencia causada por un satélite HEO ubicado en  $S$  al enlace entre un satélite geoestacionario situado en  $G$  y una estación terrena en  $E$  penetrará en el receptor de esa estación terrena a través de un lóbulo lateral de su diagrama de antena. El aumento correspondiente en la temperatura de ruido del enlace OSG viene dado por:

$$10 \log((\Delta T/T)/100) = E_1 - 20 \log(4\pi d/\lambda) + G(\varphi) - 10 \log(k T) \quad \text{dB}$$

donde:

- $\Delta T/T$ : aumento del ruido del enlace expresado en porcentaje
- $E_1$ : densidad de p.i.r.e. de la portadora transmitida por un satélite HEO (dB(W/Hz))
- $d$ : longitud del trayecto de interferencia  $S-E$  (m)
- $\lambda$ : longitud de onda (m) =  $(0,3)/f$ , siendo  $f$  la frecuencia de la portadora HEO (GHz)
- $G(\varphi)$ : ganancia de la antena de la estación terrena receptora a la frecuencia,  $f$ , y para un ángulo con respecto al eje  $\varphi$  (dBi)
- $T$ : temperatura de ruido del enlace OSG (K)
- $k$ : constante de Boltzmann; es decir,  $10 \log(k) = -228,6$  dB(W/Hz/K).

$T$  puede representar sólo la temperatura de ruido del enlace descendente del OSG, o la temperatura de ruido del sistema OSG referida a la entrada del receptor de la estación terrena, dependiendo de cómo se prefiera expresar el valor de  $\Delta T/T$ .

En lo que respecta al cálculo de  $G(\varphi)$ , como la metodología descrita en este Anexo se refiere a la interferencia entre sistemas de satélites no geoestacionarios y geoestacionarios, sería conveniente utilizar los diagramas de ganancia que figuran en la Recomendación UIT-R S.1428, donde  $G(\varphi)$  se expresa en función de  $D/\lambda$  y  $D$  es el diámetro de la antena (m).

## Anexo 3

### Aplicación iterativa de la metodología descrita en el Anexo 1

Tal como figura en el fichero adjunto al presente Anexo («MinseparationHEOangle»), el procedimiento descrito en el Anexo 1 se lleva a cabo mediante una hoja de cálculo EXCEL, que contiene las rutinas del programa Visual Basic a fin de efectuar el cálculo de todas las combinaciones de latitud y longitud de la estación terrena y longitud del satélite geoestacionario para las cuales son simultáneamente visibles el satélite geoestacionario y el inicio del arco «activo» del sistema HEO, de este modo se identifica el mínimo ángulo de separación en cualquier estación terrena para el cual podría aparecer una interferencia mutua. Para comodidad del usuario, las instrucciones sencillas descritas en el Anexo 2 se incluyen en la hoja de cálculo a fin de obtener un resultado correspondiente al máximo valor de  $\Delta T/T$  debido a la interferencia, si es necesario. Tal como se desprende de los ejemplos que figuran en el Anexo 4, la hoja de cálculo abarca todos los

tipos de órbitas en las que se utiliza un arco «activo» limitado, a condición de que el arco no intercepte ninguna línea que se encuentre entre el satélite geostacionario y la superficie de la Tierra a una latitud de  $\pm 81,3^\circ$ .

Los únicos datos de partida que se necesitan son los siguientes parámetros del sistema HEO:

- altura del apogeo (km);
- altura del perigeo (km);
- excentricidad (como fracción decimal);
- ángulo de inclinación de la órbita (grados);
- uno (o más) de los tres parámetros necesarios para definir el inicio «s» (o el final «e») del arco «activo», es decir:
  - el ángulo geocéntrico entre s y el apogeo (grados),
  - el tiempo que tarda el satélite en desplazarse entre s y el apogeo (h)<sup>1</sup>,
  - o la altura de s (km).

Si el usuario desea calcular el valor correspondiente de  $\Delta T/T$ , es necesario contar con información sobre el siguiente parámetro:

- densidad de p.i.r.e. del satélite HEO (dB(W/Hz));

y sobre los siguientes parámetros del enlace OSG:

- diámetro (m) de la antena en la estación terrena del enlace OSG;
- diagrama de ganancia del receptor de la antena de la estación terrena del enlace OSG (dBi en función del ángulo con respecto al eje);
- temperatura de ruido del enlace OSG (K);
- frecuencia (GHz).



MinseparationHEOangle.xls

## Anexo 4

### Ejemplos de aplicación de la metodología del Anexo 1

En las 2ª a 8ª filas del Cuadro 1 se indican las características orbitales de 12 tipos de diseño del sistema HEO obtenidas a partir de la información presentada al UIT-R. Para ilustrar estos sistemas, los tipos de huella sobre la superficie de la Tierra se comparan en las Figs. 5 a 7. La 11ª fila del Cuadro suministra información sobre las longitudes del apogeo utilizadas para elaborar dichas Figs. 5 a 7; estas longitudes del apogeo se han seleccionado únicamente para comodidad de la ilustración y por ningún otro motivo.

---

<sup>1</sup> El fichero adjunto incluye una rutina adicional Visual Basic con el fin de utilizar este elemento de datos, si se introduce esta información. En ese caso, no sólo se calcula el mínimo ángulo de separación, sino los emplazamientos absolutos de la estación terrena y del satélite geostacionario para los cuales también se calcula el ángulo obtenido, a condición de que la longitud del apogeo HEO se introduzca como dato adicional. Véase el fichero EXCEL asociado titulado «MinseparationHEOangle (distorsión del ángulo HEO)».



CUADRO 1

1. Sistema HEO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2. Altura del apogeo (km)	35 970	44 640,5	39 000	35 800	52 700	40 000	50 400	27 288,3	20 180	47 669	39 300	27 470
3. Altura del perigeo (km)	4 500	26 931,5	500	35 800	18 900	31 600	21 200	517,4	20 180	9 312,9	1 075	310
4. Excentricidad de la órbita	0,59	0,21	0,74	0	0,4	0,1	0,347	0,66	0	0,55	0,72	0,67
5. Inclinación de la órbita (grados)	50	42,5	63,43	63,4	60	40	63,4	63,435	63,4	45	63,4	45
6. Ángulo de s con respecto al apogeo (grados)	35	31	(29,5)	60	(30)	37	(24)	40	(30)	(36)	25	(28)
7. Tiempo de s con respecto al apogeo (hr)	(-3,13)	(-3)	-3,5	(-4)	-4	(-2,95)	-3	(-2,55)	-1	-4,5	(-3,06)	-2
8. Altura de s (km)	(27 200)	(42 800)	(26 900)	N/A	(48 000)	(39 000)	(47 900)	(16 500)	N/A	(37 800)	(30 700)	(21 400)
9. Ángulo mínimo de separación (grados)	39,84	35,84	52,58	26,94	49,35	31,34	55,49	40,66	51,84	35,47	55,55	37,73
10. Comprobación mediante simulación (grados)	(39,78)	(35,78)	(52,50)	(26,86)	(49,25)	(31,40)	(55,47)	(40,91)	(51,86)	(35,51)	(55,49)	(37,26)
11. Longitud del apogeo (grados E)	-150	-108	-62	-43	-130	-38	-110	-83	-30	-18	27	57
12. Longitud de la estación terrena (grados E)	-117,63	-110,81	14,89	17,33	-43,32	38,65	-34,89	-75,38	-35,33	79,63	101,86	82,72
13. Latitud de la estación terrena (grados N)	73,63	-46,70	3,72	-7,73	-3,15	-5,44	-2,01	73,63	73,63	-5,44	2,58	73,63
14. Longitud del satélite geoestacionario (grados E)	-150,29	-102,22	-61,32	-58,88	-119,52	-37,55	-111,09	-108,04	-67,99	3,42	25,66	50,06
15. Ejemplo de $\Delta T/T$ (%) <sup>(1)</sup>	0,204	0,072	0,150	0,200	0,058	0,108	0,058	0,572	0,386	0,043	0,122	0,312

<sup>(1)</sup> Valores calculados con ayuda del Anexo 2 para  $E_1 = -21$  dB(W/Hz),  $D = 3$  m,  $T = 100$  K,  $f = 11$  GHz y  $G(\varphi)$  a partir de la Recomendación UIT-R S.1428-1.

N/A: no disponible.

En las filas 6ª, 7ª y 8ª figuran distintas maneras de representar el inicio (o el final) del arco «activo». En estas tres filas, los valores que no están entre paréntesis son los que se han presentado al UIT-R; los valores entre paréntesis se obtuvieron mediante simulaciones informáticas de cada uno de los sistemas, deteniendo el programa cada uno de los valores que no aparece entre paréntesis y anotando los dos valores correspondientes entre paréntesis. Los resultados que figuran en la 9ª fila se obtuvieron a partir del Anexo 3 utilizando los valores sin paréntesis para determinar el inicio del arco «activo». (Cuando se utilizaron los valores entre paréntesis que figuran en el Anexo 3, los resultados fueron ligeramente diferentes, pero las diferencias se encontraban dentro de los márgenes de precisión de los cálculos realizados.) Se llevó a cabo una comprobación de cada resultado mediante simulación por ordenador, lo que dio como resultado los mínimos ángulos de separación que figuran entre paréntesis en la 10ª fila; como puede observarse, estos resultados son coherentes con los valores que figuran en la 9ª fila y, por consiguiente, confirman la validez del Anexo 3.

Además, basándose en las longitudes del apogeo que aparecen en la 11ª fila, la combinación de emplazamientos de estación terrena y satélite geostacionario, para los cuales se producirá el mínimo ángulo con respecto al eje en cada caso, se obtuvo utilizando el Anexo 3, y estos resultados aparecen en las filas 12ª, 13ª y 14ª del Cuadro 1.

FIGURA 5

Partes de las huellas sobre la superficie de la Tierra de los sistemas HEO 1 a 4, en las que se muestran los arcos «activos» (es decir, por encima de --)

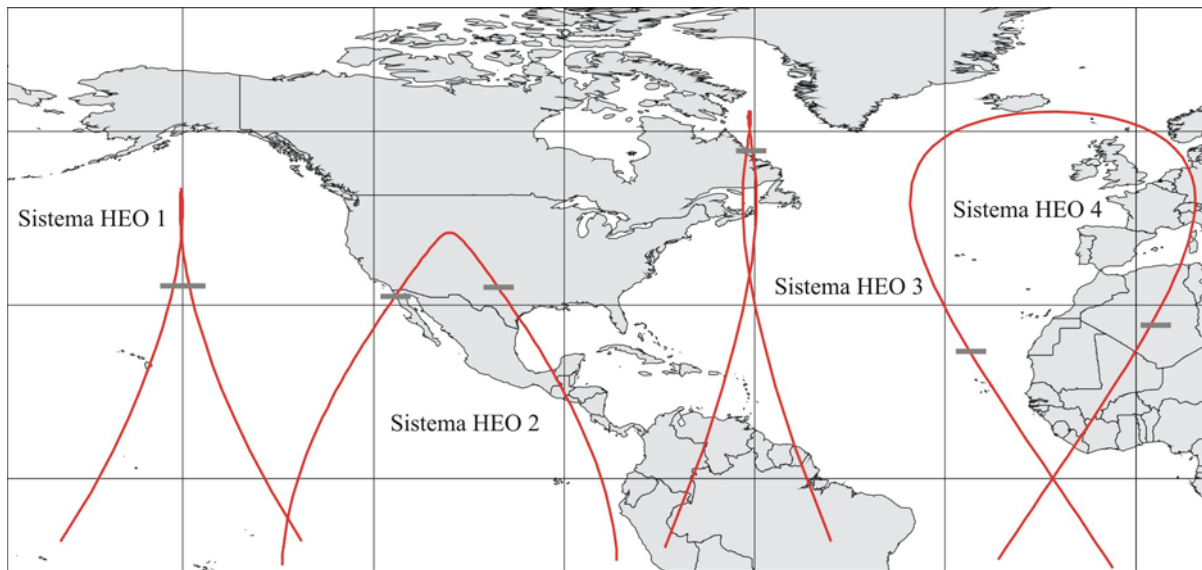


FIGURA 6

Partes de las huellas sobre la superficie de la Tierra de los sistemas HEO 5 a 8, en las que se muestran los arcos «activos»

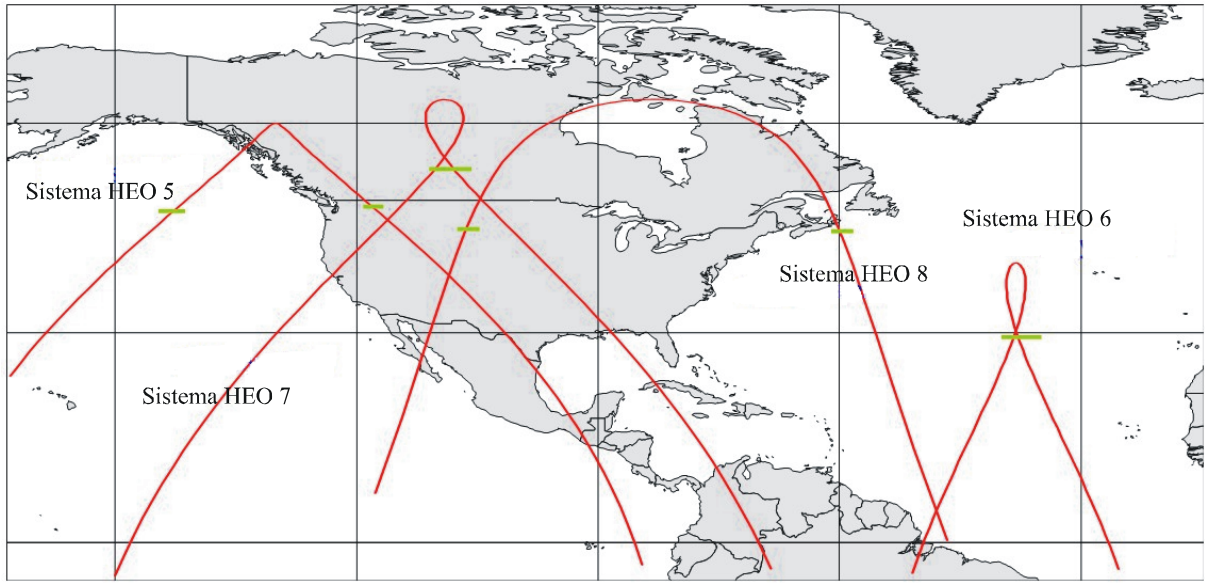
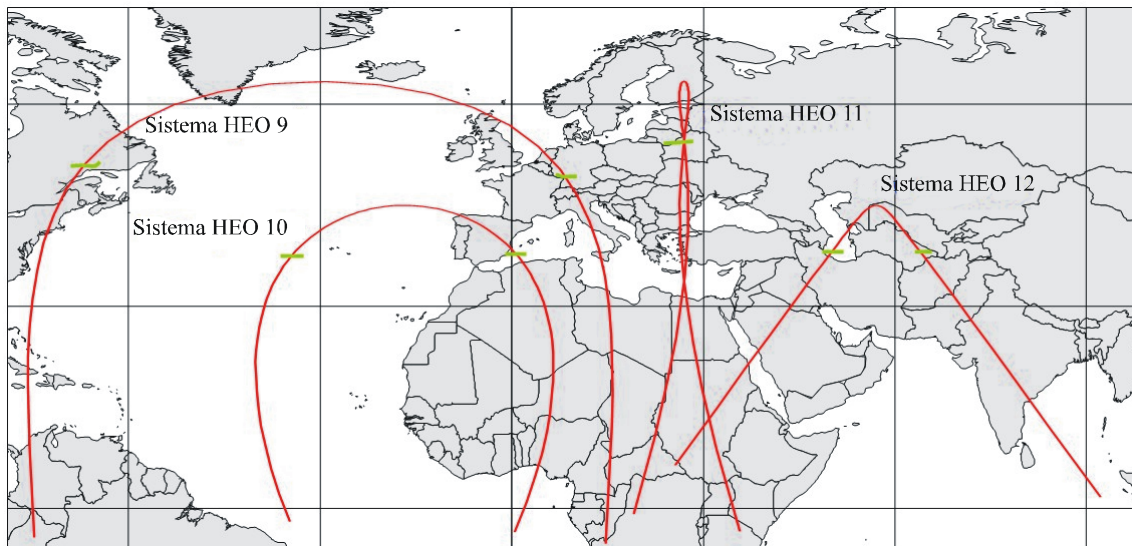


FIGURA 7

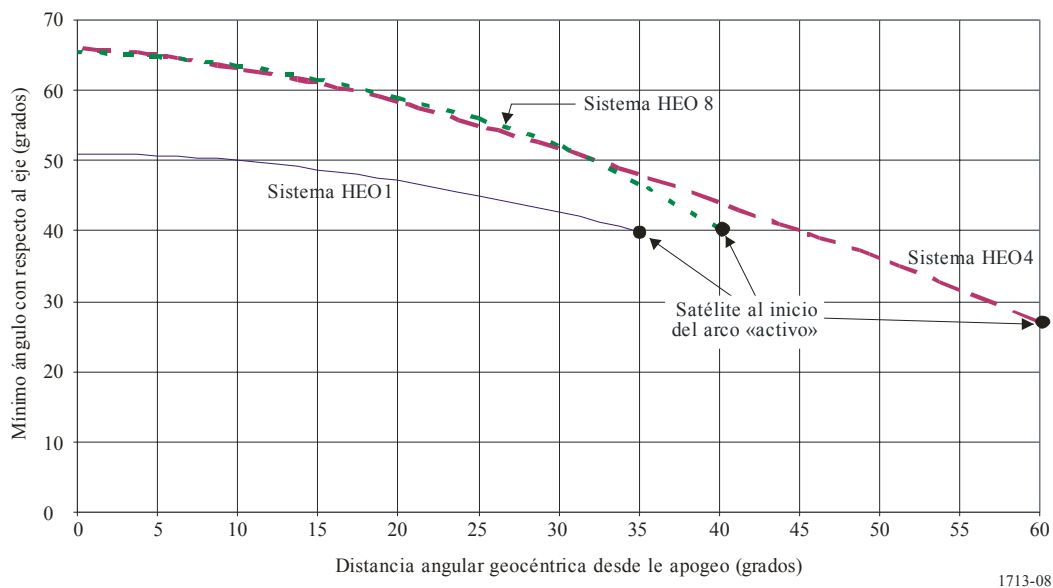
Partes de las huellas sobre la superficie de la Tierra de los sistemas HEO 9 a 12, en las que se muestran los arcos «activos»



Por último, la disponibilidad del Anexo 3 constituye un mecanismo para verificar la veracidad del *considerando c)* en los casos que se ponen de ejemplo. Esto se llevó a cabo para los sistemas 1, 4 y 8 con el propósito de abarcar ampliamente los tipos de sistema, mediante el cálculo del mínimo ángulo con respecto al eje (o de separación) para reducir progresivamente los valores del ángulo geocéntrico,  $\theta$ , entre un satélite HEO y el apogeo. Los resultados se muestran gráficamente en la Fig. 8.

FIGURA 8

Variación con la distancia del satélite HEO desde el apogeo del mínimo ángulo con respecto al eje



1713-08

En la Fig. 8 se muestra claramente que, para los sistemas HEO típicos, cuanto más alejado se encuentre un satélite del apogeo de su órbita, más pequeño será el mínimo ángulo con respecto al eje bajo el cual es visto por las estaciones terrenas que teóricamente funcionan con un satélite geoestacionario situado en la longitud del caso más desfavorable en el arco OSG para esa órbita particular del satélite HEO.

## Anexo 5

### Método para calcular al mínimo ángulo, subtendido en la superficie de la Tierra bajo la huella de un haz de un satélite geoestacionario situado a una determinada longitud, que forma ese satélite y un satélite HEO en su arco activo

#### 1 Geometría del plano de una órbita elíptica

La Fig. 9 muestra una representación bidimensional del trayecto que recorre un satélite HEO en órbita alrededor de la Tierra. Los parámetros que en general definen la posición instantánea de un satélite de este tipo en su órbita, a saber, la anomalía media,  $M$ , la anomalía excéntrica,  $E$ , y la anomalía verdadera,  $f$ , vienen dados por las siguientes expresiones<sup>2</sup>, cuyos símbolos se definen a continuación:

$$M = 2\pi t/T \text{ rad}$$

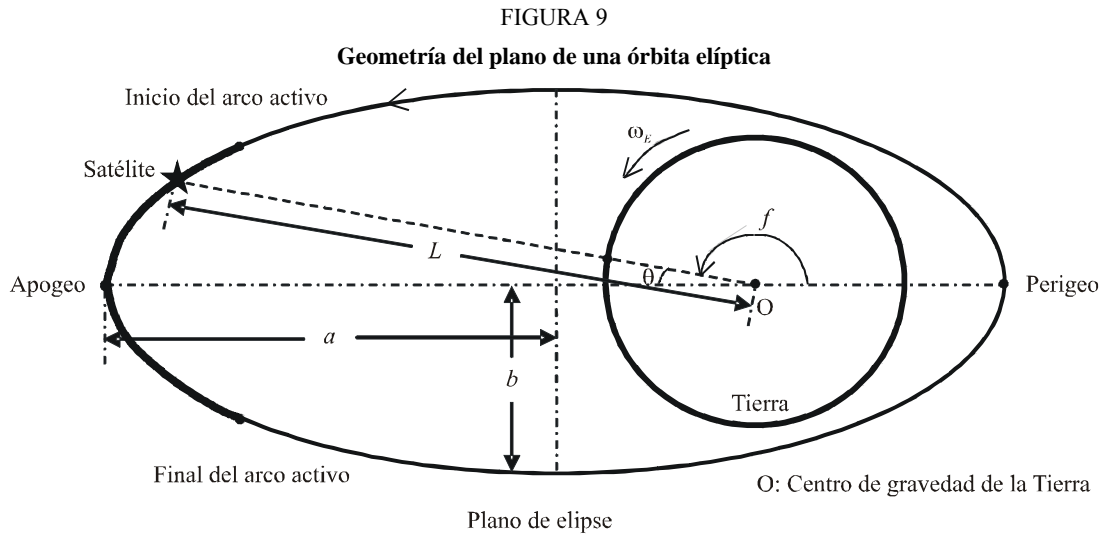
$$M = E - e \sin(E) \text{ rad} \quad (\text{ecuación de Kepler})$$

$$f = 2 \operatorname{tg}^{-1}(\{(1+e)/(1-e)\}^{0.5} \operatorname{tg}(E/2)) \text{ rad}$$

<sup>2</sup> Véase el Anexo 1 a la Recomendación UIT-R S.1529.

Por otra parte, puede deducirse que la longitud  $L$  entre un satélite HEO «activo» y el centro de gravedad de la Tierra viene dado por:

$$L = a (1 - e \cos(E)) \quad \text{km}$$



- |                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| $a$ : Semieje mayor (km)          | $t$ : Tiempo ( $t = 0$ : perigeo) (s)                           |
| $b$ : Semieje menor (km)          | $T$ : Periodo orbital (s)                                       |
| $i$ : Ángulo de inclinación (rad) | $\theta$ : Ángulo desde el apogeo (rad)                         |
| $e$ : Excentricidad               | $\omega_E$ : Velocidad angular de rotación de la Tierra (rad/s) |
| $f$ : Anomalía verdadera (rad)    |   |
| $E$ : Anomalía excéntrica (rad)   |   |

1713-09

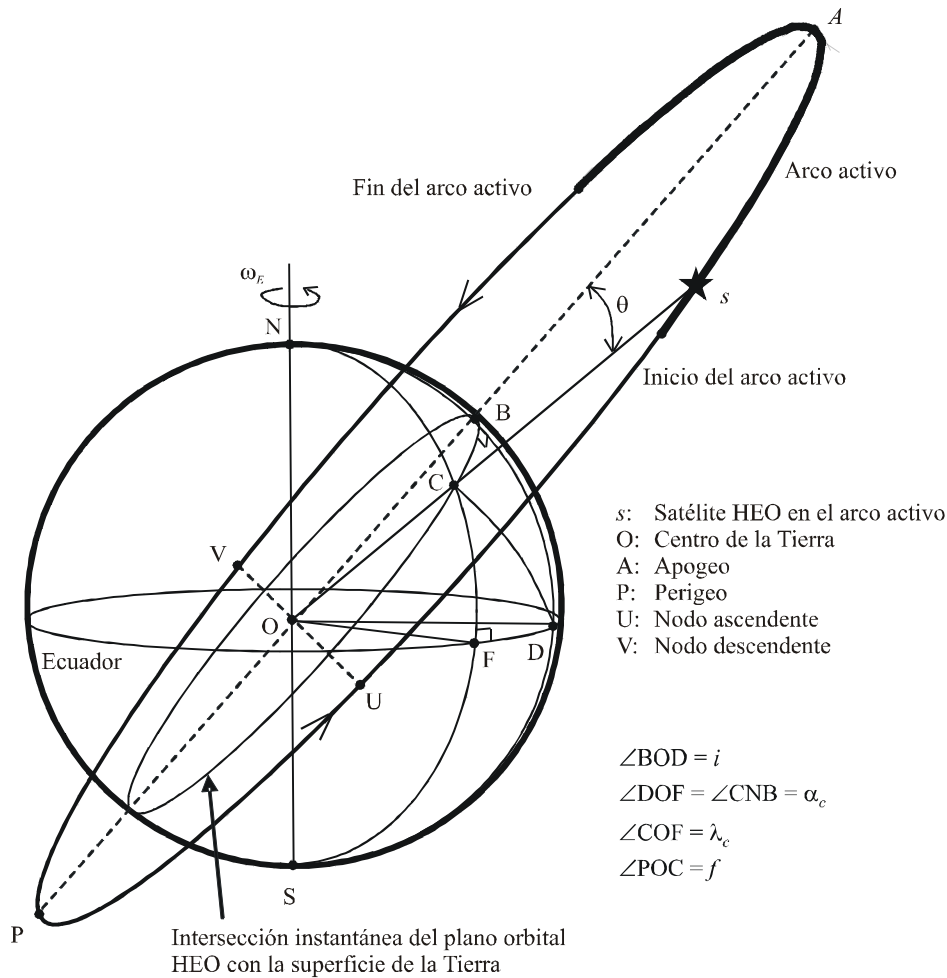
## 2 Cálculo de las coordenadas geográficas de un satélite HEO «activo»

Aplicando el método descrito en el Paso 2 del Anexo 1, puede calcularse la latitud  $\lambda_C$  y la longitud relativa  $\alpha_C$  de un satélite HEO «activo». Por otra parte, su longitud absoluta  $\alpha$  viene dada por:

$$\alpha = \alpha_C + \alpha_{apogeo} - \omega_E (t - t_{apogeo}) \quad \text{rad}$$

- $t_{apogeo}$ : tiempo en el apogeo (s)  
 $\alpha_{apogeo}$ : longitud del apogeo (rad).

FIGURA 10  
 Coordenadas geográficas del satélite HEO



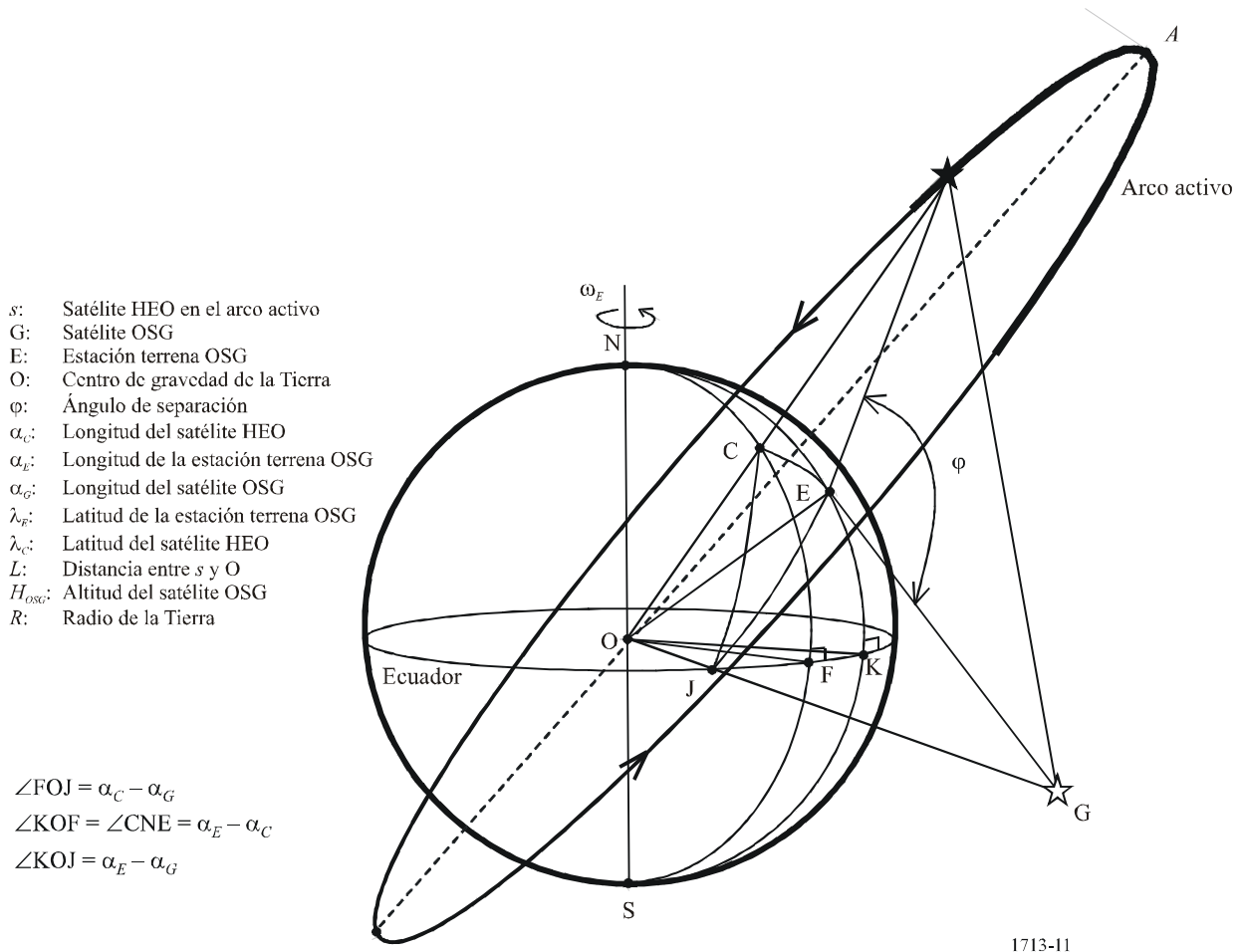
1713-10

### 3 Cálculo del mínimo ángulo de separación

Utilizando el método descrito en el Paso 3 del Anexo 1, puede calcularse el ángulo de separación  $\varphi$  entre un satélite HEO «activo» y un satélite OSG dado para una estación terrena situada en cualquier emplazamiento geográfico que reciba señales del satélite OSG, si se conocen el ángulo de inclinación HEO, la altura del apogeo, la altura del perigeo, la excentricidad, la longitud del apogeo, y la longitud de la OSG.

FIGURA 11

**Ángulo de separación entre los satélites HEO y OSG visto desde la estación terrena OSG situada en E**



Obsérvese que en el Anexo 1,  $\alpha_E$  y  $\alpha_G$  son relativos a  $\alpha_C$  mientras que en el Anexo 5 se indican longitudes absolutas de E y G, respectivamente.

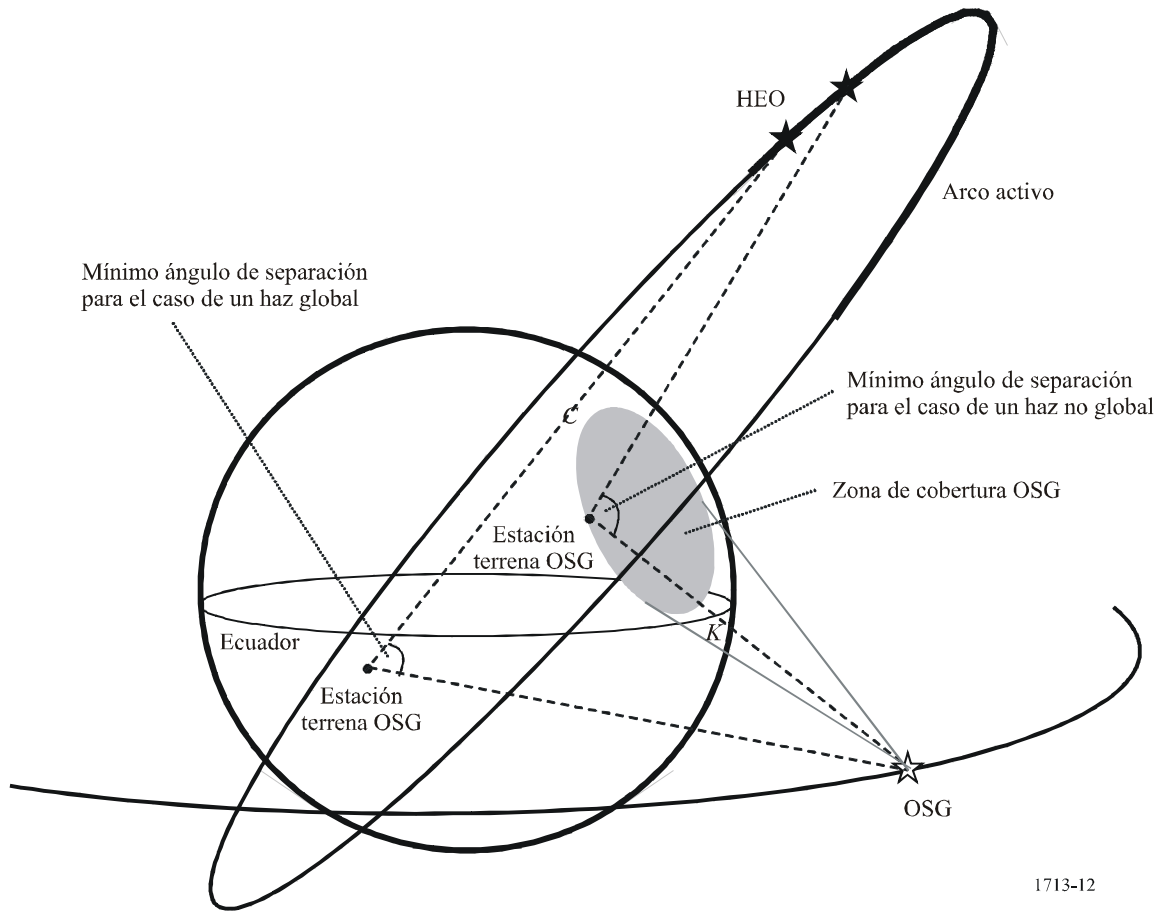
Al fin de hallar el mínimo valor de  $\phi$ , puede escribirse un programa informático que realice iteraciones para una gama de combinaciones de  $\alpha_E$ ,  $\lambda_E$  y  $t$ , basado en el procedimiento descrito en el Paso 3 del Anexo 1, de forma que calcule  $\phi$  para cada combinación, y seleccionar luego el valor más pequeño.

Como sólo puede producirse interferencia para combinaciones de  $\alpha_E$ ,  $\lambda_E$  y  $t$  en las que la estación terrena es visible tanto por el satélite HEO como por el satélite OSG, y teniendo en cuenta que se han de estudiar todas esas combinaciones, sería conveniente que el programa incluyera gamas amplias de las tres variables y luego excluyera de los cálculos las combinaciones en las que la estación terrena queda oculta por la Tierra desde el satélite OSG o desde el satélite HEO o desde ambos. La Fig. 12 ilustra esta situación.

Para los casos en que el satélite OSG no utiliza un haz de cobertura global, también deben excluirse las combinaciones en las que la estación terrena OSG quede fuera de la anchura de haz utilizable del satélite OSG.

FIGURA 12

Mínimo ángulo de separación entre los satélites HEO y OSG  
para el caso de un haz no global



Por otra parte,  $\Delta T/T$  puede calcularse mediante el método descrito en el Anexo 2.

## Anexo 6

### Ejemplos de aplicación de la metodología descrita en el Anexo 5

En el Cuadro 2 se muestran los resultados obtenidos del Anexo 5 para el caso de los 12 diseños de sistemas HEO distintos indicados en el Cuadro 1.



CUADRO 2

**Mínimo ángulo de separación en el caso de un OSG de ejemplo con haz global**

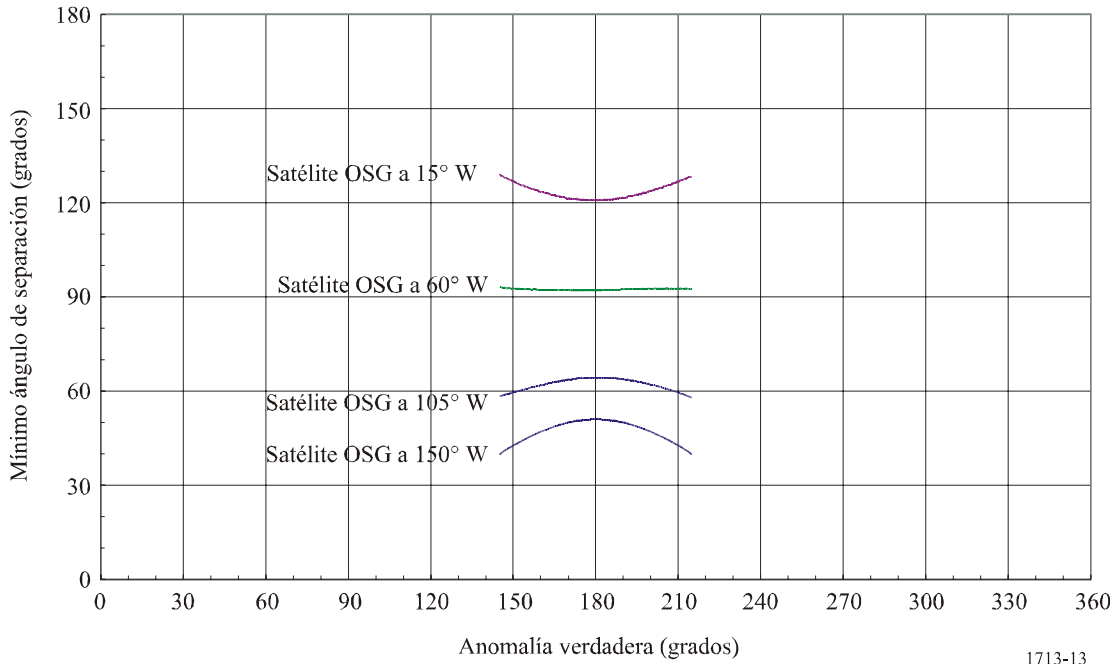
1. Sistema HEO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2. Altura del apogeo (km)	35 970	44 640,5	39 000	35 800	52 700	40 000	50 400	27 288,3	20 180	47669	39 300	27 470
3. Altura del perigeo (km)	4 500	26 931,5	500	35 800	18 900	31 600	21 200	517,4	20 180	9312,9	1 075	310
4. Excentricidad de la órbita	0,59	0,21	0,74	0	0,4	0,1	0,347	0,66	0	0,55	0,72	0,67
5. Inclinación de la órbita (grados)	50	42,5	63,43	63,4	60	40	63,4	63,435	63,4	45	63,4	45
6. Longitud del apogeo (grados E)	-150	-108	-62	-43	-130	-38	-110	-83	-30	-18	27	57
7. Periodo del arco activo (h)	6,26 <sup>(1)</sup>	6 <sup>(1)</sup>	7 <sup>(1)</sup>	8 <sup>(1)</sup>	8 <sup>(1)</sup>	5,9 <sup>(1)</sup>	6 <sup>(1)</sup>	5,1 <sup>(1)</sup>	2 <sup>(1)</sup>	9 <sup>(1)</sup>	6,12 <sup>(1)</sup>	4 <sup>(1)</sup>
8. Longitud del satélite OSG (grados E)	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135
9. Mínimo ángulo de separación (grados)	80,5	109,6	118,6	120,2	87,4	145,4	102,5	112,6	118,2	126,7	100,2	78,5
10- Longitud de la estación terrena (grados E)	-153	76	60	-150	66	60	62	-149	59	-165	-152	-162
11. Latitud de la estación terrena (grados N)	-40	62	24	18	45	22	34	-7	-6	61	35	58
12. Longitud del satélite HEO (grados E)	-150,3	-114,1	-62	-43	-141,3	-38,1	-112,0	-96,8	3,7	2,6	27,3	63,4
13. Latitud del satélite HEO (grados N)	38,9	35,4	63,4	63,4	48,8	40,0	62,4	59,5	54,1	36,6	63,2	38,8

<sup>(1)</sup> Estos valores se han obtenido duplicando los valores de la 7ª fila del Cuadro 1.

Las Figs. 13, 14 y 15 muestran los resultados del cálculo del mínimo ángulo de separación para cada anomalía verdadera de los sistemas HEO de ejemplo 1, 4 y 8, respectivamente. Como puede verse, el mínimo ángulo de separación en un satélite HEO «activo» y un determinado satélite OSG varía con la longitud del satélite OSG. Además, estos resultados demuestran la veracidad del *considerando h*). A este respecto, cabe señalar que el apogeo se produce a una anomalía verdadera de 180°, y que en las curvas de cada Figura se representa desde la anomalía verdadera al principio del arco activo hasta la anomalía verdadera al final del arco activo.

FIGURA 13

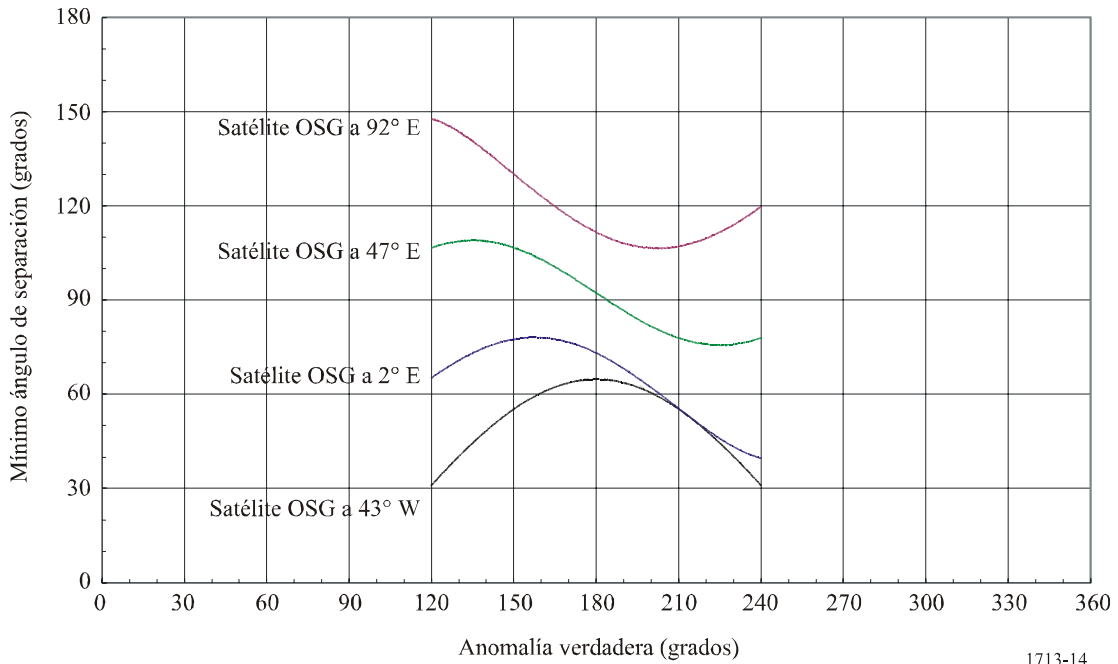
**Mínimo ángulo de separación en función de la anomalía verdadera de un satélite «activo» del sistema HEO 1**



1713-13

FIGURA 14

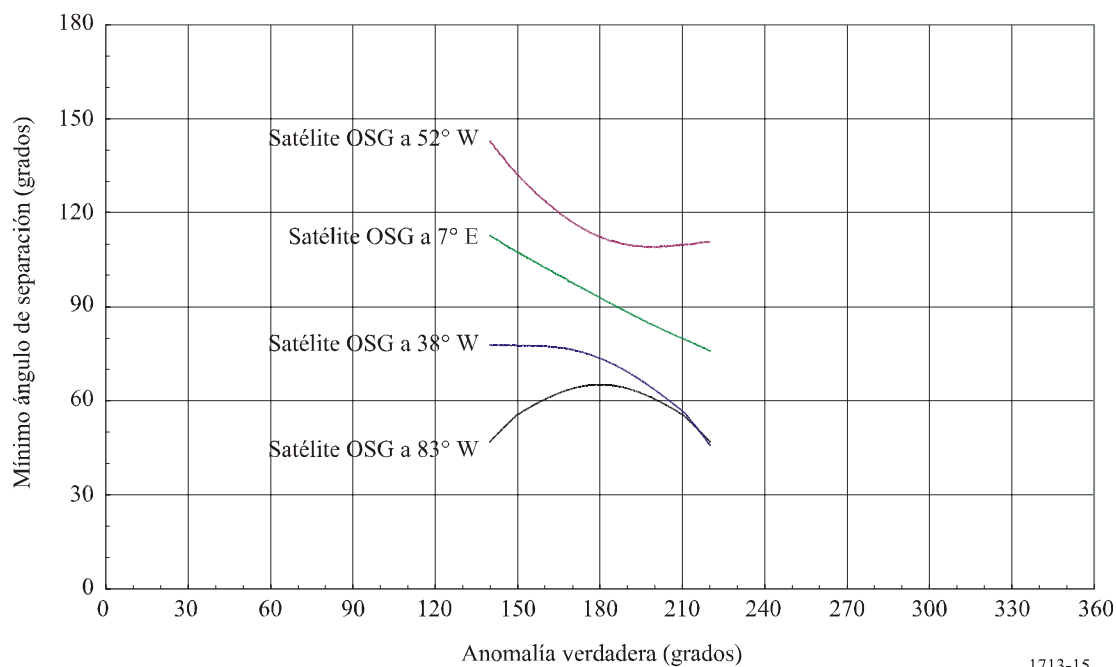
**Mínimo ángulo de separación en función de la anomalía verdadera de un satélite «activo» del sistema HEO 4**



1713-14

FIGURA 15

**Mínimo ángulo de separación en función de la anomalía verdadera de un satélite «activo» del sistema HEO 8**



1713-15

En el Cuadro 3 se muestra un ejemplo de la huella del haz elíptico del satélite OSG a 135°E. En el Cuadro 4 aparecen los resultados del cálculo del mínimo ángulo de separación entre el sistema HEO 4 de ejemplo y el satélite OSG a 135° E, cuya huella del haz se representa en el Cuadro 3. Además, la Fig. 16 ilustra el mínimo ángulo de separación para cada anomalía verdadera en este caso.

CUADRO 3

**Datos de ejemplo de una huella de haz elíptico correspondientes al ejemplo de satélite OSG a 135° E**

Longitud (grados E)	Latitud (grados N)	Longitud (grados E)	Latitud (grados N)	Longitud (grados E)	Latitud (grados N)
75,7	39,9	74,3	6,3	103,0	29,5
73,3	37,4	77,7	4,8	104,0	32,5
71,1	34,8	81,8	4,4	104,6	35,5
69,1	32,2	85,7	5,4	104,8	38,6
67,8	29,2	88,7	7,5	104,0	41,6
67,2	26,1	91,3	9,9	101,7	44,1
66,9	23,1	93,7	12,4	98,1	45,6
66,7	20,1	95,7	15,1	94,0	46,1
67,0	17,0	97,3	17,9	89,9	45,8
67,7	13,9	98,8	20,8	86,0	44,9
69,1	11,1	100,3	23,7	82,1	43,7
71,4	8,5	101,7	26,5	78,7	42,1

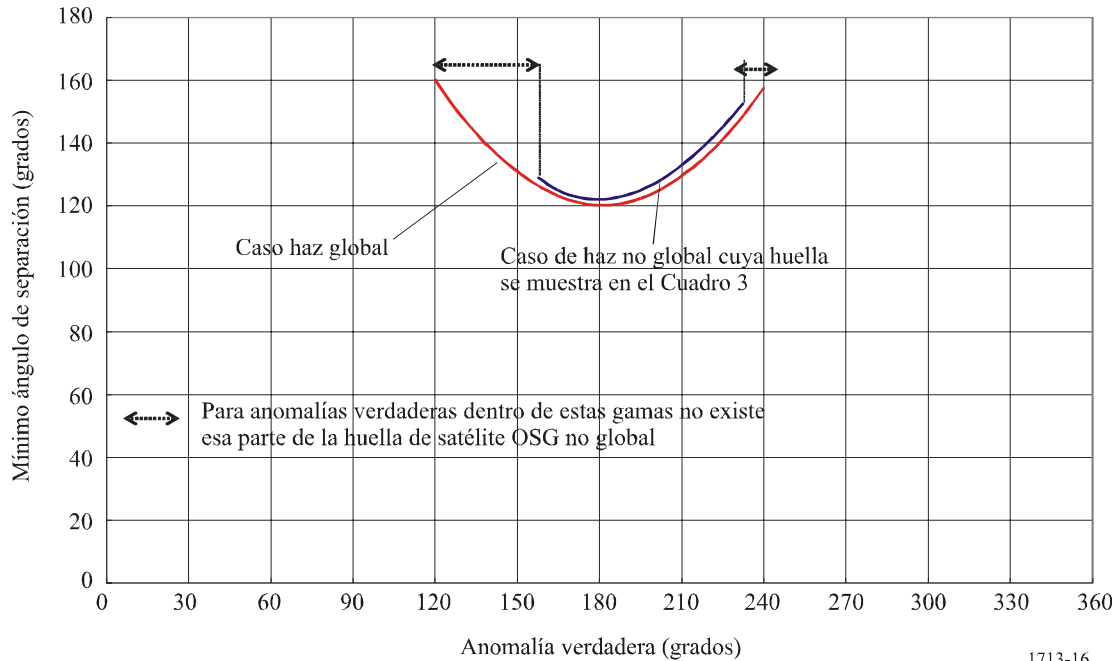
CUADRO 4

**Mínimo ángulo de separación en el caso de un  
OSG de ejemplo con un haz no global**

1. Sistema HEO	4
2. Altura del apogeo (km)	35 800
3. Altura del perigeo (km)	35 800
4. Excentricidad de la órbita	0
5. Inclinación de la órbita (grados)	63,4
6. Longitud del apogeo (grados E)	-43
7. Periodo del arco activo (h)	8
8. Longitud del satélite OSG (grados E)	135
9. Mínimo ángulo de separación (grados)	122,0
10. Longitud de la estación terrena (grados E)	67
11. Latitud de la estación terrena (grados N)	18
12. Longitud del satélite HEO (grados E)	-39,93
13. Latitud del satélite HEO (grados N)	63,29

FIGURA 16

**Mínimo ángulo de separación en función de la anomalía verdadera  
de un satélite «activo» del sistema HEO 4 (situación del satélite OSG: 135° E)**



En el fichero Excel adjunto «MinSepAnnex5» se incluye una rutina adicional en Visual Basic del método descrito en el Anexo 5. Esta aplicación calcula correctamente el mínimo ángulo de separación en dos casos: un satélite OSG con un haz global y un satélite OSG con un haz no global. Obsérvese que esta aplicación calcula correctamente el mínimo ángulo de separación bajo la huella de un haz conformado siempre que ésta no tenga concavidades. En el caso de una huella con concavidades, los datos de entrada deben incluir puntos artificiales que evitan cada concavidad, y en caso de que se calcule el mínimo ángulo de separación en una ubicación geográfica de una de las concavidades, el usuario deberá suponer que éste se produce en el contorno de la huella en el punto más cercano al punto calculado.



MinSepAnnex5.  
xls

---