

Recomendación UIT-R P.1511-3

(08/2024)

Serie P: Propagación de las ondas radioeléctricas

Topografía para establecer modelos de propagación Tierra-espacio

Prólogo

El Sector de Radiocomunicaciones tiene como cometido garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite, y realizar, sin limitación de gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones UIT-R.

Las Conferencias Mundiales y Regionales de Radiocomunicaciones y las Asambleas de Radiocomunicaciones, con la colaboración de las Comisiones de Estudio, cumplen las funciones reglamentarias y políticas del Sector de Radiocomunicaciones.

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

La política del UIT-R sobre Derechos de Propiedad Intelectual se describe en la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI a la que se hace referencia en la Resolución UIT-R 1. Los formularios que deben utilizarse en la declaración sobre patentes y utilización de patentes por los titulares de las mismas figuran en la dirección web <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/es>, donde también aparecen las Directrices para la implementación de la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI y la base de datos sobre información de patentes del UIT-R sobre este asunto.

Series de las Recomendaciones UIT-R	
(También disponible en línea en https://www.itu.int/publ/R-REC/es)	
Series	Título
BO	Distribución por satélite
BR	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
BS	Servicio de radiodifusión (sonora)
BT	Servicio de radiodifusión (televisión)
F	Servicio fijo
M	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
P	Propagación de las ondas radioeléctricas
RA	Radioastronomía
RS	Sistemas de detección a distancia
S	Servicio fijo por satélite
SA	Aplicaciones espaciales y meteorología
SF	Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo
SM	Gestión del espectro
SNG	Periodismo electrónico por satélite
TF	Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias
V	Vocabulario y cuestiones afines

Nota: Esta Recomendación UIT-R fue aprobada en inglés conforme al procedimiento detallado en la Resolución UIT-R 1.

Publicación electrónica
Ginebra, 2024

RECOMENDACIÓN UIT-R P.1511-3

Topografía para establecer modelos de propagación Tierra-espacio

(Cuestión UIT-R 214/3)

(2001-2015-2019-2024)

Cometido

En esta Recomendación se facilitan datos topográficos mundiales, información sobre coordenadas geográficas y datos topográficos altimétricos para la predicción de los efectos de propagación para los trayectos Tierra-espacio en las Recomendaciones de la Serie P del UIT-R.

Palabras clave

Topografía, coordenadas geográficas, altura geodésica, altura ortométrica, elipsoide, geoide, ondulación geoide

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que se necesita información sobre la topografía terrestre para la predicción de la atenuación y de la dispersión;
- b) que esa información se necesita para todos los emplazamientos del mundo, especialmente cuando se necesitan cálculos regionales o continentales,

recomienda

- 1 que se utilicen los datos que figuran en el Anexo 1 para obtener la altura topográfica de la superficie de la Tierra sobre el nivel medio del mar cuando no se disponga de datos locales o datos con una mejor resolución espacial;
- 2 que se utilicen el método del del Anexo 1 para convertir la altura topográfica por encima de la altura por encima del elipsoide WGS-84 (es decir, la altura sobre el nivel medio del mar) o viceversa cuando no se dispone de datos locales o datos con una mejor resolución.
- 3 que se utilice el método del Anexo 1 para calcular los ángulos de observación y la distancia entre dos estaciones en coordenadas geodésicas.

Acrónimos/Abreviaturas

EGM Modelo gravitacional de la Tierra (*earth gravitational model*)

WGS Sistema Geodésico Mundial (*world geodetic system*)

Recomendaciones del UIT-R conexas

Recomendación UIT-R P.618

Recomendación UIT-R P.676

Recomendación UIT-R P.836

Recomendación UIT-R P.1144

Recomendación UIT-R P.2145

NOTA – Debe utilizarse la edición/revisión más reciente de la Recomendación.

Lista de símbolos

a	eje semimayor (radio ecuatorial)
b	eje semimenor (radio polar)
f	factor de achatamiento
Φ	latitud geocéntrica
φ	latitud geodética
$R(\varphi)$	radio geocéntrico de la Tierra en función de la latitud geodésica
R_1	radio medio de la Tierra
R_2	radio de una esfera de igual área de la Tierra
R_3	radio de una esfera de igual volumen de la Tierra
$h_{EGM2008}$	ondulación del geoide (altura del geoide WGS 84 con respecto al elipsoide WGS 84)
$h_{elipsoide}$	altura geodésica sobre el elipsoide WGS 84
h_{geoide}	altura ortométrica sobre el geoide WGS 84
R_{xyz}	Matriz de rotación tridimensional
N_s	radio de curvatura en la vertical primaria en la latitud geodésica objetivo
N_g	radio de curvatura en la vertical primaria en la latitud geodésica de origen
λ	longitud (posición relativa al meridiano de referencia primario)
α	ángulo de acimut geodésico
υ	ángulo de elevación geodésico
R	distancia oblicua en el espacio libre

ÍNDICE*Página*

Anexo 1	3
1 Topografía	3
1.1 Altura topográfica	3
2 Sistema de coordenadas de la Tierra WGS 84	4
2.1 Elipsoide de referencia WGS 84.....	4
2.2 Geoide de referencia WGS 84	5
3 Cálculo de los ángulos de observación y la distancia entre dos estaciones en coordenadas geodésicas.....	6

Anexo 1

1 Topografía

En los puntos siguientes se presentan métodos para predecir o calcular las alturas de tres superficies diferentes de la Tierra:

Altura topográfica: La altura topográfica, descrita en el § 1.1, es la altura de la superficie física de la Tierra sobre el nivel medio del mar, que puede ser muy irregular. Para la Tierra, es la topografía de la masa continental, y para el agua (por ejemplo, océano, lago, mar), es la superficie del agua.

Elipsoide de referencia WGS 84: El elipsoide de referencia WGS 84, descrito en el § 2, es una aproximación simple de la figura y el campo gravitatorio de la Tierra. El elipsoide WGS 84 se aproxima al nivel medio del mar dentro de ± 100 m. Los receptores de sistemas de radionavegación típicos informan alturas relativas al elipsoide de referencia WGS 84.

Geoide de referencia WGS 84: El geoide de referencia WGS 84, descrito en el § 2, es una combinación del elipsoide de referencia WGS 84 y el modelo gravitacional de la Tierra EGM2008, que caracteriza la ondulación de la superficie equipotencial del campo gravitatorio de la Tierra. El geoide de referencia WGS 84 es la referencia normalizada para el nivel medio del mar.

1.1 Altura topográfica

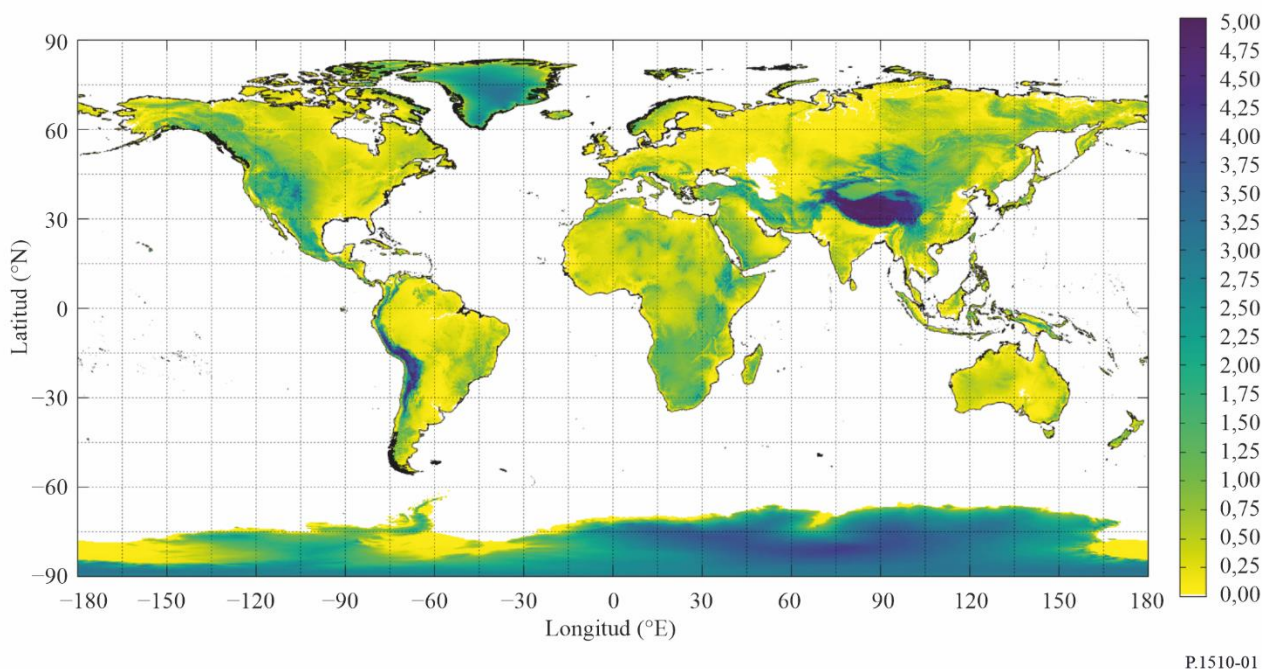
La altura topográfica se define como la altura de la superficie de la Tierra sobre el nivel medio del mar. Los valores de altura topográfica (m) forman parte de esta Recomendación y están disponibles en forma de un mapa digital facilitado en el fichero [R-REC-P.1511-3-202408-I!!ZIP-E](#).

Los datos de la altura topográfica se facilitan en cuadrículas de $1/12^\circ$ de latitud y longitud. En el caso de un emplazamiento distinto de un punto de la cuadrícula indicado, la altura topográfica en el emplazamiento deseado puede obtenerse efectuando una interpolación bicúbica a partir de los valores en los dieciséis puntos de la cuadrícula más cercanos, según se describe en el Anexo 1 de la Recomendación UIT-R P.1144.

En la Fig. 1 se muestra un mapa mundial de la altura topográfica de la superficie de la Tierra sobre el nivel medio del mar.

FIGURA 1

Altura topográfica de la superficie de la Tierra sobre el nivel medio del mar (km)



Puede obtenerse información sobre las costas y las fronteras de los países en el mapa mundial digitalizado de la UIT, disponible en la BR.

2 Sistema de coordenadas de la Tierra WGS 84

El sistema de coordenadas de la Tierra WGS 84 representa la superficie de la Tierra como un geode, que es una superficie gravitacional equipotencial que se aproxima al nivel medio del mar. El geode es una combinación de un elipsoide de referencia y un modelo de gravitación de la Tierra (EGM).

A menos que se especifique otra cosa, las latitudes y longitudes de las Recomendaciones UIT-R de la serie P son geodésicas más que geocéntricas; es decir, las latitudes y longitudes definidas por el elipsoide WGS 84.

2.1 Elipsoide de referencia WGS 84

El elipsoide de referencia WGS 84 se define por su semieje mayor (ecuatorial), a , donde $a = 6\,378,137$ km, y un factor de achatamiento, $1/f$, donde $f = 298,257\,223\,563$.

El semieje menor (polar), b , se define como $b = a(1 - f)$, en cuyo caso $b \approx 6\,356,752\,314\,245$ km.

El radio geocéntrico de la Tierra $R(\varphi)$ en la latitud geodésica φ es:

$$R(\varphi) = \sqrt{\frac{(a^2 \cos^2 \varphi) + (b^2 \sin^2 \varphi)}{(a \cos \varphi)^2 + (b \sin \varphi)^2}} \quad (1)$$

Para un emplazamiento en la superficie del elipsoide de referencia WGS 84, la relación entre la latitud geocéntrica Φ y la latitud geodésica φ es:

$$\tan \Phi = (1 - f)^2 \tan \varphi \quad (2)$$

Además, se definen tres medidas del radio de la Tierra, a saber:

Término	Notación	Valor (km)
Radio medio de la Tierra	R_1	6 371,008 771 4
Radio de una esfera de igual área	R_2	6 371,007 181 0
Radio de una esfera de igual volumen	R_3	6 371,000 790 0

El radio promedio de la Tierra se define como el promedio de los tres semiejes, es decir, $(2a+b)/3$. R_1 , R_2 , y R_3 están bien aproximados en 6 371,0 km.

2.2 Geoide de referencia WGS 84

A menos que se especifique lo contrario, la altura en las Recomendaciones de la serie P de la UIT-R es la altura sobre el nivel medio del mar definida por el geoide WGS 84. La diferencia de altura entre el geoide WGS 84 y el elipsoide WGS 84 es la ondulación del geoide, $h_{EGM2008}$, definida por la versión 2008 del Modelo Gravitacional de la Tierra de la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA) de los Estados Unidos, EGM2008.

Para cualquier ubicación, la altura sobre el elipsoide, $h_{elipsoide}$, la altura sobre el geoide, h_{geoide} , y $h_{EGM2008}$ están relacionadas por:

$$h_{elipsoide} = h_{EGM2008} + h_{geoide} \quad (3)$$

o

$$h_{geoide} = h_{elipsoide} - h_{EGM2008} \quad (4)$$

Para simplificar la práctica, los receptores de los sistemas de radionavegación típicos informan las alturas relativas al elipsoide WGS 84, $h_{elipsoide}$. La ecuación (4) se puede utilizar para convertir una altura por encima del elipsoide WGS 84 en una altura por encima del geoide WGS 84.

Los valores de $h_{EGM2008}$ (m) en un sistema sin mareas¹ forman parte integrante de esta Recomendación y están disponibles en forma de un mapa digital facilitado en el fichero R-REC-P1511-3-2.zip contenido en el suplemento del fichero [R-REC-P.1511-3-202408-I!!ZIP-E](#).

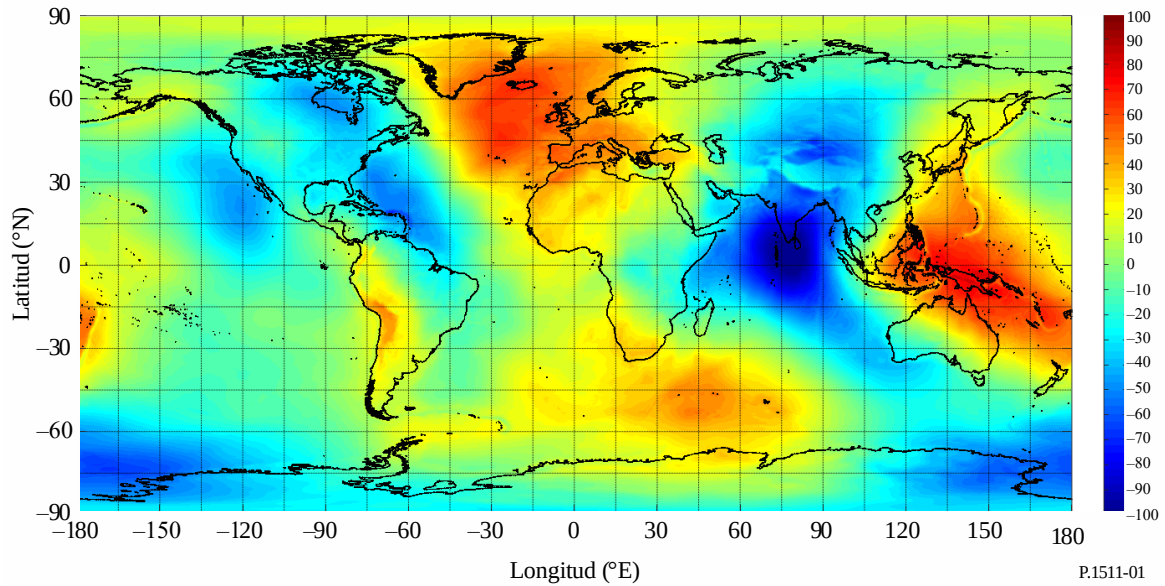
Los datos se facilitan en cuadrículas de $1/12^\circ$ de latitud y longitud. En el caso de un emplazamiento distinto del de los puntos de la cuadrícula, $h_{EGM2008}$ en el emplazamiento deseado puede obtenerse efectuando una interpolación bicúbica a partir de los valores en los dieciséis puntos de la cuadrícula más cercanos, según se describe en el Anexo 1 de la Recomendación UIT-R P.1144.

En la Fig. 2 se muestra un mapa mundial de $h_{EGM2008}$ y el valor absoluto máximo de $h_{EGM2008}$ es ~ 100 m.

Algunos productos de datos integrales de la serie P que referencian alturas sobre el nivel medio del mar se han obtenido utilizando EGM96, la versión de 1996 del Modelo Gravitacional de la Tierra de la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA) de EE.UU., en lugar de EGM2008. Si bien EGM2008 representa mejoras significativas con respecto a EGM96 tanto en resolución espacial como en precisión, la diferencia del valor cuadrático global entre EGM2008 y EGM96 es inferior a 1 m.

¹ Un sistema sin mareas ignora la deformación de la Tierra y los efectos de las mareas del Sol y la Luna.

FIGURA 2

Ondulación del geoide, $h_{EGM2008}$, a partir de EGM2008 (m)

P.1511-01

3 Cálculo de los ángulos de observación y la distancia entre dos estaciones en coordenadas geodésicas

Los ángulos de observación en el espacio libre y la distancia oblicua en el espacio libre entre dos estaciones en coordenadas geodésicas pueden calcularse de la siguiente manera:

- φ_g : Latitud geodésica del origen
- λ_g : Longitud de origen
- h_g : Altura del origen sobre el nivel medio del mar (por ejemplo, sobre el elipsoide de referencia WGS 84) (km)
- φ_s : Latitud geodésica deseada
- λ_s : Longitud deseada
- h_s : Altura objetivo sobre el nivel medio del mar (por ejemplo, por encima del elipsoide de referencia WGS 84) (km)
- α : ángulo de acimut geodésico en el espacio libre desde el emplazamiento origen hasta el emplazamiento destino
- v : ángulo de elevación geodésica en el espacio libre desde el emplazamiento origen hasta el emplazamiento destino
- R : distancia oblicua en el espacio libre entre la ubicación de origen y la ubicación de destino

y a y f se definen en el § 2.1.

Paso 1: Calcular:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix} \quad (5)$$

donde:

$$\begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N_g + h_g) \cos \varphi_g \cos \lambda_g \\ (N_g + h_g) \cos \varphi_g \sin \lambda_g \\ [N_g(1 - f)^2 + h_g] \sin \varphi_g \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N_s + h_s) \cos \varphi_s \cos \lambda_s \\ (N_s + h_s) \cos \varphi_s \sin \lambda_s \\ [N_s(1 - f)^2 + h_s] \sin \varphi_s \end{bmatrix} \quad (7)$$

y

$$N_g = \frac{\alpha}{\sqrt{1 - (2f - f^2) \sin^2(\varphi_g)}} \quad (8a)$$

$$N_s = \frac{\alpha}{\sqrt{1 - (2f - f^2) \sin^2(\varphi_s)}} \quad (8b)$$

Paso 2: Calcular:

$$\begin{bmatrix} e \\ n \\ u \end{bmatrix} = [R_{xyz}] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (9)$$

donde:

$$[R_{xyz}] = \begin{bmatrix} -\sin \lambda_g & \cos \lambda_g & 0 \\ -\sin \varphi_g \cos \lambda_g & -\sin \varphi_g \sin \lambda_g & \cos \varphi_g \\ \cos \varphi_g \cos \lambda_g & \cos \varphi_g \sin \lambda_g & \sin \varphi_g \end{bmatrix} \quad (10)$$

Paso 3: Entonces, v , ángulo de elevación (es decir, vertical) en el origen en el plano que contiene la vertical geodésica (es decir, normal al elipsoide) medida a partir del horizonte geodésico local; α , el ángulo acimutal en el origen en el plano del horizonte geodésico local medido en el sentido de las agujas del reloj a partir del norte geodésico; y R , la distancia oblicua en el espacio libre entre el origen y el objetivo son

$$v = \tan^{-1} \frac{u}{\sqrt{e^2 + n^2}} \quad (11)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{e}{n} \quad (12)$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (\text{km}) \quad (13)$$

$\tan^{-1} \frac{y}{x}$ debe calcularse utilizando la función tangente inversa de cuatro cuadrantes $\text{atan2}(y, x)$ que calcula el ángulo en sentido contrario a las agujas del reloj entre el eje x positivo y el rayo desde el origen hasta el punto (x, y) en el plano cartesiano. Por convenio, $\text{atan2}(0,0) = 0$.

NOTA – Matlab y Octave implementan estos cálculos utilizando la función `geodetic2aer`.