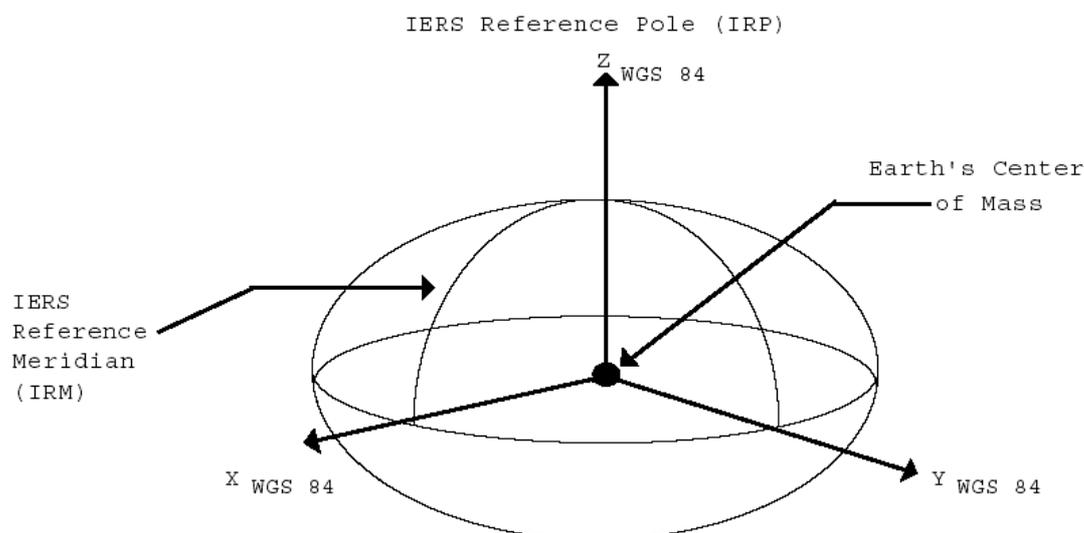


Es un sistema de referencia terrestre convencional. ("Conventional Terrestrial Reference System" CTRS). En su definición se siguen las recomendaciones del IERS ("International Earth Rotation Service (IERS) Technical Note 21"). Se trata de un sistema de referencia geocéntrico fijo con la Tierra y orientado positivamente (a derechas).



Origen Centro de masas de la Tierra

Eje OZ Dirección del Polo de Referencia IERS. Coincide con el Polo Terrestre Convencional (CTP) del BIH (Bureau International de l' Heure) en la época 1984.0 con una incertidumbre de 0."005.

Eje OX Intersección del meridiano de referencia IERS y el plano perpendicular al eje OZ por el origen de coordenadas. Coincide con el meridiano origen del BIH con una incertidumbre de 0."005.

Eje OY Completa un sistema cartesiano ortogonal orientado positivamente.

Asociado al sistema cartesiano se considera un sistema de coordenadas geodésicas definidas por un elipsoide de revolución cuyo centro y eje de revolución coinciden respectivamente con el origen de coordenadas y eje OZ.

REALIZACIÓN PRÁCTICA.

Es importante distinguir entre la definición del sistema de coordenadas y su realización práctica mediante un marco de referencias. Las dos cosas juntas definen un sistema de referencia. El marco de referencias lo constituye un conjunto consistente de coordenadas de puntos materializados en la superficie terrestre. A partir del marco de referencias se infiere la localización del origen de coordenadas, la orientación del triedro cartesiano y la escala. La tabla siguiente define el marco de referencia del sistema WGS 84 G873 1997.0

WGS 84 Station Set G873: Cartesian Coordinates*, 1997.0 Epoch

Station Location	NIMA Station Number	X (km)	Y (km)	Z (km)
<u>Air Force Stations</u>				
Colorado Springs	85128	-1248.597221	-4819.433246	3976.500193
Ascension	85129	6118.524214	-1572.350829	-876.464089
Diego Garcia(<2 Mar 97)	85130	1917.032190	6029.782349	-801.376113
Diego Garcia(>2 Mar 97)	85130	1916.197323	6029.998996	-801.737517
Kwajalein	85131	-6160.884561	1339.851686	960.842977
Hawaii	85132	-5511.982282	-2200.248096	2329.481654
<u>NIMA Stations</u>				
Australia	85402	-3939.181976	3467.075383	-3613.221035
Argentina	85403	2745.499094	-4483.636553	-3599.054668
England	85404	3981.776718	-89.239153	4965.284609
Bahrain	85405	3633.910911	4425.277706	2799.862677
Ecuador	85406	1272.867278	-6252.772267	-23.801890
US Naval Observatory	85407	1112.168441	-4842.861714	3985.487203
China	85409	-2148.743914	4426.641465	4044.656101

*Coordinates are at the antenna electrical center.

Comparándolas con un marco de referencia anterior y reducidas ambos conjuntos de coordenadas a la misma época, se obtiene:

Differences between WGS 84 (G873) Coordinates and Prior WGS 84 (G730) Coordinates
Being Used in Orbital Operations * (Compared at 1994.0 Epoch)

Station Location	NIMA Station Number	Δ East (cm)	Δ North (cm)	Δ Ellipsoid Height (cm)
<u>Air Force Stations</u>				
Colorado Springs	85128	0.1	1.3	3.3
Ascension	85129	2.0	4.0	-1.1
Diego Garcia(<2 Mar 97)	85130	-3.3	-8.5	5.2
Kwajalein	85131	4.7	0.3	4.1
Hawaii	85132	0.6	2.6	2.7
<u>NIMA Stations</u>				
Australia	85402	-6.2	-2.7	7.5
Argentina	85403	-1.0	4.1	6.7
England	85404	8.8	7.1	1.1
Bahrain	85405	-4.3	-4.8	-8.1
Ecuador	85406	-2.0	2.5	10.7
US Naval Observatory	85407	39.1	7.8	-3.7
China	85409	31.0	-8.1	-1.5

*Coordinates are at the antenna electrical center.

NIMA (“National Imagery and Mapping Agency”)

Obsérvese las fuertes diferencias en las dos últimas estaciones de la tabla. La causa es que no estaban incluidas en el marco de referencias WGS-84 G730 y sus coordenadas para esa época proceden de un cálculo de posición. La desviación típica de los resultados del cálculo fue de unos 30 cm.

El marco de referencias inicial estaba formado por las cinco estaciones del segmento de control del NAVSTAR: Colorado Spring, Ascensión, Diego García, Kwajeleín y Hawaii. Sus coordenadas se obtuvieron por observaciones doppler sobre los satélites del sistema TRANSIT.

El código para definir estos marcos de referencia es WGS-84 Gxxx. Donde G indica GPS y xxx es la semana GPS en que este marco se empezó a utilizar para generar las efémerides precisas de los satélites por la NIMA.

Relaciones con el ITRFxx.

El marco de referencias WGS-84 G730 se comparó con el ITRF92 (“International Terrestrial Reference Frame 1992”) resultando unas discrepancias del orden del decímetro en las coordenadas comunes. Son los residuos de una transformación de semejanza de 7 parámetros. Para el sistema WGS-84 G873 y el ITRF94 las discrepancias son inferiores a 2 cm. En este caso se han comparado las efémerides precisas producidas por la NIMA y por el IGS.

Variación temporal de las coordenadas.

Como el marco de referencias tiene una exactitud subdecimétrica, en las aplicaciones geodésicas precisas es necesario tener en cuenta la variación temporal de las coordenadas. En el cuadro anterior se ha establecido la comparación entre el marco WGS-84 G873 y el marco WGS-84 G730, llevando las coordenadas del primero a la época del segundo.

Las variaciones temporales más significativas son el movimiento de las placas de la corteza terrestre y las variaciones inducidas por las mareas terrestres. El modelo que se utiliza para la tectónica de placas es el NNR-NUVEL1A y para las mareas terrestres el definido por el IERS en 1996 o posteriores.

SUPERFICIES DE REFERENCIA.

Las aplicaciones geodésicas globales requieren que se definan de una manera inequívoca tres superficies:

La **superficie topográfica** de la Tierra.

Una superficie matemática que permita una relación biunívoca entre el sistema de coordenadas cartesiano y el sistema de coordenadas geodésico correspondiente, es decir, un **elipsoide de revolución** y unos parámetros físicos que permitan modelar el campo gravitatorio terrestre sobre el elipsoide y sus proximidades.

Una equipotencial del modelo del campo gravitatorio que acompaña al sistema para relacionar los sistemas de altitudes, el **geoide** asociado al sistema de referencia.

Elipsoide WGS 84.

WGS 84 Four Defining Parameters

Parameter	Notation	Value
Semi-major Axis	a	6378137.0 meters
Reciprocal of Flattening	1/f	298.257223563
Angular Velocity of the Earth	ω	$7292115.0 \times 10^{-11}$ rad/s
Earth's Gravitational Constant (Mass of Earth's Atmosphere Included)	GM	$3986004.418 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{s}^2$

Semieje mayor del elipsoide a. Coincide con el del sistema geodésico de referencia GRS 1980.

Achatamiento f. No coincide numéricamente con el del GRS 1980. Como consecuencia del achatamiento dinámico adoptado $J_2 = C_{2,0}$ en el modelo gravitacional del sistema es diferente.

Velocidad angular de la Tierra ω . Este valor es para una Tierra standard rotando con una velocidad angular constante. Para un sistema de referencia sometido a la precesión la Unión Astronómica Internacional propone que se utilice

$$\omega' = 7292115.1467 \times 10^{-11} \text{ radians/second}$$

la velocidad angular de rotación en este sistema será:

$$\omega^* = \omega' + m$$

siendo la variación de la precesión en ascensión recta

$$m = (7.086 \times 10^{-12} + 4.3 \times 10^{-15} T_U) \text{ radians/second}$$

$$T_U = \text{Julian Centuries from Epoch J2000.0}$$

$$T_U = d_U/36525$$

$$d_U = \text{Number of days of Universal Time (UT) from Julian Date (JD) 2451545.0 UT1, taking on values of } \pm 0.5, \pm 1.5, \pm 2.5 \dots$$

$$d_U = \text{JD} - 2451545$$

Constante gravitacional de la Tierra GM. El producto GM se conoce mejor que cada uno de los factores por separado. El valor obtenido procede de las observaciones de diferentes técnicas espaciales.

WGS 84 Parameter Values for Special Applications

Parameter	Notation	Value	Accuracy (1σ)
Gravitational Constant (Mass of Earth's Atmosphere Not Included)	GM'	$3986000.9 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{s}^2$	$\pm 0.1 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{s}^2$
GM of the Earth's Atmosphere	GM_A	$3.5 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{s}^2$	$\pm 0.1 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{s}^2$
Angular Velocity of the Earth (In a Precessing Reference frame)	ω^*	$(7292115.8553 \times 10^{-11} +$ $4.3 \times 10^{-15} T_U) \text{ rad/s}$	$\pm 0.15 \times 10^{-11}$ rad/s

Constantes geométricas deducidas.

WGS 84 Ellipsoid Derived Geometric Constants

Constant	Notation	Value
Second degree Zonal Harmonic	$\overline{C}_{2,0}$	$-0.484166774985 \times 10^{-3}$
Semi-minor Axis	b	6356752.3142 m
First Eccentricity	e	$8.1819190842622 \times 10^{-2}$
First Eccentricity Squared	e^2	$6.69437999014 \times 10^{-3}$
Second Eccentricity	e'	$8.2094437949696 \times 10^{-2}$
Second Eccentricity Squared	e'^2	$6.73949674228 \times 10^{-3}$
Linear Eccentricity	E	$5.2185400842339 \times 10^5$
Polar Radius of Curvature	c	6399593.6258 m
Axis Ratio	b/a	0.996647189335
Mean Radius of Semi-axes	R_1	6371008.7714 m
Radius of Sphere of Equal Area	R_2	6371007.1809 m
Radius of Sphere of Equal Volume	R_3	6371000.7900 m

Otras constantes.

Relevant Miscellaneous Constants

Constant	Notation	Value
Velocity of Light (in a Vacuum)	c	299792458 m/s
Dynamical Ellipticity	H	1/305.4413
Universal Constant of Gravitation	G	$6.673 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg s}^2$
Earth's Principal Moments of Inertia (Dynamic Solution)	A	$8.0091029 \times 10^{37} \text{ kg m}^2$
	B	$8.0092559 \times 10^{37} \text{ kg m}^2$
	C	$8.0354872 \times 10^{37} \text{ kg m}^2$

La elipticidad dinámica $H = (A_a - C_b)/C_b$ es necesaria para determinar los momentos principales de inercia del elipsoide de referencia. Se denomina también constante de la precesión de los equinoccios. A_a y C_b son los momentos de inercia respecto a los ejes mayor y menor respectivamente. Valor IAG 1983.

Fórmula de la gravedad normal asociada al elipsoide.

El elipsoide adoptado es una equipotencial del campo gravitatorio teórico U . En la definición de U sólo intervienen las cuatro magnitudes fundamentales anteriores: a , f , GM y ω .

Gravedad sobre el elipsoide. (Fórmula de Somigliana)

$$\gamma = \gamma_e \frac{1 + k \sin^2 \phi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}}$$

$$k = \frac{b\gamma_p}{a\gamma_e} - 1$$

a , b semiejes del elipsoide

γ_e , γ_p gravedad teórica en el ecuador y el polo

e^2 cuadrado de la primera excentricidad.

ϕ latitud geodésica

Gravedad normal en el exterior del elipsoide.

Altitudes elipsoidales h pequeñas

Pueden obtenerse por prolongación analítica de la gravedad normal sobre la superficie con la ayuda del desarrollo de Taylor.

$$\gamma_h = \gamma + \frac{\partial \gamma}{\partial h} h + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \gamma}{\partial h^2} h^2$$

$$\gamma_h = \gamma \left[1 - \frac{2}{a} (1 + f + m - 2f \sin^2 \phi) \cdot h + \frac{3}{a^2} h^2 \right]$$

$$m = \frac{\omega^2 a^2 b}{GM}$$

γ es la gravedad normal sobre el elipsoide en la latitud ϕ

Para valores de h moderados las fórmulas que dan el vector gravedad normal se encuentran en cualquier libro de Geodesia física.

Constantes físicas deducidas.

Constant	Notation	Value
Theoretical (Normal) Gravity Potential of the Ellipsoid	U_0	62636851.7146 m ² /s ²
Theoretical (Normal) Gravity at the Equator (on the Ellipsoid)	γ_e	9.7803253359 m/s ²
Theoretical (Normal) Gravity at the pole (on the Ellipsoid)	γ_p	9.8321849378 m/s ²
Mean Value of Theoretical (Normal) Gravity	$\bar{\gamma}$	9.7976432222 m/s ²
Theoretical (Normal) Gravity Formula Constant	k	0.00193185265241
Mass of the Earth (Includes Atmosphere)	M	5.9733328 x 10 ²⁴ kg
$m=\omega^2 a^3 b/GM$	m	0.00344978650684

Potencial gravitatorio WGS-84 EGM96.

El potencial gravitatorio W es la suma del potencial gravitacional (atracción gravitatoria) y del potencial de la fuerza centrífuga Φ .

$$W = V + \Phi$$

$$\Phi = \omega (x^2 + y^2)/2$$

ω es la velocidad angular de rotación de la Tierra

x, y son las coordenadas geocéntricas del punto

El potencial gravitacional V (EGM96)

$$V = \frac{GM}{r} \left[1 + \sum_{n=2}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^n \bar{P}_{nm}(\sin \phi') (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \right]$$

GM constante gravitacional de la Tierra

r distancia al centro de masas de la Tierra

a semieje mayor del elipsoide WGS 84

n,m grado y orden de los armónicos esféricos

ϕ' latitud geocéntrica

λ longitud geocéntrica = longitud geodésica.

$$\begin{aligned} \bar{P}_{nm}(\sin \phi') &= \text{Funciones asociadas de Legendre normalizadas.} \\ &= \left[\frac{(n-m)!(2n+1)k}{(n+m)!} \right]^{1/2} P_{nm}(\sin \phi') \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{nm}(\sin \phi') &= \text{Funciones asociadas de Legendre.} \\ &= (\cos \phi')^m \frac{d^m}{d(\sin \phi')^m} [P_n(\sin \phi')] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_n(\sin \phi') &= \text{Polinomios de Legendre} \\ &= \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{d(\sin \phi')^n} (\sin^2 \phi' - 1)^n \end{aligned}$$

$$\left| \begin{array}{c} \bar{C}_{nm} \\ \bar{S}_{nm} \end{array} \right| = \left[\frac{(n+m)!}{(n-m)!(2n+1)k} \right]^{1/2} \left| \begin{array}{c} C_{nm} \\ S_{nm} \end{array} \right|$$

Coeficientes normalizados.

Geoide WGS-84 EGM96.

De las superficies equipotenciales de W

$$W(x,y,z) = \text{const.}$$

La más próxima al nivel medio de los mares define el geoide WGS-84. En la definición tradicional el geoide es una equipotencial del campo definido por el elipsoide que mejor se ajusta a las observaciones. Este no es el caso, hay una diferencia de 0.54 m entre el semieje mayor del elipsoide WGS-84 y el que mejor ajusta. Esto supone la existencia de una ondulación sistemática ΔN_0 .

Información disponible:

Una cuadrícula de 15' x 15' que cubre todo el mundo con los valores de la ondulación N.

Los coeficientes hasta el grado y orden 360.