

Geoposicionamiento

Por posicionamiento (www.gisdevelopment.net/tutorials/tuman004.htm) se entiende la determinación en el espacio de objetos móviles o estacionarios. Estos objetos pueden ser determinados de las formas siguientes:

- 1.- En relación a un sistema de coordenadas, generalmente tridimensional.
- 2.- En relación a otro punto, tomando uno como origen de un sistema de coordenadas locales.

El primer modo de posicionamiento se conoce como posicionamiento absoluto, el segundo como posicionado relativo. Si el objeto es estacionario, se usa el término posicionamiento estático. Cuando el objeto es móvil, se denomina posicionamiento cinemático. Generalmente, el posicionamiento estático se usa en topografía y el cinemático en navegación.

La localización de un punto, estático o móvil, en un determinado lugar del universo se puede realizar mediante la medición de distancias (en forma directa o indirecta), y ángulos al punto, respecto a un punto origen y una dirección determinada, las cuales se pueden tomar como referencia.

Generalmente, los objetos espaciales hacen referencia a un área de la Tierra y sus características. Sin embargo, pueden también hacer referencia a otros sujetos, como por ejemplo, cuerpos celestiales, temas médicos, máquinas industriales, temas arqueológicos, y muchos otros más. Todos los objetos a ser registrados deben ser localizados en forma exacta con respecto al marco de referencia adoptado. Esto es particularmente importante cuando data espacial proveniente de varias fuentes deben ser integradas en una o combinadas en formas diferentes entre ellas..

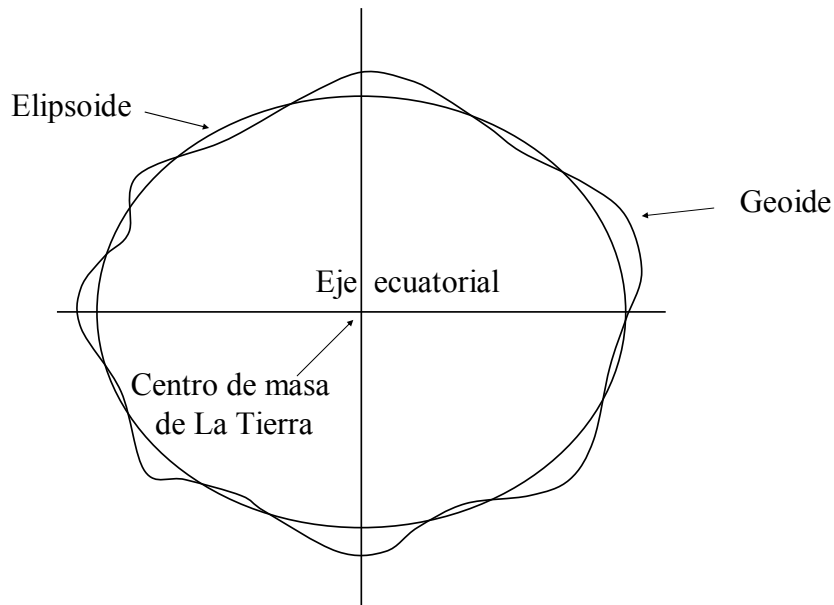
Sistemas de coordenadas.

Para la determinación de la posición del punto se utilizan los denominados *sistemas de coordenadas*, los cuales estandarizan la forma de realizar las mediciones desde la referencia al punto. Los sistemas de coordenadas constituyen un concepto fundamental asociado a los datos espaciales (Wolf, 2000), debido a su importancia para determinar la posición de puntos en topografía, fotogrametría, gis, gps, etc.

La forma de La Tierra: La Tierra y superficies de referencia.

La verdadera forma de La Tierra es el geoide, definido por vez primera en 1828 por Carl Gauss, el cual es la superficie equipotencial de los océanos en estado de reposo, prolongada en forma continua por debajo de los continentes. En cada uno de sus puntos, el vector gravedad es perpendicular a su superficie. (Datum vertical). Como esta dirección de la gravedad no tiene una distribución uniforme, se prefiere sustituirla por figuras que puedan ser expresadas en forma matemática, como la esfera y el elipsoide. el elipsoide de revolución, que gira alrededor de su eje menor:

- Esfera: primera aproximación matemática a la forma de la esfera. $R = 6370$ km.
- Elipsoide (también llamado esferoide): superficie de referencia imaginaria, resultante de la rotación de una elipse alrededor de su eje menor, conveniente para proyectar detalles de la superficie terrestre. Tiene una ecuación bien definida, basada en su definición geométrica (Datum Horizontal).

**Figura 4.**

$$\text{Achatamiento} = \frac{a - b}{a}$$

Principales elipsoides usados en el mundo

Tipo de Elipsoide	Abreviación	Semi-eje mayor (a)	Achatamiento
Airy 1830	AA	6377563.396	299.3249646
Australian National	AN	6378160	298.25
Bessel 1841	BR	6377397.155	299.1528128
Bessel 1841 (Namibia)	BN	6377483.865	299.1528128
Clarke 1866	CC	6378206.4	294.9786982
Clarke 1880	CD	6378249.145	293.465
Everest 1956 (India Nepal)	EC	6377301.243	300.8017
Everest (Pakistan)	EF	6377309.613	300.8017
GRS 1980	RF	6378137	298.257222101
Helmert 1906	HE	6378200	298.3
Hough 1960	HO	6378270	297
International 1924	IN	6378388	297
Krassovsky 1940	KA	6378245	298.3
Modified Airy	AM	6377340.189	299.3249646
South American 1969	SA	6378160	298.25
WGS 1972	WD	6378135	298.26
WGS 1984	WE	6378137	298.257223563

Elipsoides usados en Venezuela

Tipo de Elipsoide	Semi-eje mayor (a)	Semi-eje menor (b)	Achatamiento
Hayford 1909 ó Internacional 1924	6.378.388 m.	6.356.911,9 m.	1:297
Elipsoide GRS 80	6.378.137,0 m.	6.356.752,3 m.	1:298,26

El elipsoide de Hayford fue creado por el ingeniero civil y geodesta John Fillmore Hayford (1868-1925) en 1909 y fue adoptado como elipsoide internacional en la conferencia de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica que tuvo lugar en Madrid en 1924.

COORDENADAS DE LOS VERTICES LA CANOA Y LOMA QUINTANA

		COORDENADAS GEOGRÁFICAS		COORDENADAS UTM	
VERTICE	DATUM	LATITUD	LONGITUD	NORTE	ESTE
LA CANOA	LA CANOA	8° 34' 17",170	63° 51' 34",880	947.588,28	405.392,42
	LOMA QUINTANA	8° 34' 17",674	63° 51' 36",471	947.603,87	405.343,82
	DIFERENCIA	- 0",504	- 1",591	- 15,59	+ 48,60
LOMA QUINTANA	LA CANOA	10° 30' 24",274	66° 56' 1",076	1.162.197,70	762.160,02
	LOMA QUINTANA	10° 30' 24",680	66° 56' 2",515	1.162.209,90	762.116,28
	DIFERENCIA	- 0",406	- 1",436	- 12,20	+ 43,74

h La Canoa = 178,87 m

Desviación de la vertical en La Canoa: $\xi_0 = 6",37$
 $\eta_0 = -0",15$

Acimut desde La Canoa hasta el punto Farallones: $\alpha_0 = 149^\circ 11' 48",55$

Ondulación del geoide = 0 m.

Valor de la gravedad en La Canoa = 978,099 Gals.

El Datum

El datum geodésico es una representación matemática simplificada del tamaño y la forma de la Tierra, y del origen y orientación del sistema de coordenadas que se adopte para realizar el levantamiento de la superficie terrestre.

Coordenadas Geográficas

Ya que el planeta Tierra es un cuerpo que posee una rotación alrededor de su eje, resulta obvio usar su eje de rotación como datum para definir su geometría. Este eje intersecta la superficie del globo en dos puntos, los cuales son los polos de un gran círculo primario cuyo plano es perpendicular al eje. El gran círculo primario es el ecuador y sus polos geográficos son el polo norte y el polo sur. Los círculos secundarios al ecuador están conformados por dos semicírculos, uno de los cuales recibe el nombre de meridiano, y su complementario el de antimeridiano.

Para medir distancias sobre la superficie de la esfera, se utiliza un sistema de coordenadas polares tridimensionales cuyo origen se encuentra en el centro de la esfera.

Meridianos: secciones elípticas producidas por la intersección del elipsoide por cualquier plano que contiene el eje de revolución de La Tierra.

Paralelos: secciones circulares producidas por la intersección del elipsoide con planos perpendiculares al eje de revolución.

Latitud (ϕ): valor angular que forma el plano del Ecuador con la normal del elipsoide en el punto considerado.

Longitud (λ): valor angular entre dos planos meridianos (Greenwich). Las longitudes se miden de 0° a 180° a uno y otro lado del meridiano origen, añadiendo la denominación Este o positiva u Oeste o negativa, según se cuente en uno u otro sentido.

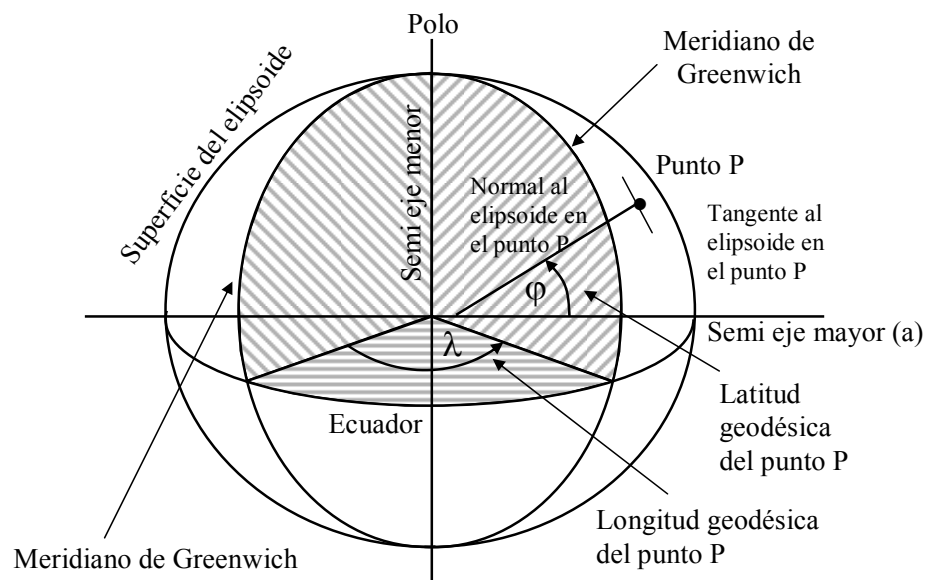


Figura 5.

SISTEMAS DE PROYECCIÓN CARTOGRÁFICOS

Cuadrículas

Para simplificar el uso de mapas, los cartógrafos superponen sobre el mapa una cuadrícula rectangular consistente en dos tipos de líneas rectas, paralelas y uniformemente espaciadas, cada tipo de línea perpendicular al otro. Esta cuadrícula permite que cualquier punto sobre el mapa pueda ser identificado por sus coordenadas geográficas o por sus coordenadas de cuadrícula, de modo de tener doble sistema de

referencia. En estos mapas se identifica el sistema de proyección utilizado en su construcción.

Que es un mapa topográfico

Bien sea sobre un papel o sobre un monitor de un computador, un mapa es la mejor herramienta disponible para catalogar y observar la distribución de los diferentes elementos que conforman la superficie terrestre. Mapas de diferentes tipos carreteras, políticos, uso de la tierra etc, sirven para propósitos diferentes.

Uno de los tipos de mapas mas utilizados es el mapa topográfico o mapa base. La característica que distingue a estos mapas es el uso de curvas de nivel, las cuales permiten determinar el relieve y las elevaciones del terreno, mediante la representación tridimensional sobre una superficie plana.

Generalmente, los mapas topográficos representan características tanto naturales como de construcción humana. Ellos representan y nombran accidentes naturales tales como montañas, valles, llanuras, lagos, ríos y vegetación. También identifican objetos hechos por el hombre tales como carreteras, límites, líneas de transmisión y otras obras importantes.

El ancho rango de información que contienen los mapas topográficos los hacen indispensables para aplicaciones tanto profesionales como recreativas. En el primer caso tenemos las aplicaciones en ingeniería, explotación energética, conservación de recursos naturales, manejo ambiental, proyectos de obras públicas, comerciales y residenciales etc. En el caso de recreación, tenemos su uso en montañismo, pesca etc.

La forma mas conveniente para identificar puntos sobre la superficie terrestre es mediante un sistema de coordenadas geográficas formada por líneas de referencia llamadas paralelos de latitud y meridianos de longitud. De esta forma un punto sobre la superficie terrestre queda determinado por su latitud φ y su longitud λ .

Cuando se debe representar una superficie de la Tierra que sobrepase una determinada extensión, la proyección topográfica resulta inadecuada para su representación, debido a los errores que ocasiona la esfericidad de la Tierra. En estos casos, es preciso recurrir a la cartografía.

Las proyecciones cartográficas son transformaciones sistemáticas que permiten la representación metódica de la retícula esférica de la Tierra sobre un plano. Desde un punto de vista matemático, las proyecciones cartográficas son transformaciones de coordenadas geográficas (latitud, longitud) al sistema de coordenadas cartesiano (x , y) según la forma:

$$x = f_1(\varphi, \lambda), \quad y = f_2(\varphi, \lambda)$$

Donde:

φ es la latitud geográfica, λ la longitud geográfica

x y y son las coordenadas rectangulares en el plano de proyección.

Algunas proyecciones pueden ser construidas geométricamente, pero todas las proyecciones pueden ser representadas por ecuaciones matemáticas que convierten las coordenadas geográficas en cartesianas. Sin embargo, no se puede realizar la representación de la geometría esférica sobre un plano sin que aparezca algún tipo de distorsión.

La retícula de la Tierra, expresada en paralelos y meridianos, posee las propiedades siguientes:

Todos los paralelos son paralelos entre sí.

Los paralelos están igualmente espaciados a lo largo de los meridianos.

Los meridianos están espaciados igualmente a lo largo los paralelos.

Los meridianos de longitud son la mitad de grandes círculos y convergen en los polos.

Los meridianos y paralelos se intersectan en ángulo recto.

Los cuadriláteros que estén formados por los mismos dos paralelos y que tengan las mismas dimensiones longitudinales tienen la misma área.

La escala del área es uniforme.

La escala de la distancia es uniforme.

Estas propiedades pueden ser representadas en un plano, algunas en mejor forma que otras, dependiendo del tipo de proyección utilizado. La proyección utilizada para la realización el plano dependerá entonces de cuales propiedades deben ser representadas correctamente en el plano, y cuales pueden presentar distorsión.

La clasificación de las proyecciones cartográficas se hacen con el objeto de facilitar su estudio. Pueden ser divididas de acuerdo a la posición y forma de la retícula, y también e acuerdo a las distorsiones que presenten.

TRANSFORMACION DE COORDENADAS GEODESICAS – UTM

La proyección Mercator

La proyección Mercator recibe su nombre de su creador, el cartógrafo flamenco Gerhard Kremer, cuyo nombre en latín era Gerhardus Mercator.

La ventaja de esta proyección, cuyo primer mapa fue publicado en 1569, y por la cual se hizo popular entre los navegantes, radica en su condición de conformidad, por lo que se pueden definir rumbos sobre el mapa, directamente con el compás.

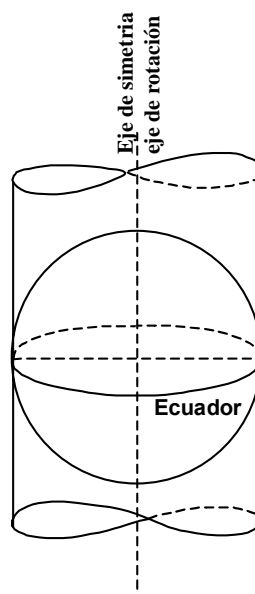


Figura 6. Esquema de la proyección Mercator.

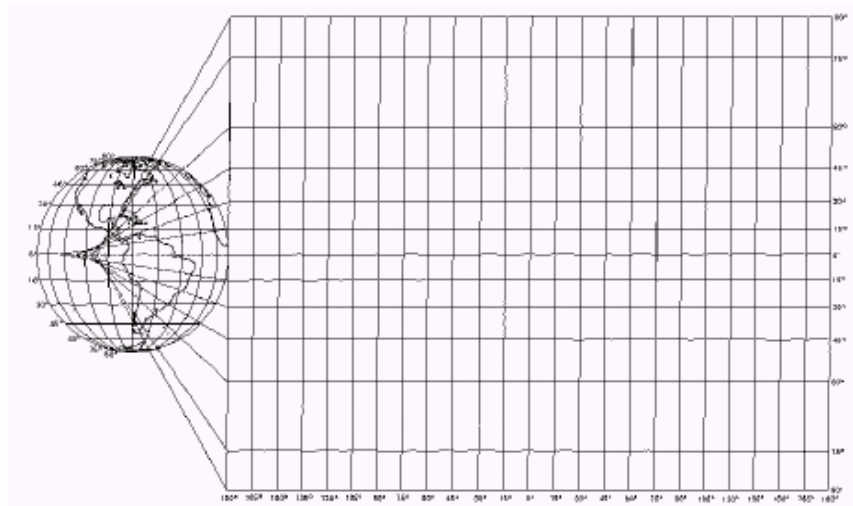


Figura 7. Proyección Mercator. (tomado de DMA Technical Manual 8358.2)

La proyección Mercator Transversal

La proyección UTM fue desarrollada por Johann H. Lambert en 1772 y derivada analíticamente por Carl F. Gauss 50 años después; en 1912, L. Krüger desarrolló fórmulas mejor adaptadas al calculo. La proyección transversal mercator es la proyección mercator rotada 90°,

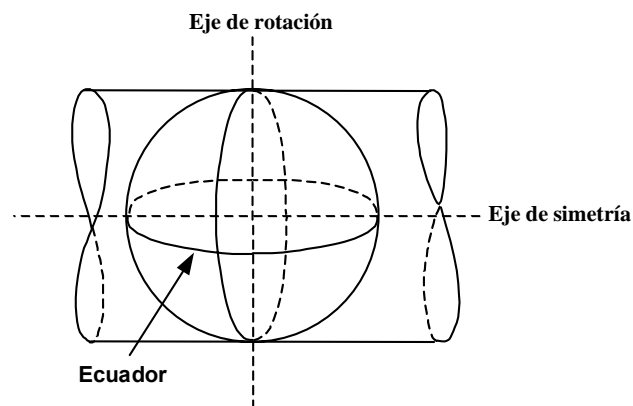


Figura 8. Esquema de la proyección Mercator Transversal.

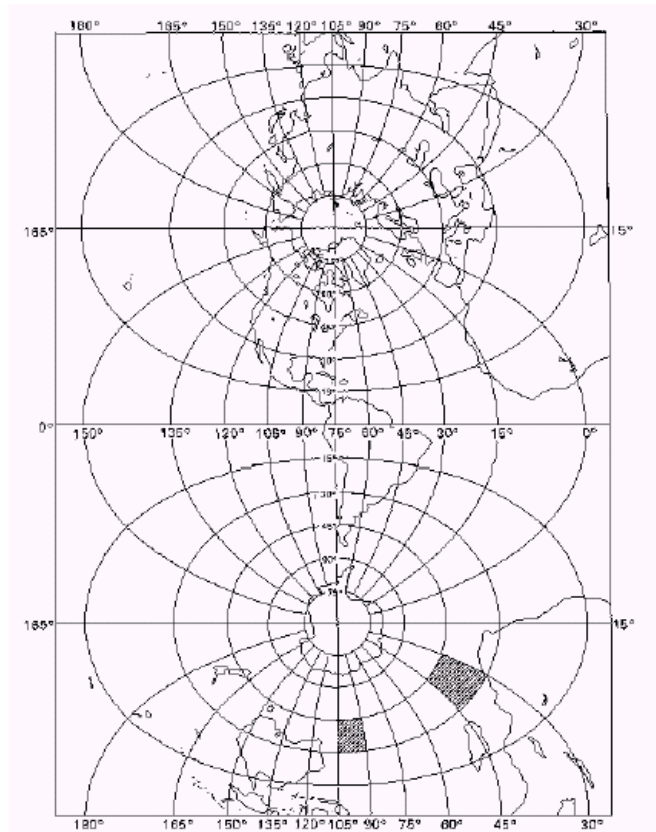


Figura 9. proyección Mercator Transversal. (tomado de DMA Technical Manual 8358.2)

La proyección UTM (Proyección Mercator Transversal Universal)

La proyección UTM es en principio idéntica a la Mercator transversal, pero en este caso la proyección se realiza en zonas estrechas (cada 6° de longitud), para minimizar la distorsión.

Esta proyección, establecida en 1936 por la IUGG (Internacional Union of Geodesy and Geophysics), fue introducida por el ejército estadounidense en 1947 y adoptada rápidamente por la mayoría de los países. La proyección UTM emplea cinco diferentes tipos de elipsoides, para diferentes zonas del planeta. El elipsoide internacional o de Hayford es usado por la mayoría de los países del globo. El elipsoide de Clarke 1866 se aplica en África. El Clarke 1880 se utiliza en América del Norte y los elipsoides Everest y Bessel se emplean en algunos países del sur y el sureste de Asia.

La proyección UTM es la versión de Gauss-Krüger de la proyección transversal de Mercator, hecha para cubrir al planeta desde los 84° de latitud norte hasta los 80° de latitud sur.

Sus principal ventaja radica en el hecho de que es una proyección que provee una georreferenciación precisa y que es usada en la mayoría de países del mundo.

Como desventaja se tiene la diferencia de coordenadas en el área de superposición entre dos zonas o husos adyacentes, lo que obliga a conocer a que huso pertenecen las coordenadas del mapa.

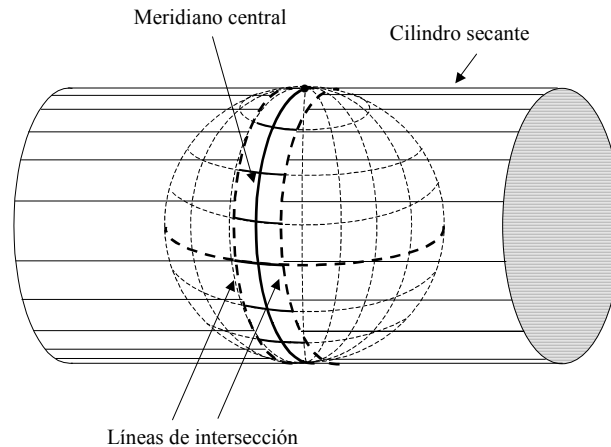


Figura 10. Esquema de la proyección UTM.

Las características más importantes de este sistema son las siguientes:

Cada zona tiene una extensión de 6° en longitud lo que da un total de 60 zonas; la primera zona se ubica en el meridiano 180° , y las sucesivas zonas (para un total de 60), se van desplazando hacia el este, siendo el meridiano central de la zona uno el 177°W . Venezuela está cubierta por las zonas: 18 (meridiano central 75°W), 19 (meridiano central 69°W) y 20 (meridiano central 63°W).

Cada zona se extiende desde los 84° latitud norte hasta los 80° grados de latitud sur. Inicialmente estos valores iban desde los 80°N hasta los 80°S , pero el hecho de contar con una superficie importante por encima de los 80° , determinó su extensión en 4 grados más.

La coordenada Y coincide con el meridiano central de la zona.

Cada columna se divide en cuadriláteros de 8° de latitud. A estas bandas se les asigna las letras C a X, en forma ascendente desde los 80° de latitud sur.

Cada cuadrilátero queda identificado por el número de la zona y la letra de la banda.

Las coordenadas norte tienen su origen en el ecuador; sin embargo, para evitar valores negativos para los nortes del hemisferio sur, se les suma el valor de 10.000.000.

El origen de la coordenada norte de cada zona es el punto sobre el ecuador donde su meridiano central lo intersecta.

Se asigna un valor de 500.000 para el este de cada meridiano central.

El factor de escala del meridiano central tiene un valor de 0,9996.

Es un sistema métrico, por lo que la unidad de medida es el metro.

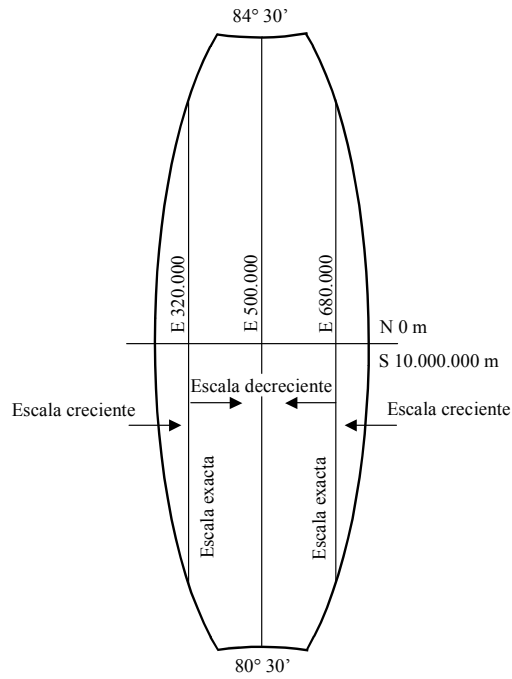


Figura 11. Esquema de zona UTM.

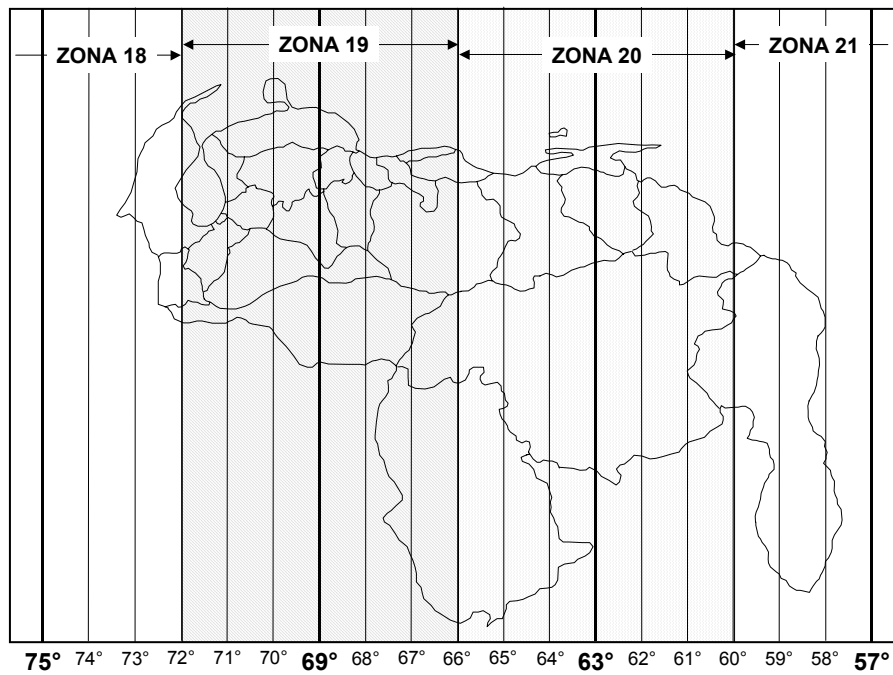


Figura 12. Zonas UTM en Venezuela.

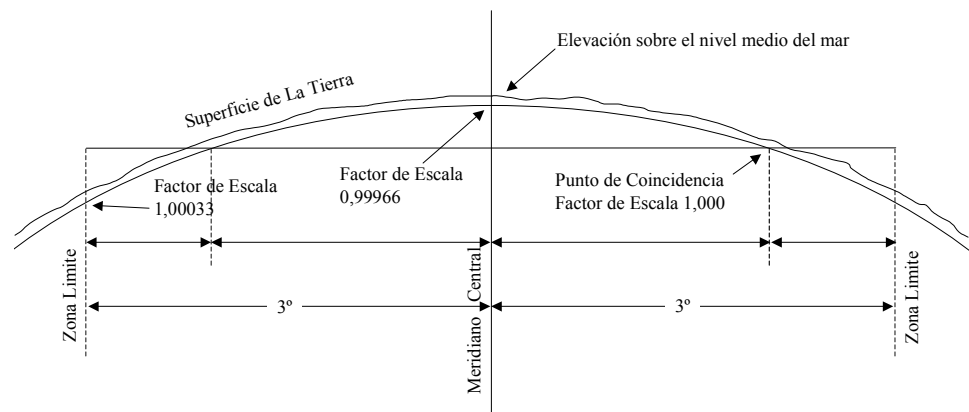


Figura 13. Corte por un paralelo de la proyección UTM

Para determinar el huso en el que se encuentra una determinada longitud, se usa la fórmula:

$$Zona = \text{entero}\left(\frac{180 - \lambda}{6}\right) + 1$$

La forma de expresar una coordenada UTM es:

Este =

Norte =

Huso 19 Zona P

Datum La Canoa

Una variación de la proyección UTM es la proyección MTM (Modified Transversal Mercator), donde la proyección se realiza en bandas de 3°, en lugar de 6°. Esto permite mejorar el factor de escala de 0,9996 (1/2.500) a 0,9999 (1/10.000).

TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS

Términos usados para calcular las ecuaciones generales de Gauss-Kruger, adaptadas por Redfearn:

Parámetros del esferoide

a = semi-eje mayor.

b = semi-eje menor.

$$f = \text{aplanamiento} = \frac{a - b}{a}$$

$$e^2 = \text{primera excentricidad} = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$$

$$e'^2 = \text{segunda excentricidad} = \frac{a^2 - b^2}{b^2} = \frac{e^2}{1 - e^2} = \frac{f(2 - f)}{(1 - f)^2}$$

$$n = \frac{a - b}{a + b} = \frac{f}{2 - f}$$

ρ = radio de curvatura en el meridiano.

$$\rho = \frac{a(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}}$$

v = Radio de curvatura en la primera vertical.

$$v = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}} = \rho(1 + e'^2 \cos^2 \varphi)$$

S = arco meridional, la verdadera distancia meridional sobre el elipsoide, desde el ecuador.

Siendo S :

$$S = \int_0^\varphi \sqrt{E} d\varphi = \int_0^\varphi M d\varphi$$

El resultado de S se obtiene por serie, cuyo valor final es el siguiente:

$$S = a \left[\left(1 - \frac{e^2}{4} - \frac{3e^4}{64} - \frac{5e^6}{256}\right)\varphi - \left(\frac{3e^2}{8} + \frac{3e^4}{32} + \frac{45e^6}{1024}\right)\text{sen}2\varphi + \left(\frac{15e^2}{256} + \frac{45e^6}{1024}\right) - \left(\frac{35e^6}{3072}\right)\text{sen}6\varphi \right]$$

Pudiéndose escribir de la forma:

$$S = A' \times \varphi - B' \times \text{sen}(2\varphi) + C' \times \text{sen}(4\varphi) - D' \times \text{sen}(6\varphi) + E' \times \text{sen}(8\varphi)$$

Donde, según valores para elipsoide internacional:

$$A' = 6.367.654,500058$$

$$B' = 16.107,034678$$

$$C' = 16,976211$$

$$D' = 0,022266$$

$$E' = 0,000032$$

Parámetros de la proyección UTM

φ = latitud.

λ = longitud.

φ' = latitud al pie de la perpendicular al punto desde el meridiano central.

λ_0 = longitud del meridiano central de la proyección.

$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$

k_0 = factor de escala central.

k = factor de escala en el punto de la proyección.

FN = falso norte

FE = falso este (500.000)

E = este de la retícula.

N = norte de la retícula.

C = convergencia de meridianos.

Cálculo de coordenadas UTM a partir de coordenadas geográficas

$$N = (I) + (II)p^2 + (III)p^4 + A_6p^6$$

$$E = (IV)p + (V)p^3 + B_5p^5$$

$$\text{Para el sur del ecuador } N = 10.000.000 - [(I) + (II)p^2 + (III)p^4 + A_6p^6]$$

Los coeficientes son:

$$I = T1 = S k_0$$

$$II = (T2 \text{ sen}^2(1'') \times 10^8)$$

$$III = (T3 \text{ sen}^4(1'') \times 10^{16})$$

$$IV = (T6 \text{ sen}(1'') \times 10^4)$$

$$V = (T7 \text{ sen}^3(1'') \times 10^{12})$$

$$A_6 = (T4 \text{ sen}^6(1'') \times 10^{24})$$

$$B_5 = (T8 \text{ sen}^5(1'') \times 10^{20})$$

Los términos son:

$$T1 = S \times k_0$$

$$T2 = \frac{v \text{ sen}(\varphi) \cos^5(\varphi) k_0}{2}$$

$$T3 = \frac{v \text{ sen}(\varphi) \cos^5 \varphi k_0}{24} (5 - \tan^2(\varphi) + 9e'^2 \cos^2(\varphi) + 4e'^4 \cos^4(\varphi))$$

$$T4 = \frac{v \text{ sen}(\varphi) \cos^5(\varphi) k_0}{720} (61 - 58 \tan^2(\varphi) + 270e'^2)$$

$$T6 = v \cos(\varphi) k_0$$

$$T7 = \frac{v \cos^3(\varphi) k_0}{6} (1 - \tan^2(\varphi) e'^2 \cos^2(\varphi))$$

$$T8 = \frac{v \cos^5 \varphi k_0}{120} \left(5 - 18 \tan^2 \varphi + \tan^4 \varphi + 14e'^2 \cos^2 \varphi - 58 \tan^2 \varphi e'^2 \cos^2 \varphi + 13e'^4 \cos^4 \varphi \right. \\ \left. + 4e'^6 \cos^6 \varphi - 64 \tan^2 \varphi e'^4 \cos^4 \varphi - 24 \tan^2 \varphi e'^5 \cos^6 \varphi \right)$$

Cálculo de coordenadas geográficas a partir de coordenadas UTM

$$\varphi = \varphi' - (\text{VII})q^2 + (\text{VIII})q^4 - D_6q^6$$

$$\lambda = (\text{IX})q - (\text{X})q^3 + E_5q^5$$

$\lambda = \lambda_0 \pm \Delta\lambda$ donde es la longitud del origen de la proyección (meridiano central).

$$\varphi' = \bar{N} + \bar{\beta}\text{sen}2\bar{N} + \bar{\gamma}\text{sen}4\bar{N} + \bar{\delta}\text{sen}6\bar{N} + \bar{\epsilon}\text{sen}8\bar{N}$$

$$\bar{N} = \frac{N}{\bar{\alpha}}$$

Los términos de φ' son:

$$\bar{\alpha} = \frac{a+b}{2} \left(1 + \frac{1}{4}n^2 + \frac{1}{64}n^4 + \dots \right)$$

$$\bar{\beta} = \frac{2}{3}n - \frac{27}{32}n^3 + \frac{269}{512}n^5 + \dots$$

$$\bar{\gamma} = \frac{21}{16}n^2 - \frac{55}{32}n^4 + \dots$$

$$\bar{\delta} = \frac{151}{96}n^3 - \frac{417}{128}n^5 + \dots$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{1097}{512}n^5 + \dots$$

$$\text{para } n = \frac{a-b}{a+b}$$

Los coeficientes son:

$$\text{VII} = (T10/\text{sen}1'') \times 10^{12}$$

$$\text{VIII} = (T11/\text{sen}1'') \times 10^{24}$$

$$\text{IX} = (T14/\text{sen}1'') \times 10^6$$

$$\text{X} = (T15/\text{sen}1'') \times 10^{18}$$

$$D6 = (T12/\text{sen}1'') \times 10^{36}$$

$$E5 = (T16/\text{sen}1'') \times 10^{30}$$

Los términos son:

$$T10 = \frac{\tan\varphi}{2\rho\rho k^2}$$

$$T11 = \frac{\tan\varphi'}{24\rho^4 k^4} (5 + 3\tan^2\varphi' + e'^2 \cos^2\varphi' - 4e'^4 \cos^4\varphi' - 9\tan^2\varphi' e'^2 \cos^2\varphi')$$

$$T12 = \frac{\tan \varphi'}{720\rho\nu^5\text{ko}^6} \left(\begin{array}{l} 61 + 90\tan^2 \varphi' + 46e'^2 \cos^2 \varphi' + 45\tan^4 \varphi' - 252\tan^2 \varphi' e'^2 \cos^2 \varphi' - 3e'^2 \cos^4 \varphi' \\ + 100e'^6 \cos^6 \varphi' - 66\tan^2 \varphi' e'^4 \cos^4 \varphi' - 90\tan \varphi' e'^2 \cos^2 \varphi' + 88e'^8 \cos^8 \varphi' \\ + 225\tan^4 \varphi' e'^4 \cos^4 \varphi' + 84\tan^2 \varphi' e'^6 \cos^6 \varphi' - 192\tan^2 \varphi' e'^8 \cos^8 \varphi' \end{array} \right)$$

$$T14 = \frac{1}{\nu \cos \varphi' \text{ko}}$$

$$T15 = \frac{1}{6\nu^3 \cos \varphi' \text{ko}^3} (1 + 2 \tan^2 \varphi' + e'^2 \cos^2 \varphi')$$

$$T16 = \frac{1}{120\nu^5 \cos \varphi' \text{ko}^5} \left(\begin{array}{l} 5 + 6e'^2 \cos^2 \varphi' + 28 \tan^2 \varphi' - 3e'^4 \cos^4 \varphi' + 8 \tan^2 \varphi' e'^2 \cos^2 \varphi' \\ + 24 \tan^4 \varphi' - 4e'^6 \cos^6 \varphi' + 4 \tan^2 \varphi' e'^4 \cos^4 \varphi' + 24 \tan^2 \varphi' e'^6 \cos^6 \varphi' \end{array} \right)$$

Cálculo de la convergencia para coordenadas UTM

$C = (\text{XII})p + (\text{XIII})p^3 + C_5 p^5$, para coordenadas geográficas.

$C = (\text{XV})q - (\text{XVI})q^3 + F_5 q^5$, para coordenadas reticulares.

Los coeficientes son:

$$\text{XII} = (T18) \times 10^4$$

$$\text{XIII} = (T19 \text{sen}^2 1'') \times 10^{12}$$

$$\text{XV} = (T22/\text{sen} 1'') \times 10^6$$

$$\text{XVI} = (T23/\text{sen} 1'') \times 10^{18}$$

$$C_5 = (T20 \text{sen}^4 1'') \times 10^{20}$$

$$F_5 = (T24/\text{sen}(1'')) \times 10^{30}$$

Los términos son:

$$T18 = \text{sen} \varphi$$

$$T19 = \frac{\text{sen} \varphi \cos^2 \varphi}{3} (1 + 3e'^2 \cos^2 \varphi + 2e'^4 \cos^4 \varphi)$$

$$T20 = \frac{\text{sen} \varphi \cos^4 \varphi}{15} \left(\begin{array}{l} 2 - \tan^2 \varphi + 15e'^2 \cos^2 \varphi + 35e'^4 \cos^4 \varphi - 15 \tan^2 \varphi e'^2 \cos^2 \varphi + 33e'^6 \cos^6 \varphi \\ - 50 \tan^2 \varphi e'^4 \cos^4 \varphi + 11e'^8 \cos^8 \varphi - 60 \tan^2 \varphi e'^6 \cos^6 \varphi - 24 \tan^2 \varphi e'^8 \cos^8 \varphi \end{array} \right)$$

$$T22 = \frac{\tan \varphi'}{\nu \text{ko}}$$

$$T23 = \frac{\tan \varphi'}{3\nu^3 \text{ko}^3} (1 + \tan^2 \varphi' - e'^2 \cos^2 \varphi' - 2e'^4 \cos^4 \varphi')$$

$$T24 = \frac{\tan \varphi'}{15v^5 k o^5} \left(\begin{array}{l} 2 + 5 \tan^2 \varphi' + 2e' \cos^2 \varphi' + 3 \tan^4 \varphi' + \tan^2 \varphi' e'^2 \cos^2 \varphi' + 9e'^4 \cos^4 \varphi' + 20e'^6 \cos^6 \varphi' \\ - 7 \tan^2 \varphi' e'^4 \cos^4 \varphi' - 27 \tan^2 \varphi' e'^6 \cos^6 \varphi' + 11e'^8 \cos^8 \varphi' - 24 \tan^2 \varphi' e'^8 \cos^8 \varphi' \end{array} \right)$$

Cálculo de la corrección de escala para coordenadas UTM

$k = k_0[1 + (XX)p^2 + (XXI)p^4]$, para coordenadas geográficas.

$k = k_0[1 + (XVIII)p^2 + (XIX)p^4]$, para coordenadas reticulares.

$$k_0 = 0,9996$$

$$p = 0,0001$$

$$q = 0,000001E \text{ donde } E = E - FE \text{ (FE = Este Falso)}$$

Los coeficientes son:

$$XX = (T26 \text{ sen}^2 1'') \times 10^8$$

$$XXI = (T27 \text{ sen}^4 1'') \times 10^{16}$$

$$XVIII = (T29 \times 10^{12})$$

$$XIX = (T30 \times 10^{24})$$

Los términos son:

$$T26 = \frac{\cos^2 \varphi}{2} (1 + e'^2 \cos^2 \varphi)$$

$$T27 = \frac{\cos^4 \varphi}{24} \left(\begin{array}{l} 5 - 4 \tan^2 \varphi + 14e'^2 \cos^2 \varphi + 13e'^4 \cos^4 \varphi - 28 \tan^2 \varphi e'^2 \cos^2 \varphi + 4e'^6 \cos^6 \varphi \\ - 48 \tan^2 \varphi e'^4 \cos^4 \varphi - 24 \tan^2 \varphi e'^6 \cos^6 \varphi \end{array} \right)$$

$$T29 = \frac{1}{2v^2 k o^2} (1 + e'^2 \cos^2 \varphi')$$

$$T30 = \frac{1}{24v^4 k o^4} (1 + 6e'^2 \cos^2 \varphi' + 9e'^4 \cos^4 \varphi' + 4e' \cos \varphi' - 24 \tan^2 \varphi' e'^4 \cos^4 \varphi' - 24 \tan^2 \varphi' e'^6 \cos^6 \varphi')$$

Bibliografía

Defense Mapping Agency. 1986. Defense Mapping Agency Technical Manual 8358.1
The Universal Grids: Universal Transverse Mercator (UTM) and Universal Polar
Stereographic (UPS). Defense Mapping Agency, Fairfax, Virginia.

Defense Mapping Agency. 1986. Defense Mapping Agency Technical Manual 8358.2
The Universal Grids: Universal Transverse Mercator (UTM) and Universal Polar
Stereographic (UPS). Defense Mapping Agency, Fairfax, Virginia.

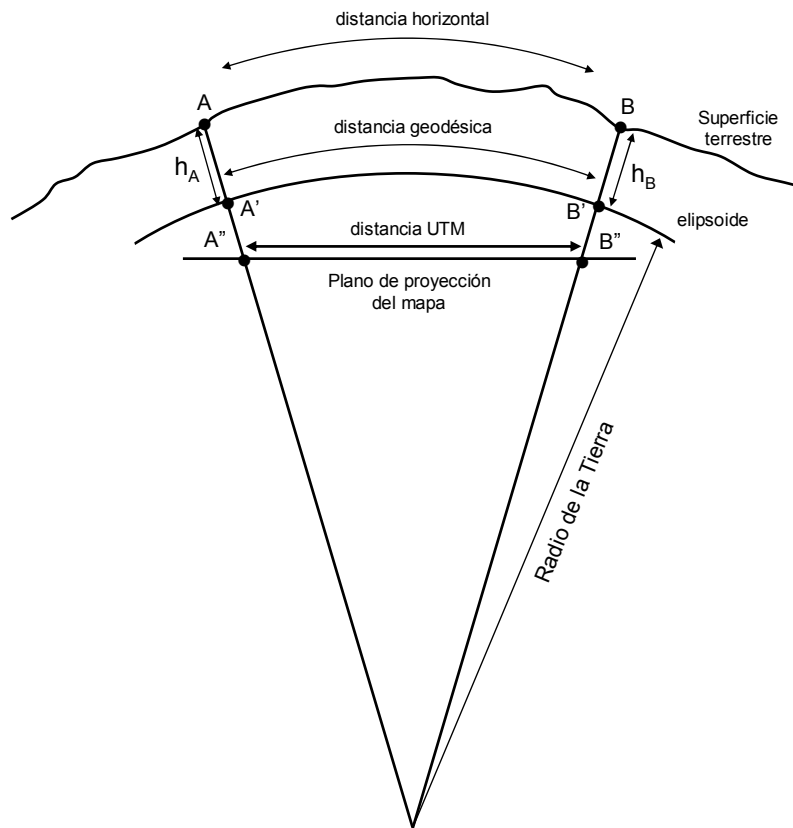
Reducción de alturas

Figura 14. Relación entre distancias horizontales, geodésicas y UTM.

Transformación de coordenadas φ, λ a X, Y, Z

$$X = (N + h)\cos\varphi \cos\lambda$$

$$Y = (N + h)\cos\varphi \sen\lambda$$

$$Z = \left(\frac{b^2}{a^2} \times N + h \right) \sen\varphi \quad \text{o también,} \quad Z = [N(1 - e^2) + h] \sen\varphi$$

$$N = \frac{a^2}{\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sen^2 \varphi}} \quad \text{o también,} \quad N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sen^2 \varphi}}$$

Transformación de coordenadas X, Y, Z a φ, λ

1.- Se calcula $p = \sqrt{X^2 + Y^2}$.

2.- Se calcula un valor aproximado de φ_0 según la fórmula :

$$\tan \varphi_0 = \frac{Z}{p} (1 - e^2)^{-1}$$

3.- Se calcula un valor aproximado de N_0 según la fórmula :

$$N_0 = \frac{a^2}{\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi_0 + b^2 \sin^2 \varphi_0}}$$

4.- Se calcula la altura elipsoidal por la fórmula:

$$h = \frac{p}{\cos \varphi_0} - N_0$$

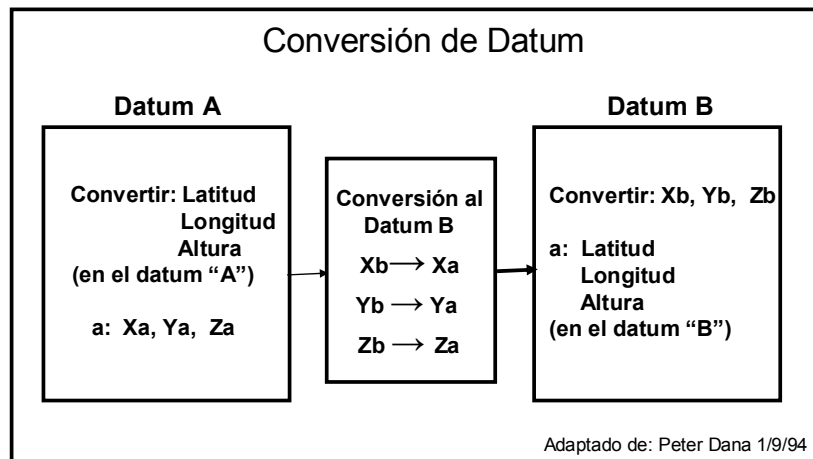
5.- Se calcula un valor mejorado de la latitud por la fórmula:

$$\tan \varphi = \frac{Z}{p} \left(1 - e^2 \frac{N_0}{N_0 + h} \right)^{-1}$$

6.- Si $\varphi = \varphi_0$ se tiene la solución. En caso contrario, se hace $\varphi_0 = \varphi$ y se continúa el cálculo a partir del paso 3.

7.- La longitud se obtiene directamente de la fórmula: $\lambda = \arctan \frac{X}{Y}$

TRANSFORMACIÓN DE DATUMS



TRANSFORMACIÓN DE DATUMS

Por resolución del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (Nº 10, del 22 de enero de 1999), publicada el 3 de marzo de 1999 en la gaceta oficial N° 36.653, el nuevo datum oficial para Venezuela es el Sistema de Referencia Geocéntrico para América del Sur (SIRGAS), del cual forma parte la Red Geodésica Venezolana (REGVEN). Este nuevo Datum se denomina SIRGAS – REGVEN. El datum anterior para Venezuela fue La Canoa – Hayford (PSAD – 56).

SIRGAS: este sistema se inició en octubre de 1993, durante una conferencia internacional en Asunción, Paraguay, auspiciado por International Association of Geodesy (IAG), la Panamerican Institute of Geodesy and History y la U.S. Defence Mapping Agency (DMA).

Los objetivos de este proyecto, definidos en este congreso fueron:

Definir un sistema de referencia para Sur América.

Establecer y mantener un marco de referencia.

Definir y establecer el datum geocéntrico para todos los países de América del Sur.

En el propio congreso se definió el primer objeto, decidiéndose lo siguiente:

El sistema de referencia SIRGAS debe coincidir con los estándares del IERS y estar referido al IERS Terrestrial Reference Frame (ITRF).

El datum geocéntrico debe estar basado en el sistema de referencia SIRGAS y los parámetros del elipsoide deben ser los del GRS 80.

Para lograr los objetivos, un total de 58 puntos en América del Sur fueron seleccionados para formar parte del sistema de referencia SIRGAS.

Modelo Molodensky abreviado

$$\Delta\varphi'' = \{-\Delta X \times \sin(\varphi) \times \cos(\lambda) - \Delta Y \times \sin(\varphi) \times \cos(\lambda_0) + \Delta Z \times \cos(\varphi) + \Delta a(R_N \times e^2 \times \sin(\varphi) \times \cos(\varphi))/a + \Delta f[R_M \times (a/b) + R_N \times (b/a)] \times \sin(\varphi) \times \cos(\lambda_0)\} \times [(R_M + h) \times \sin(1'')]^{-1}$$

$$\Delta\lambda'' = \{-\Delta X \times \sin(\lambda_0) + \Delta Y \times \cos(\lambda_0) + \Delta Z \times \cos(\varphi)\} \times [(R_M + h) \times \sin(1'')]^{-1}$$

$$\Delta h = \Delta X \times \cos(\varphi) \times \cos(\lambda_0) + \Delta Y \times \cos(\varphi) \times \sin(\lambda_0) + \Delta Z \times \sin(\varphi) - \Delta a \times (a/R_N) + \Delta f(b/a) \times R_N \times \sin^2(\varphi)$$

Donde:

$$R_M = \text{radio de curvatura en el meridiano. } R_M = a(1 - e^2)/(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}$$

$$R_N = \text{radio de curvatura en la vertical primaria. } R_N = a/(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}$$

Parámetros de transformación para pasar de La Canoa (PSAD 56) a REGVEN (WGS-84), usando la transformación que usa el método Molodensky abreviado

Parámetros oficiales PATVEN 98 para transformar Datum La Canoa (PSAD 56) a REGVEN (WGS-84) usando la transformación Bursa-Wolf. (Hoyer et al, 2001).

DX (m)	-270,933 ± 0,499
DY (m)	115,599 ± 0,499
DZ (m)	-360,226 ± 0,499
EX (")	-5,266 ± 0,743
EY (")	-1,238 ± 0,340
EZ (")	-2,381 ± 0,379
DM (PPM)	-5,109 ± 1,088
X _M (m)	2.464.351,594
Y _M (m)	-5.783.466,613
Z _M (m)	974.809,808

Las rotaciones se expresan en segundos, y debe ser convertidos a radianes para realizar el cálculo, según la forma: radianes = segundos × 4,8481368111 × 10⁻⁶.

DM (también llamada S) se expresa en partes por millón: -5,109 = 0,000005109.

Ejemplos:

Cuando se mide un punto GPS, se obtienen las siguientes coordenadas geocéntricas en el datum La Canoa:

$$X = 2038354,431 \text{ m.}$$

$$Y = -5970098,859 \text{ m.}$$

$$Z = 951153,394 \text{ m.}$$

Al hacer uso de la ecuación Molodensky-Badekas (parámetros PATVEN 98):

$$\begin{bmatrix} X_{\text{GPS}} \\ Y_{\text{GPS}} \\ Z_{\text{GPS}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{\text{La Canoa}} \\ Y_{\text{La Canoa}} \\ Z_{\text{La Canoa}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & -R_Z & R_Y \\ R_Z & M & -R_X \\ -R_Y & R_X & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\text{La Canoa}} - X_m \\ Y_{\text{La Canoa}} - Y_m \\ Z_{\text{La Canoa}} - Z_m \end{bmatrix}$$

Y reemplazar los valores:

$$\begin{bmatrix} X_{\text{GPS}} \\ Y_{\text{GPS}} \\ Z_{\text{GPS}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -270.933 \\ 115.599 \\ -360.226 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2038354,431 \\ -5970098,859 \\ 951153,394 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -5,109 \times 10^{-6} & -(-5,266) & R_Y \\ R_Z & -5,109 \times 10^{-6} & -R_X \\ -R_Y & R_X & -5,109 \times 10^{-6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2038354,431 - 2464351,594 \\ -5970098,859 - (-5783466,613) \\ 951153,394 - 974809,808 \end{bmatrix}$$

Se obtienen los valores en WGS 84:

$$X = 2038085,675 \text{ m.}$$

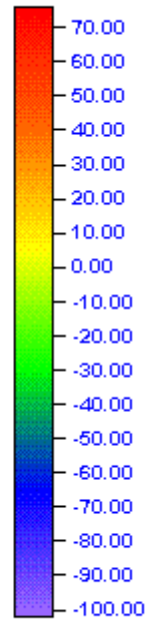
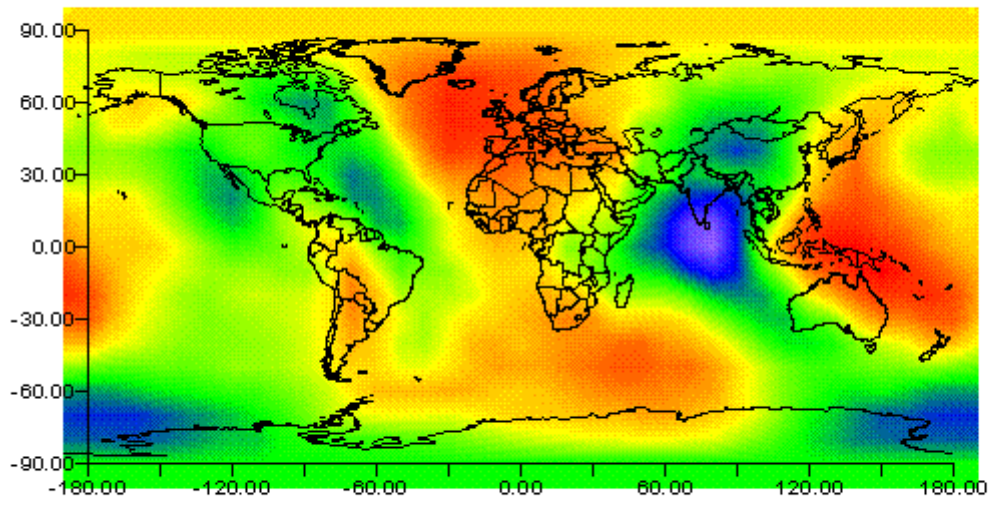
$$Y = -5969982,306 \text{ m.}$$

$$Z = 950793,289 \text{ m.}$$

Al hacer uso de la ecuación Bursa-Wolfe (parámetros PATVEN 98):

$$\begin{bmatrix} X_{\text{GPS}} \\ Y_{\text{GPS}} \\ Z_{\text{GPS}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1+M & -R_Z & R_Y \\ R_Z & 1+M & -R_X \\ -R_Y & R_X & 1+M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\text{La Canoa}} \\ Y_{\text{La Canoa}} \\ Z_{\text{La Canoa}} \end{bmatrix}$$

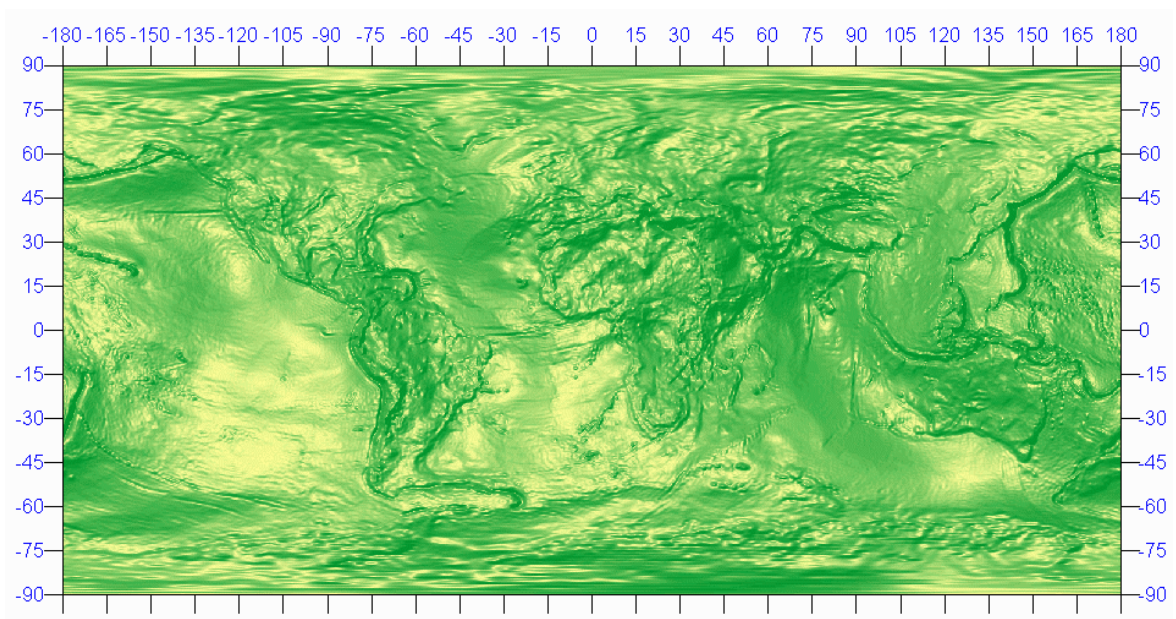
WGS-84 Geoid Height



From DMA 10 by 10 Degree Geoid Height Grid

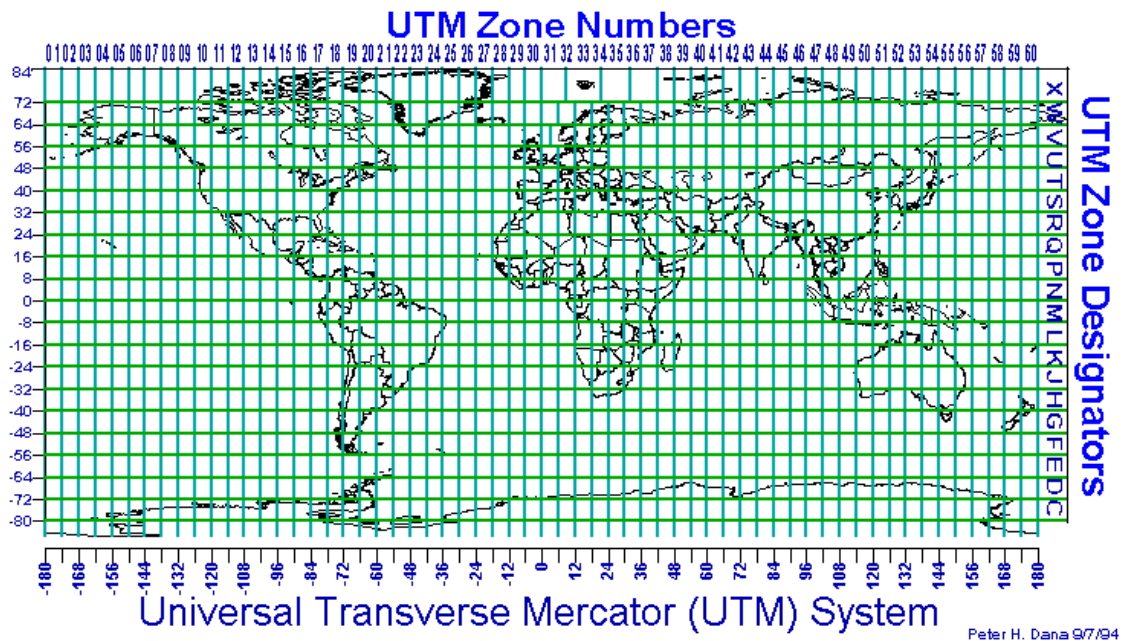
Meters

Peter H. Dana 11/05/95



National Imagery and Mapping Agency 0.25 Degree WGS-84 Geoid Model

Shaded Relief (light from 315° azimuth, 80° elevation) by Peter H. Dana 6/6/97



CURSO BÁSICO GPS

1.- GENERALIDADES

El sistema NAVSTAR-GPS (NAVigation System with Timing And Ranging Global Positioning System) es una constelación de satélites que proveen datos de navegación (posición, velocidad y tiempo) a usuarios militares y civiles alrededor del mundo. Este sistema, ya que es un proyecto de origen militar, depende del Departamento de Defensa (DoD) de los Estados Unidos, y es operado y controlado por miembros de la 50^a ala espacial, 2^{do} escuadrón de operaciones espaciales, establecida en la base Schriever (antigua base Falcon), de la fuerza aérea en Colorado. El GPS es un sistema de posicionamiento por radio y de transferencia de tiempo basado en el espacio. Está conformado por tres segmentos básicos: espacial, control y usuario. Ya que es un sistema global, el GPS posee características que no disponen otros sistemas de navegación: es sumamente exacto en la determinación de posición, velocidad y tiempo (PVT); usa un sistema de coordenadas, referido al elipsoide WGS-84, que puede ser transformado fácilmente a otro sistema local; posee capacidad de todo tiempo; provee información a un número ilimitado de usuarios en forma continua y en tiempo real; es un sistema pasivo, por lo que el usuario no puede ser detectado radialmente. El sistema Navstar GPS provee cobertura bidimensional (ϕ, λ) con tres satélites captados y cobertura tridimensional ((ϕ, λ, h) con cuatro satélites.

2.- ANTECEDENTES

Desde el primer momento en el que el hombre se inició en la navegación de altura, necesitó conocer su posición para ubicarse en el espacio y así verificar su trayectoria. La primera forma de determinación de la posición consistió en realizar mediciones angulares a las estrellas para determinar la Latitud. La determinación de la Longitud se realizaba mediante la “navegación a la estima”, que consiste en calcular la distancia recorrida basándose en la medición de la velocidad y el tiempo. Sin embargo, esta forma era sumamente imprecisa en largos viajes, hasta que en el año 1761 John Harrinson desarrolló un cronómetro lo suficientemente preciso como para determinar en forma exacta la diferencia de hora (y por lo tanto la Longitud) entre el puerto de origen y la ubicación actual.

Los primeros sistemas de posicionamiento mediante ondas de radio, surgieron durante la segunda guerra mundial, en la forma de radio faros y sus variantes (VOR, LORAN, OMEGA etc.). El potencial del espacio como plataforma para ubicar radio emisores de navegación, fue notado a partir de mediados de los años 40, cuando se iniciaron los estudios teóricos para establecer en ese lugar estaciones de radio. El lanzamiento del primer satélite artificial (Sputnik 1) el 4 de octubre de 1957, estableció la factibilidad de poner en práctica esta teoría, iniciándose inmediatamente el desarrollo de sistemas de navegación, entre los cuales destaca el Transit.

La red de satélites de navegación Transit, cuyo diseño data de 1958, se inició a el 13 de abril de 1960, con el lanzamiento de su primer satélite de navegación. Este sistema fue desarrollado principalmente para satisfacer la necesidad de otorgar a los submarinos nucleares polaris la capacidad de actualizar sus sistemas de navegación inercial. La red Transit alcanzó el estado operacional en 1962, con el lanzamiento del satélite Transit 5A y en 1967 estuvo disponible para los civiles. En 1968 23 satélites se mantenían en órbita. La constelación Transit dejó de ser usada por las fuerzas armadas de Estados Unidos en 1993 y fue retirada del servicio para civiles en el año 2000. Este sistema permitía establecer precisiones que iban desde los 100 metros para un objeto móvil que captaba un solo satélite, hasta los 5 metros para mediciones estáticas, integrando veinticinco pases de satélites.

Las limitaciones del sistema Transit (no poseía cobertura global y el lapso de tiempo de pasaje de los satélites era excesivamente largo), impulsaron el desarrollo de otros proyectos, tales como el Nova y el Timation, los cuales no fueron completados debido al surgimiento del proyecto Navstar-GPS, el cual era netamente superior. (De hecho el primero de los tres satélites Timation realizados se convirtió en prototipo de satélite GPS).

El proyecto Navstar-GPS se inició en 1973 para reemplazar al sistema Transit, y el primer lanzamiento de un satélite Block I se realizó el 22 de febrero 1978 desde la base Vanderverg, por un lanzador Atlas F. El ultimo se lanzó el 9 de octubre de 1985. El primer satélite Block II (SVN14) fue lanzado el 14 de febrero de 1989 por un lanzador Delta II, y el ultimo Block IIA fue lanzado el 3 de noviembre de 1997. Estos satélites, del block I al IIA, fueron construidos por la Boeing, en un número total de 40, de los cuales 28 correspondieron al bloque IIA. Actualmente existe la serie Block IIR, la cual será continuada por las series Block IIF y Block III. La constelación de 24 satélites se completó el 10 de marzo de 1994 con el lanzamiento del GPS 2-24 y fue declarada oficialmente completamente operacional el 17 de julio de 1995.

En forma similar que en el sistema TRANSIT, el proyecto Navstar-GPS previó la posibilidad de permitir su utilización por parte de los civiles en una forma simple y eficiente, pero permitiendo que las fuerzas armadas de Estados Unidos tuviesen el

control absoluto del sistema así como la mayor precisión en la determinación de la posición.

Por ello, se crearon dos modos de funcionamiento:

- El **Standard Positioning System (SPS)**: para ser usado por civiles.
- El **Precise Positioning System (PPS)**: reservado inicialmente al ejército de Estados Unidos, y con una precisión mayor al SPS. Actualmente puede ser usado por civiles.

Para lograr esto, se crearon dos códigos diferentes : el código C/A, para uso civil, y el código P para uso militar. Se creó también una degradación de la señal (Selective Availability, SA), que limitaba la precisión de los receptores a 100 m. Esta degradación se eliminó el 1º de mayo de 2000, si bien puede ser reactivada según las necesidades del ejército de Estados Unidos, sin previo aviso. El código P puede ser usado actualmente para usos civiles, pero este código puede ser encriptado por razones de seguridad, en cuyo caso se le conoce como código Y, el cual ya no puede ser usado por civiles.

Además del sistema GPS, existen o están previstos los siguientes sistemas de navegación:

GLONASS (ГЛОУАСС, de GLObalnaya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema)

Es el sistema ruso de navegación, iniciado en octubre de 1982 con el lanzamiento del primer satélite. Este sistema prevé ubicar 24 satélites, 21 operacionales y tres de repuesto, en tres planos orbitales con una inclinación de 64,8º a una altitud de 19.100 km. Actualmente existen 12 satélites en órbita. La razón por la que existe una pequeña cantidad de satélites operacionales a pesar del tiempo transcurrido desde el primer lanzamiento, radica en la breve vida útil de estos satélites, que es de sólo dos años. Algunos receptores GPS poseen la capacidad de recibir la señal de Glonass para usarla en conjunto con la señal GPS. El elipsoide adoptado por este sistema es el PZ – 90.

Galileo

Es la contribución europea a la siguiente generación del sistema global de navegación por satélite (GNSS-2, Global Navigation Satellite System). A diferencia del GPS y del GLONASS, el Galileo es un sistema civil y se espera que entre en servicio en el año 2009, con la puesta en órbita de 24 satélites de órbita MEO y 8 de órbita GEO.

Este sistema poseerá tres niveles de servicio:

Nivel 1: denominado OAS (Open Access Service 1), el cual es similar al SPS del GPS.

Nivel 2: denominado CAS1 (Controlled Access Service), está dedicado a aplicaciones comerciales y profesionales que requieren un nivel de servicio más elevado. Deberá pagarse una tarifa por su utilización.

Nivel 3: denominado CAS2 (Controlled Access Service 2), está dedicado a aplicaciones que requieren un nivel de seguridad tal que no pueden tolerar una interrupción o perturbación, como lo es el caso de la aviación civil. Tal como en el caso del GPS, el elipsoide adoptado es el WGS – 84.

3.- APLICACIONES

Las aplicaciones de uso civil son muy extensas, y dependen solamente del tipo de receptor que el usuario utilice, según funcione en el modo SPS o en el modo PPS; entre las aplicaciones más relevantes tenemos las siguientes:

- Navegación aérea. En este campo se utilizan receptores optimizados para la navegación aérea y pueden desplegar cartas aeronáuticas. Algunos receptores se usan en conjunto con sistemas de navegación inercial.
- Navegación terrestre. En esta rama se usan para seguimiento de rutas, para seguimiento de flotas de vehículos y para indicar posición en caso de emergencia.
- Navegación marítima. Los receptores GPS son usados para navegación por rutas marítimas así como para el atraque de los barcos.
- Soporte a grupos de rescate. Se utilizan para el guiado del rescate al sitio del siniestro. En muchas naves aéreas y marinas se instala un emisor de posición en caso de accidente, lo que facilita su rápida localización.
- Uso personal. Esta aplicación es la que utiliza los más variados tipos de GPS SPS. Los usuarios emplean los receptores para recreación, para determinar rutas de excursiones, para determinación de direcciones, etc.
- Levantamientos topográficos y geodésicos. Se utilizan receptores con alta precisión, para obtener puntos cuyas coordenadas deben ser conocidas al centímetro. Estos receptores trabajan con la onda portadora para la determinación de las distancias a los satélites.
- Levantamientos catastrales. Actualmente se están utilizando con éxito receptores GPS que poseen capacidad para realizar levantamientos GIS en tiempo real, mediante la modalidad RTK (levantamiento cinemática en tiempo real).

4.- ESTRUCTURA FISICA DEL SISTEMA GPS

El GPS está constituido por tres segmentos bien diferenciados:

- El segmento espacial
- El segmento de control
- El segmento del usuario

4.1 Segmento espacial

Está conformado por un mínimo de 24 satélites que orbitan la Tierra cada 12 horas, en seis planos orbitales, a una altitud de 20.200 km, en órbitas heliosincrónicas casi circulares, con una inclinación de 55° con respecto al ecuador. La posición de los planos orbitales, espaciados entre sí en 60°, permite que un mínimo de 4 satélites estén disponibles para el usuario, en cualquier momento que se les requiera. Sin embargo, como actualmente existen mas de 24 satélites en órbita, un mínimo de cinco satélites son disponibles. Estos satélites reciben en este sistema el nombre de SV (Space Vehicle) y transmiten continuamente señales de radio que poseen el código de identificación (PRN, Pseudo Randon Noise) del respectivo satélite. Para mantener el sincronismo del tiempo, base del funcionamiento de este sistema, cada uno posee cuatro relojes atómicos de alta precisión (del orden de 10 picosegundos).

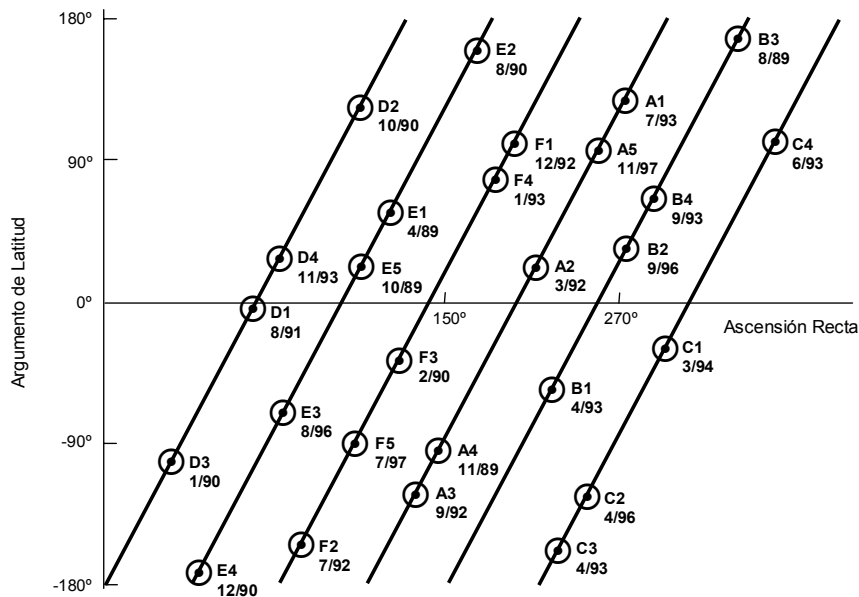


Figura 1

Características generales de los satélites

Tipo de Satélite	Fabricante	Peso (kg)	Dimensiones (1) Alto por Ancho	Cantidad	Vida útil (años)
Block I	Rockwell International	760	1,5 × 5,25	11	5
Block II	Rockwell	1.650	3,4 × 5,3	9	7,5

	International				
Block IIA	Rockwell International	1.800	3,4 × 5,3	19	7,5
Block IIR	Lockheed Martin	2.200	1,7 × 11,4	21	10
Block IIF	Boeing North American (2)	ND	2,44 × 1,97	6 + 27	15
Block III	A partir del 2009	ND	ND	ND	20

(1) Dimensiones en metros.

(2) Boeing absorbió la Rockwell International.

4.2 Segmento de control

Consiste en cinco estaciones terrestres de monitoreo, una de las cuales es la estación maestra o principal, ubicada en la base Schriever de la fuerza aérea en Colorado. Las estaciones monitorean continuamente a los satélites y envían la información captada a la estación principal, donde se calculan las efemérides y los coeficientes de corrección de reloj para cada uno de los satélites y envía estos datos a las demás estaciones, que se encargan de transmitirlos a los satélites, mediante señales en banda S (2.227,5 MHz), por lo menos una vez al día. Las antenas terrestres también transmiten comandos a los satélites y reciben su estado de salud.

4.3 Segmento del usuario

Está conformado por los diferentes tipos de receptores GPS y la comunidad de usuarios.

Los receptores GPS están diseñados para decodificar las señales transmitidas por los satélites para determinar posición, velocidad y tiempo del usuario. Para ello, los receptores deben realizar las siguientes operaciones:

- 1.- Determinar cuales son los satélites visibles.
- 2.- Adquirir las señales de los satélites visibles.
- 3.- Procesar los datos de navegación de los satélites.
- 4.- Medir los pseudorangos por código y/o por fase.

La posición es dada bien sea en coordenadas geográficas o bien en un sistema de proyección como por ejemplo UTM.

En resumen, el GPS permite al usuario:

- Conocer su posición.
- Concebir un itinerario.
- Seguir un itinerario (ruta).
- Ubicar puntos sobre un mapa

5.- BASE DEL FUNCIONAMIENTO

Los satélites GPS orbitan la Tierra cada 12 horas, conociendo en todo momento su posición exacta en el espacio, gracias al conocimiento de sus respectivas efemérides y del tiempo (4.2). Esta información es emitida continuamente en la forma de señales de navegación. Con el equipo adecuado, los usuarios pueden captar esas señales para calcular así posición, tiempo y velocidad. Estas señales son tan precisas (gracias a los

relojes atómicos que los satélites llevan a bordo), que el tiempo puede ser calculado a una millonésima de segundo, la velocidad a una fracción de kilómetro por hora y la posición en un radio de pocos metros.

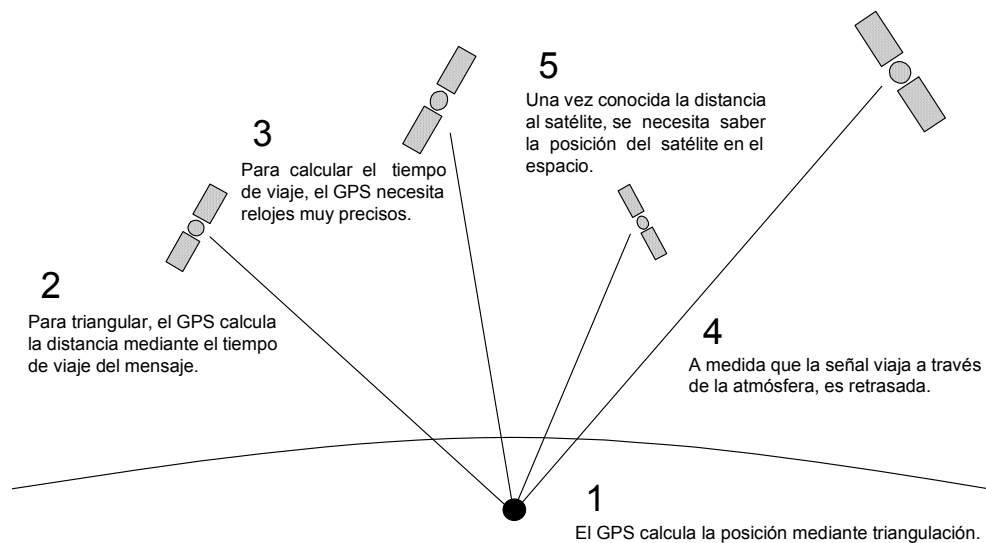


Figura 1. Posicionamiento Global: cinco principios básicos.

(Tomado y adaptado de:

www.wslfweb.org/docs/roadmap/irm/internet/dod/photos/gpspace.htm)

Para establecer la posición del usuario, el receptor GPS SPS determina el tiempo de viaje de la onda portadora mediante la correlación del código C/A. Con este tiempo, y conociendo la velocidad de la luz y el modelo de corrección atmosférico, se calculan como mínimo, las distancias a los cuatro mejores satélites que se están captando (matemáticamente se necesitan cuatro mediciones de distancia a los satélites para determinar la posición exacta). En el caso del PPS, se hace lo mismo pero usando el código P.

A continuación (o en forma paralela) se determina la posición de estos satélites, haciendo uso de los datos de la efemérides. Finalmente, conocido la anterior, se calcula la posición del usuario, mediante la aplicación de las ecuaciones:

$$\rho_1 = \sqrt{(x_1 - x_u)^2 + (y_1 - y_u)^2 + (z_1 - z_u)^2} + c\Delta t_1$$

$$\rho_2 = \sqrt{(x_2 - x_u)^2 + (y_2 - y_u)^2 + (z_2 - z_u)^2} + c\Delta t_2$$

$$\rho_3 = \sqrt{(x_3 - x_u)^2 + (y_3 - y_u)^2 + (z_3 - z_u)^2} + c\Delta t_3$$

$$\rho_4 = \sqrt{(x_4 - x_u)^2 + (y_4 - y_u)^2 + (z_4 - z_u)^2} + c\Delta t_4$$

Donde x_u, y_u, z_u son las coordenadas del usuario.

X_i, y_i, z_u son las coordenadas de los respectivos satélites.

$c\Delta t_i$ representa el error de distancia causado por el respectivo t_i .

En resumen, el GPS hace uso de la trilateración para determinar la posición del usuario, mediante:

- Medición de distancia usuario-satélite.
- Medición precisa del tiempo entre la emisión de la señal y su recepción.
- Determinación de la posición de los satélites mediante las efemérides.
- Corrección de los errores.

6.- ESTRUCTURA DE LA SEÑAL

El satélite transmite su información al receptor mediante el uso de códigos binarios, es decir, cadenas de ceros y unos, que son modulados por dos tipos de ondas portadoras, que forman parte de la banda L; esta banda es una designación que incluye aquellas frecuencias de radio comprendidas entre los 390 y los 1550 MHz.

Tabla 1. Características de la señal. (Tomada de www.gisdevelopment.net/tutorials/aerph003pf.htm)

Frecuencia de operación	L1: 1.575,42 MHz (154 f_0), lleva el mensaje de navegación y el código para la medición SPS. L2: 1.227,6 MHz (120 f_0), se usa para medir los retardos causados por la ionosfera. Se capta en la medición PPS.
Longitud de onda	L1: 19 cm. L2: 24 cm.
Potencia de la señal al usuario (0db ganancia de antena)	L1: 160 dBW (código C/A), 163 dBW (código P) L2: 166 dBW (código C/A o P)
Código C/A	Modulado por la onda portadora L1 posee una frecuencia de 1,023 MHz y se repite cada milisegundo. Este código es la base para la medición SPS.
Código P	Modulado por las frecuencias portadoras L1 y L2, posee una frecuencia de 10,23 MHz y un período de 266,4 días, truncado a una semana. Todos los satélites transmiten la misma onda pero con diferentes desfases.
Código Y	Versión encriptada del código P. Cuando se activa los usuarios civiles no tienen acceso a este código.
Data (efemérides y almanaque)	Tiene una tasa de transferencia de 50 bps, se transmite en los códigos C/A y P. Contiene información de la salud y la posición del satélite.
SA	Degradación adrede de la señal del satélite por introducción de error. Puede ser removida por corrección diferencial.
Mensaje de navegación	Información sobre reloj, órbita, salud y datos de corrección de los satélites.

La frecuencia fundamental de la onda es de 10,23 MHz. Esta frecuencia es multiplicada por 154 para obtener la onda portadora L1 y por 120 para obtener la onda portadora L2, como se indica en la siguiente figura.

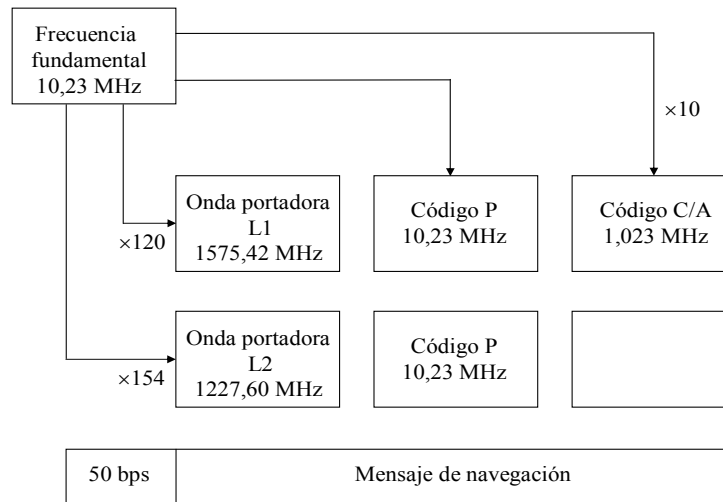


Figura 2. Frecuencias de las señales (tomado de Rizos, C. 2002)

La señal recibida por el receptor es una combinación de tres componentes: onda portadora, códigos y mensaje de navegación. Los códigos se añaden a la onda portadora mediante modulación del tipo BPSK (Binary Phase Shift Key), la cual es una técnica de adicionar una señal binaria a una onda sinusoidal. Esto se logra causando un cambio de fase de 180° cada vez que la señal pasa de 0 a 1 o de 1 a 0. El mensaje de navegaciones incorpora a la modulación anterior mediante la técnica de módulo-2, en el cual se invierten 20 códigos C/A cuando el bit del mensaje de navegación es uno, y cuando el bit es cero el código C/A se deja igual..

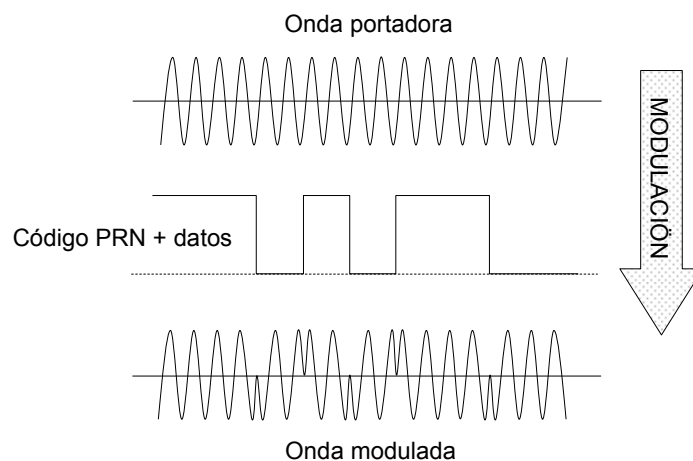


Figura 3. Modulación del tipo BPSK (Binary Phase Shift Key)

La señal modulada se conoce con el nombre de códigos de ruidos pseudo-aleatorios (PRN codes, en sus siglas en inglés), y con estos se pueden realizar dos tipos de mediciones:

- Mediciones de distancias basadas en los códigos.
- Mediciones de distancias basadas en las fases de la onda portadora.

Esta medición de distancia, con respecto al satélite que emite la señal, se conoce con el nombre de pseudo-rango. El pseudo-rango es entonces la medición de la distancia entre el satélite y el receptor en los lapsos de transmisión y recepción de las señales. El tiempo de travesía de las señales se calcula por comparación (correlación) de idénticos códigos de ruido pseudo aleatorio (PRN) generados tanto por el satélite como por el receptor por sus propios sistemas de reloj.

La ecuación general para el pseudo rango es:

$$[t_k - dt_k - (t^p + dt^p)]c = \rho_k^p + I_k^p + T_k^p$$

Donde

t_k es el tiempo del reloj del receptor.

t^p es el tiempo de los relojes del satélite.

c es la velocidad de la luz (299.792.458 m/s)

ρ es la distancia entre el receptor y el satélites en los lapsos de transmisión-recepción, dada por la fórmula:

I es el retraso ionosférico.

T es el retraso troposférico.

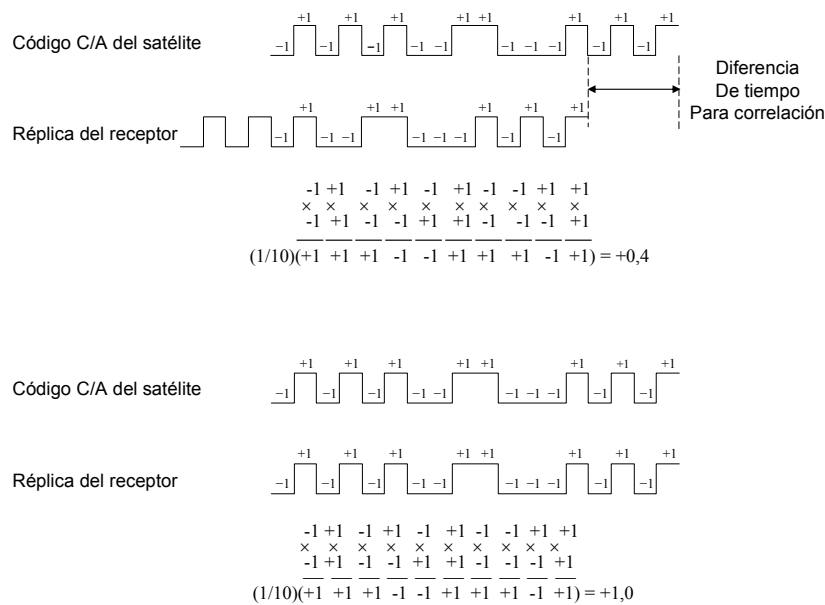


Figura 5. Correlación de códigos (adaptado de Van Sickle, 1996).

La diferencia de tiempo entre la emisión de la señal por el satélite y su recepción se determina mediante una función de correlación (figura 5), cuya forma general es:

$$\frac{1}{N} \int_0^T x(t) \times X(t - \tau) dt = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \times X_{i-j}$$

Por último, el receptor recibe el mensaje de navegación, el cual transmite los datos del almanaque, la efemérides y las correcciones de reloj, atmosféricas y estimación de la calidad de la señal.

SUBMARCOS DEL MENSAJE DE NAVEGACION

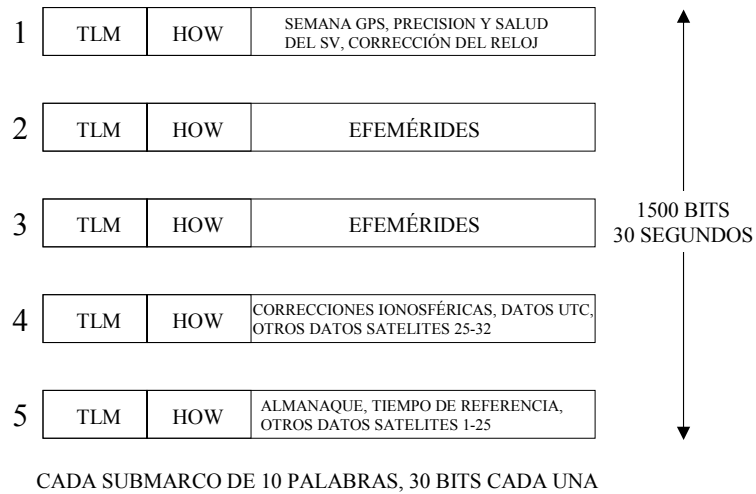


Figura 6. Mensaje de navegación (Adaptado de GPS SPS signal specification, 1995).

A continuación, se presentan los datos de almanaque para la semana cero, 20 de agosto de 1999:

```

****Week 0 almanac for PRN-01*****
ID:          01
Health:      000
Eccentricity: 4.718303680E-03
Time of Applicability(s): 61440.0000000000
Orbital Inclination(rad): 9.586805105E-01
Rate of Right Ascen(r/s): -7.726036699E-09
SQRT(A) (M^1/2): 5154.30908203125
Right Ascen at TOA(rad) 2.676403522E+00
Argument of Perigee(rad) -1.724537134E+00
Mean Anom(rad): -1.114326939E-01
Af0(s): 9.536743164E-01
Af1(s/s) 0.000000000E+00
Week: 0

```

7.- ASPECTOS DE LA PRECISIÓN GPS

Precisión [6] es el grado de conformidad que existe entre una posición, tiempo y/o velocidad determinada por un receptor GPS y su verdadera posición, tiempo y/o velocidad cuando se compara con una constante estándar. La precisión en los sistemas de radionavegación se presenta generalmente como una medición estadística del error, y es:

- **Predecible:** conociendo las distintas variables y constantes que intervienen en la medición, se puede determinar el error con anterioridad.
- **Repetible:** siempre que las condiciones de la medición se mantengan, el error será siempre el mismo.
- **Relativo:** el error de posición de un determinado usuario será el mismo que para otro usuario en diferente posición, para el mismo tiempo, si se mantienen las mismas condiciones para ambos usuarios.

En el sistema GPS, las causas de los errores se agrupan en seis categorías:

Errores orbitales o de efemérides

Son causados por calcular una posición del satélite diferente a la real.

Para determinar la posición del usuario se parte de la posición de los satélites. Estas se determinan mediante los parámetros orbitales de los satélites, los cuales son calculados cada hora. Sin embargo, las fuerzas perturbadoras que actúan sobre el satélite hace que la posición calculada sea ligeramente diferente de la real; este error está en el orden de 5m.

Error en la línea base/longitud de la línea base = error en la posición del satélite/distancia del satélite.

Retrasos por ionosfera y troposfera

El paso de la señal a través de estas capas de la atmósfera hace que la misma se desvíe de la línea recta que debe existir entre el satélite y el receptor, alargando en consecuencia el tiempo de viaje de la señal. Los receptores poseen modelos predeterminados que compensan en promedio este error, pero sin eliminarlo completamente. La ionosfera causa un avance de la fase en la onda portadora. Por ello se diseñó el sistema GPS con dos ondas portadoras, ya que con dos observaciones de frecuencia diferente se puede eliminar este error. La troposfera causa retraso tanto en la onda portadora como en el código; para corregir este error, se modela la troposfera para obtener la corrección necesaria.

Trayectoria múltiple

Ocurre cuando la señal GPS es reflejada por objetos tales como edificios antes de alcanzar el receptor. Esto hace que el tiempo de viaje de la señal se incremente, causando por lo tanto errores en la posición. La superficie natural que más refleja la señal es el agua. La que menos la refleja es la arena o suelo arenoso.

Error del reloj del receptor

Ya que el reloj del receptor no puede tener la misma precisión que el de los satélites por razones de costo y de portabilidad, presenta pequeñas diferencias de tiempo, del orden de los nanosegundos, con respecto al del sistema GPS. Téngase en cuenta que un error de apenas un nanosegundo genera un error de 0,3 m; un error de un milisegundo generaría un error de 300 m.

Otros factores que desmejoran la exactitud de la posición y que no pueden considerarse como errores propios del sistema son:

Error del operador

Cuando se introduce en el GPS un dato de inicialización incorrecto, tal como el datum o el tiempo. Como este es un error grosero, es fácil de evitar prestando atención a los datos iniciales que se ingresan al receptor.

Ruido del receptor.

Es el error causado por el proceso de medición usado por el receptor. Depende del diseño de la antena, del método usado por la conversión analógica-digital, por el proceso de correlación y por los ciclos de seguimiento de la señal de los satélites.

Degradación controlada de la precisión

Para efectos de evitar que el GPS pueda ser usado por personas ajenas a las fuerzas armadas de Estados Unidos, cuando este país lo considere necesario, existen dos formas de degradar la precisión del sistema:

- **Disponibilidad selectiva (S/A en sus siglas en inglés, Selective Availability).**

Existen dos formas de llevar a cabo este tipo de degradación de la precisión:

1.- Mediante variación de la frecuencia generadora del código C/A, lo cual modifica

la distancia existente entre el satélite y el receptor.

2.- Mediante la modificación de las efemérides, lo cual modifica la posición de los

satélites y por lo tanto la distancia entre ellos y el receptor.

Si bien la degradación de la señal, conocida con el nombre disponibilidad selectiva

fue eliminada el 2 de mayo de 2000, puede activarse de nuevo, de acuerdo a las

necesidades del gobierno de Estados Unidos.

- **Anti-Spoofing (A/S).**

En este caso se encripta el código P, el cual pasa a ser el código Y, que solamente puede ser procesado correctamente por los receptores GPS autorizados por el DoD.

Número y geometría de los satélites que se captan

Depende de la posición que ocupen los satélites en el cielo sobre el receptor. Cuando los satélites no están bien espaciados y con una altura adecuada sobre el horizonte, la precisión disminuye. Esto es lo que se conoce como GDOP (Geometrical Dilution of Precision). En algunos receptores esta dilución de la precisión, que incluye también la exactitud del reloj interno, se indica con el nombre de EPE (Estimated Position Error). El EPE es una estimación de la precisión, basada en la dilución de precisión horizontal y en el URA (User Range Accuracy), siendo este último una predicción de la precisión del pseudorange que es transmitido por el satélite.

En general, se puede establecer que:

$$\text{EPE} = \text{HDOP} \times \text{URA} \text{ para } 1\sigma \text{ de error. (68\% CEP).}$$

$$\text{EPE} = \text{HDOP} \times \text{URA} \times 2 \text{ para } 2\sigma \text{ de error (95\% CEP).}$$

$$\text{GDOP} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_h^2 + \sigma_t^2 \times c^2}$$

$$\text{PDOP} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_h^2}$$

$$\text{HDOP} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$$

Tabla 2. Modelo estándar de error L1 C/A sin S/A, 1sigma de error (m)

Fuente de error	Error posible (m)	Error tipico (m)
Ionosfera	5,0	0,4
Troposfera	0,5	0,2
Datos de la efemérides	2,5	0
Reloj del satélite	1,5	0
Trayectoria múltiple	0,6	0,6
Ruido	0,3	0,3
Total	≅15	≅10

8.- MODOS DE POSICIONAMIENTO GPS.

Estático.

Es el modo usual de medición GPS

Estático rápido.

Cinemática.

Stop and Go.

Pseudo-cinemático.

Es un método intermedio entre

Autónoma

Usa código C/A

Usa un solo receptor

Tiene una precisión de 27 m.

GPS diferencial en tiempo real

Usa código C/A

Usa dos receptores (Base y Rover), con comunicación de radio entre ellos.

Tiene una precisión de 0,5 a 3 metros.

Cinemática en tiempo real

Usa código C/A y onda portadora

Usa dos receptores (Base y Rover).

Tiene una precisión ente 1 y 3 metros.

GPS DIFERENCIAL

El concepto del GPS diferencial está basado en el concepto de que los errores de posición son similares en todos los puntos de una zona determinada. Al comparar mediciones GPS simultáneas tomadas en un punto a determinar su posición, con un punto de coordenadas conocidas, los errores pueden ser determinados y se pueden aplicar al resto de los puntos medidos.

Aquellas aplicaciones DGPS que no requieren procesamiento de corrección en tiempo real, no necesitan enlace de radio ya que la corrección diferencial se realiza mediante programa, el cual compara los tiempos del receptor base y del receptor móvil (rover) en el momento de la medición.

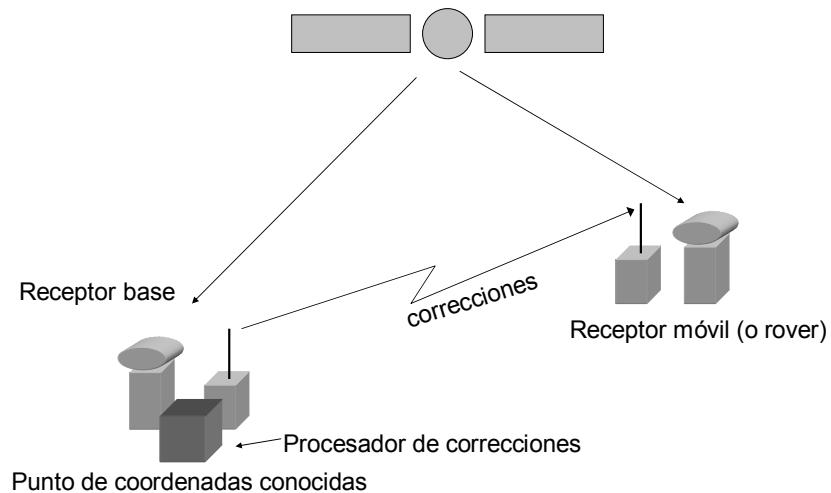


Figura 4. GPS diferencial, con correcciones enviadas por radio.

Cuando se utiliza la radio para enviar correcciones, se usa en todos los casos el formato estándar RTCM SC-104; sin embargo, la longitud de onda que porta el formato puede ser muy variable, abarcando desde bajas frecuencias hasta cortas frecuencias, y haciendo uso de la radio o de telefonía celular, para transmitir las correcciones.

Tipo de medición	Tiempo real o postprocesamiento	Tipo de sistema	Precisión	Area cubierta Longitud de la base
Código	Post-procesamiento	DGPS, LADGPS o WAGPS postprocesado	Menos de un metro	Hasta 1000 km.
Código	Tiempo Real	DGPS, LADGPS o WAGPS	Menos de un metro	Hasta 1000 km.
Onda Portadora	Post-procesamiento	Cinemática, estático rápido o estático	Menos de un centímetro	Hasta 100 km.
Onda Portadora	Tiempo Real	Cinemático, tiempo real	Menos de un centímetro	Hasta 100 km.

Fuente de error (m)	Independiente	Diferencial
Reloj del satélite	15,0	0,1

Efemerides	40,0	1,0
Orbita	5,0	0,13
Ionosfera	12,0	1,0
Troposfera	3,0	0,5
Trayectoria multiple	2,0	2,8
Ruido del receptor	0,5	0,7
Total RMS	44,8	3,3

WAAS (Wide Area Aumentation System).

Es un sistema preciso de navegación desarrollado por la FAA (Federal Aviation Administration) y el DOT (Department of Transportation) para ser usado en la aviación civil en aproximación precisa de aterrizaje, pero puede ser usado por cualquier usuario dentro de la zona indicada en la figura TAL. Consiste en un sistema de 25 estaciones terrestres, ubicadas a lo largo y ancho de Estados Unidos, que monitorean el error de posición, causado por retrasos de la onda al atravesar la ionosfera, errores en el tiempo y errores en la órbita de los satélites GPS. Este error es enviado a dos estaciones principales, ubicadas en cada costa de los Estados Unidos, donde se determinan las correcciones a los promedios de los errores en las estaciones de referencia que comprende el sistema. Esta información finalmente es enviada a dos satélites geostacionarios Inmarsat, los cuales a su vez radian esta corrección a los receptores GPS provistos de capacidad para recibir esta señal de corrección (Este tipo de receptores se denominan WAAS-enabled y no requieren de un equipo receptor adicional). Con este sistema, se consiguen precisiones del orden de tres metros el 95% del tiempo (el valor normal es de 15 metros sin SA).

Existen otros sistemas similares en Europa y en Japón. El sistema Europeo se denomina EGNOS (Euro Geostationary Navigation Overlay Service) y el japonés se denomina MSAS (Multi-Functional Satellite Augmentation System).

En América latina no existe ni está planteado por ahora ningún sistema similar.

Direcciones con enlaces interesantes

Link
http://www.fas.org/spp/military/program/nav/gps.htm
http://www.gisdevelopment.net
http://gpsinformation.net
http://www.isprs.org
http://www.elgps.com
http://www.proteccioncivil.org/mapas.htm

Apéndice 1 ABREVIACIONES

BPSK	Binary Phase Shift Keyed
CDI	Course Deviation Indicator
DGPS	Differential GPS
DMA	Defense Mapping Agency (actualmente NIMA)
DoD	U.S. Department of Defense
DoT	U.S. Department of Transportation
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay System
EPE	Estimated Position Error
ETA	Estimated Time of Arrival
ETE	Estimated Time Enroute
GDOP	Geometric Dilution of Precision
GEO	Geostationary Earth Orbit (órbita geoestacionaria)
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GRS - 80	Global Referente System 1980
HDOP	Horizontal Dilution of Precision
HOW	Hand Over Word
LORAN	LONg RANGE Navigation
MEO	Medium Earth Orbit (órbita media)
NIMA	National Imagery and Mapping Agency
NMEA	National Marine Electronics Association
PRN	Pseudo-Randon Noise
PSAD56	Provisional South America Datum 1956
RCTM	Radio Technical Commission for Maritime Service
RINEX	Receiver INdependent EXchange Format
SV	Space Vehicle
TDOP	Time Dilution of Precision
TLM	Telemetry
UERE	User Equivalent Range Error
URA	User Range Accuracy
URE	User Range Error
USCG	United States Coast Guard
USGS	U.S. Geological Survey
USNO	U.S. Naval Observatory
UTC	Universal Time Coordinated
VDOP	Vertical Dilution of Precision
VHF	Very High Frecuency
VOR	VHF Omni directional Range
WAAS	Wide Area Augmentation System
WGS 84	World Geodetic System 1984