

1. Nociones de Geodesia. GPS

1.1. Introducción

La **geodesia** estudia la forma, dimensiones y campo gravitatorio de la Tierra en territorios extensos. Como ya sabemos, esta es su principal diferencia con la Topografía, la cual basa sus trabajos en superficies de extensión reducida en las cuales puede considerarse despreciable la esfericidad terrestre.

Como decíamos en páginas anteriores, la gran evolución que han experimentado los distintos aparatos, que nos han llevado a conseguir precisiones antes sólo imaginables tras complejos trabajos, ha llegado a dificultar sobremanera el establecimiento de una separación clara entre ambas ciencias. En esencia, la Geodesia comienza sus trabajos allí donde termina la Topografía. De todas formas, no debe acometerse el estudio de estas ciencias por separado, pues están íntimamente relacionadas, de tal manera que la Topografía necesitará apoyarse en la Geodesia para una gran cantidad de aplicaciones prácticas.

El campo abarcado por la Geodesia es muy amplio, razón por la

cual resulta preciso dividirla en distintas ramas¹:

- **Geodesia Esferoidal:** estudia la forma y dimensiones de la Tierra y el empleo del elipsoide como superficie de referencia. Estudio de métodos de resolución de problemas sobre dicha superficie (medida de distancias, etc.).
- **Geodesia Física:** estudia el campo gravitatorio de la Tierra, partiendo de mediciones del mismo (mediante estaciones gravimétricas). Estudio de los problemas de reducción y de desviación de la vertical.
- **Astronomía Geodésica:** estudia los métodos astronómicos que permiten determinar las coordenadas geográficas sobre la superficie terrestre de una serie de puntos fundamentales conocidos con el nombre de “Datum” o “Puntos astronómicos fundamentales” sobre los cuales se basará el cálculo de las posteriores redes geodésicas.
- **Geodesia espacial o cósmica:** utiliza satélites artificiales para sus determinaciones

Desde un punto de vista práctico, una de las mayores utilidades de la Geodesia es que mediante sus técnicas es posible representar cartográficamente territorios muy extensos. Esto se consigue mediante el establecimiento de una red de puntos distribuidos por toda la superficie terrestre, de los cuales se determinarán sus coordenadas, así como su elevación sobre el nivel del mar con muy elevada precisión.

¹ López-Cuervo, S.: Topografía, Madrid, 1993, págs. 307 y ss..

Tras el establecimiento de esta red de puntos de control, más comúnmente denominados *vértices geodésicos* (Fig. 1), se cuenta con una estructura precisa sobre la que podrán apoyarse otros levantamientos posteriores, densificando la red inicial y dando cobertura a todo el territorio. Obviamente, la Topografía será una de las grandes beneficiadas.

Dado que es necesario referenciar estos puntos, habrá que elegir un sistema de referencia. La superficie de referencia para realizar la proyección de los vértices geodésicos es un *elipsoide de revolución*, que constituye una aproximación de la forma real de la Tierra, tal y como veremos a continuación.



Fig. 1: Hito de hormigón que sirve de base a un vértice geodésico. Fuente: Instituto Geográfico Nacional (<http://www.ign.es>)

1.2. Geoide y elipsoide de referencia

La palabra **geoide** significa “forma de la Tierra” y fue introducida por Listing en el año 1873. El geoide es un esferoide tridimensional que constituye una superficie equipotencial imaginaria que resulta de suponer la superficie de los océanos en reposo y prolongada por debajo de los continentes y que sería la superficie de equilibrio de las masas oceánicas sometidas a la acción gravitatoria y a la de la fuerza centrífuga ocasionada por la rotación y traslación del planeta, de manera que la dirección de la gravedad es perpendicular en todos los lugares.

El geoide tiene en cuenta las *anomalías gravimétricas* (debidas a la distribución de las masas continentales y la densidad de los componentes de la Tierra) y el achatamiento de los polos, por el cual es una superficie irregular con protuberancias y depresiones.

Por tanto, y resumiendo, podemos concluir que el Geoide será el lugar geométrico de los puntos que se encuentran en equilibrio bajo la acción de las siguientes solicitaciones:

- Fuerzas de atracción gravitatoria del resto de los puntos de la superficie del mismo.
- Fuerzas de atracción gravitatoria del resto de los astros del Sistema Solar.
- Fuerza centrífuga, debida al movimiento de rotación de la Tierra.

Mediante el estudio de estas solicitaciones o fuerzas y los potenciales que las mismas producen es posible llegar a la definición

geométrica del geoid.

En la Fig. 2 podemos ver la red española de estaciones gravimétricas. Se trata de una información disponible en el Banco de datos gravimétricos, de la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, parte de la cual se halla presente en la red Internet, tal y como se indica en el pie de la figura. Asimismo, también se dispone de datos sobre las anomalías gravimétricas, etc., los cuales no incluimos por no considerarlos necesarios en el marco de esta obra.



Fig. 2: Red de estaciones gravimétricas. Fuente: Instituto Geográfico Nacional (<http://www.ign.es>)

Las mediciones gravitatorias se realizan mediante unos aparatos

denominados gravímetros (Fig. 3). Su función básica es la de observar las variaciones periódicas en el módulo o magnitud de la gravedad (g).

En la Fig. 3 se muestra la imagen de la instalación de un gravímetro en la Cueva de los Verdes (Lanzarote), propiedad del Instituto de Astronomía y Geodesia (Laboratorio de Lanzarote). Estos aparatos necesitan trabajar con una alta resolución, del orden de 10^{-8} m/s^2 , para poder apreciar pequeñísimas variaciones en el valor de la gravedad.

En la Fig. 4 se puede ver el registro de observación del gravímetro anterior, durante el período de una semana. Dicho registro se representa mediante una gráfica que relaciona el módulo de la gravedad con la variación del tiempo, en horas.

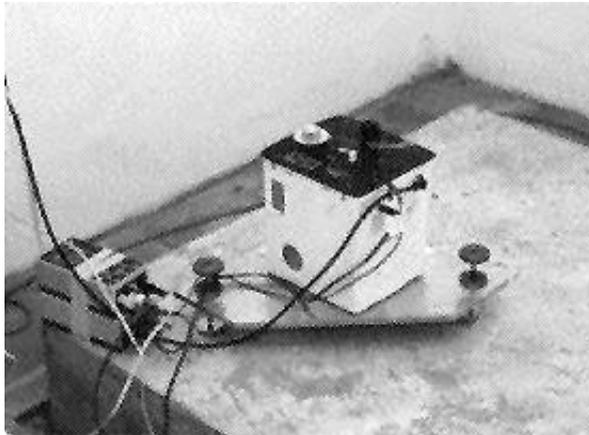


Fig. 3: Detalle del gravímetro instalado en la Cueva de los Verdes (Tenerife), para el control de las variaciones periódicas de la gravedad. Fuente: <http://www.mat.ucm.es/deptos/iag/lanzinstacueva.htm>

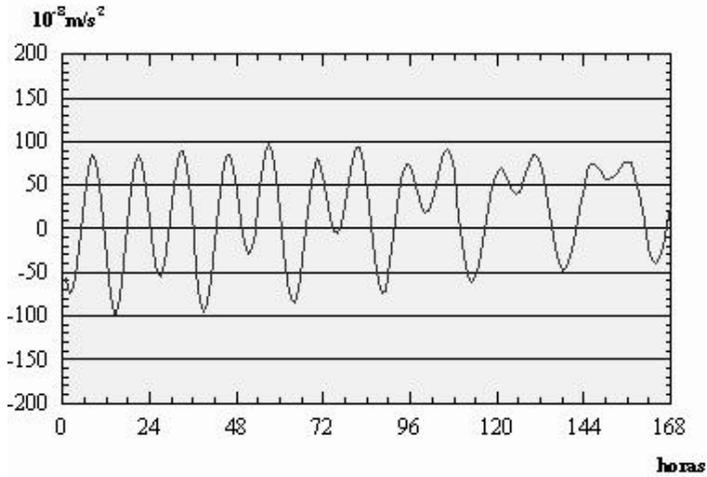


Fig. 4: Gráfica obtenida a partir de los datos registrados por el gravímetro de la Cueva de los Verdes. Fuente: <http://www.mat.ucm.es/deptos/iag/lanzinstacueva.htm>

En la Fig. 5 podemos ver una representación del Geoide en la que las variaciones altimétricas son desniveles con respecto al elipsoide de referencia (magnitud N en la Fig. 11) y están dibujadas con diferentes colores. En la Fig. 6 se muestra otra representación del Geoide, esta vez mediante curvas de nivel con una equidistancia de 10 metros. Ambas imágenes han sido obtenidas partiendo de una malla cartesiana de coordenadas X (longitudes), Y (latitudes) y Z (elevaciones del geoides sobre el elipsoide de referencia WGS84), publicada por la “United States Defense Mapping Agency” con un intervalo de 10° (Fig. 7), tanto en longitud como en latitud.

El Departamento de Geodesia y Geofísica de la “National Imagery and Mapping Agency (NIMA)”, de Estados Unidos, publica un modelo del geoides referido también al elipsoide WGS84 con un intervalo de $0,25^\circ$, el cual permite obtener representaciones mucho más de-

talladas, como la que podemos ver en la Fig. 9.

La elevación en cualquier punto del geoide sobre el elipsoide de referencia indicado (llamada *altura geoidal* u *ondulación del geoide*, ver **x 1.7**) puede calcularse efectuando una interpolación lineal entre los cuatro puntos de la malla más cercanos. Con la utilización del software adecuado es posible generar sin grandes dificultades los distintos mapas de elevaciones presentados.

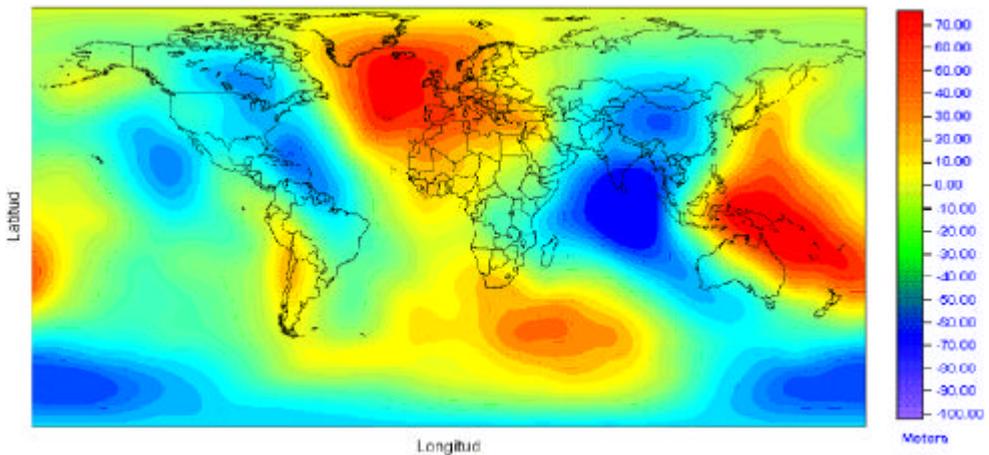


Fig. 5: Representación del Geoide. Obtenida mediante el tratamiento de la malla con intervalo de 10° publicada por la USDMA con el programa de tratamiento digital de imágenes ER-Mapper 5.5 (versión de evaluación)

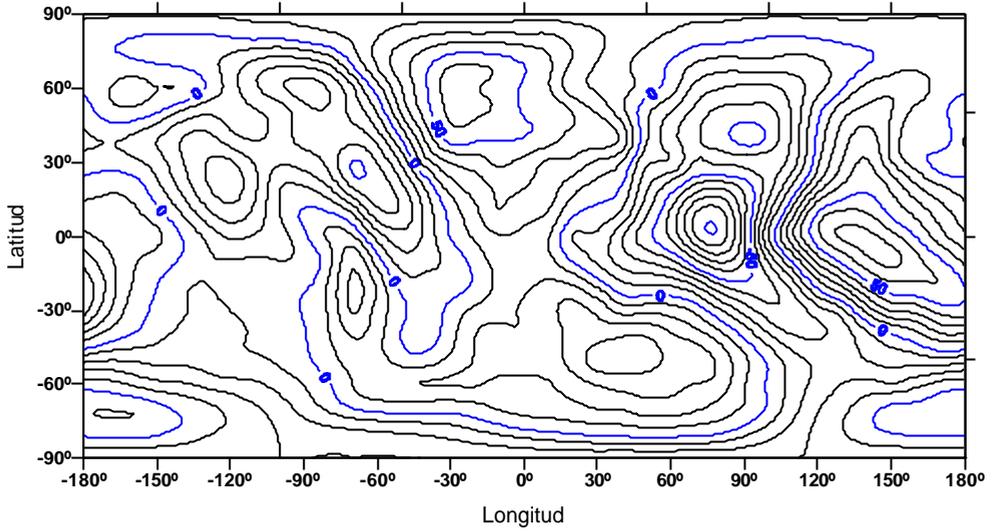


Fig. 6: Modelo del Geoide con líneas de nivel cada 10 metros.

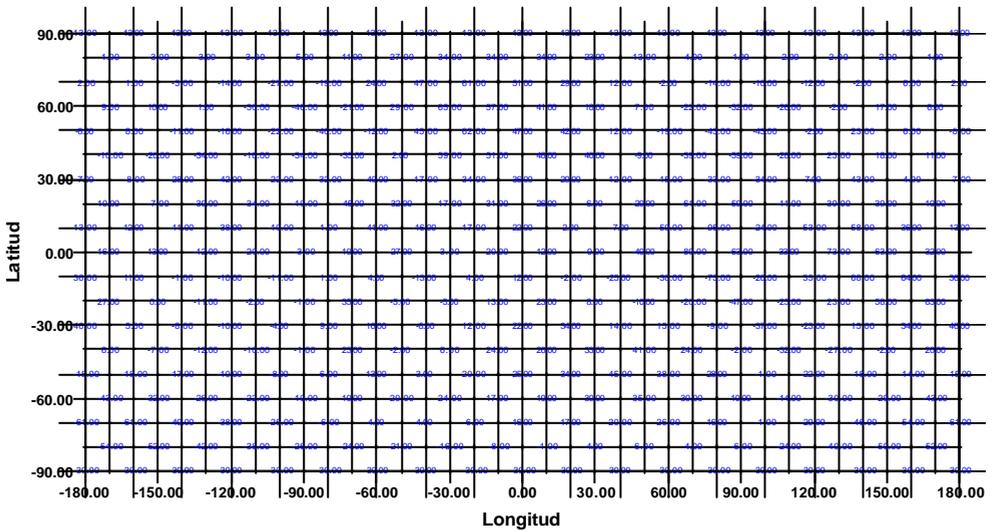


Fig. 7: Malla cartesiana que permite generar un modelo del Geoide a base de curvas de nivel.

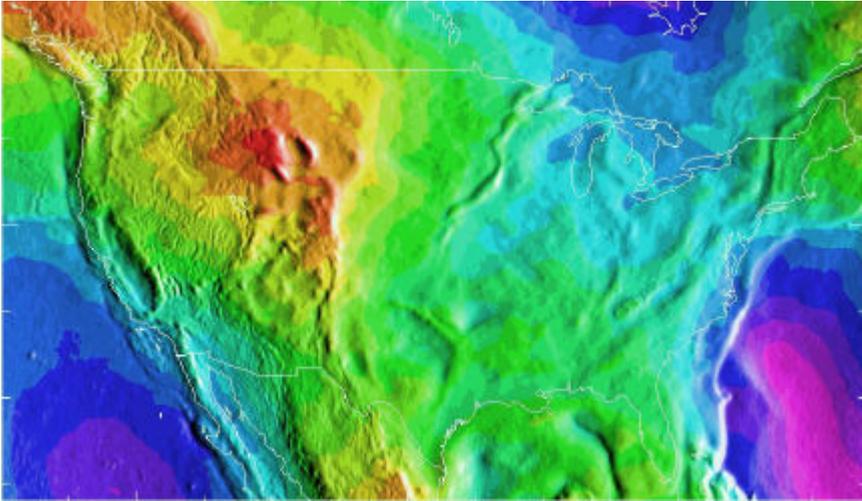


Fig. 8: Representación del Geoide en la zona de Alaska. Fuente: United States National Geodetic Survey (NGS).

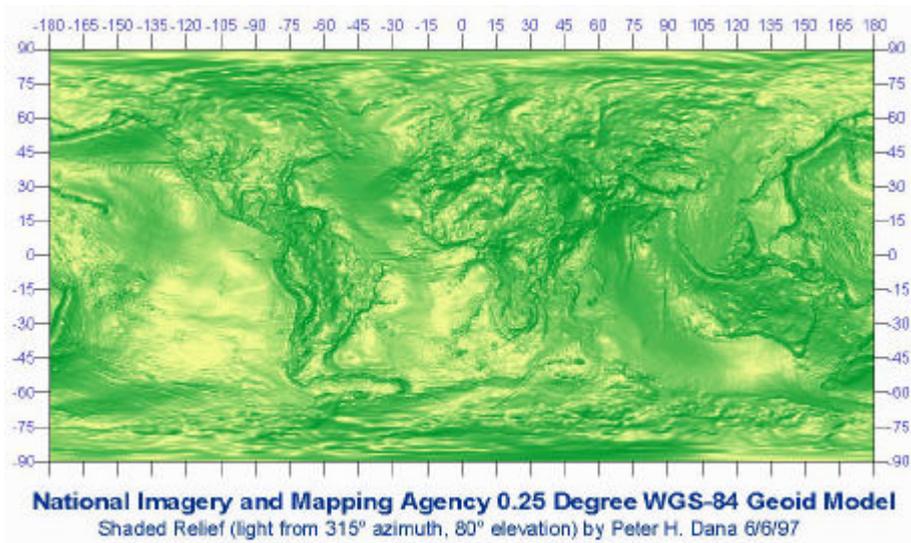


Fig. 9: Representación del geode a partir de la red publicada por la NIMA, con un intervalo de 0,25°. Fuente: Peter H. Dana, Department of Geography, University of Texas at Austin

Para la correcta definición del Geoide es necesario establecer el concepto de *nivel medio del mar*, en contraposición con el que podríamos llamar *nivel instantáneo*, pues la superficie real de los mares no se adapta con exactitud al Geoide, debido a la existencia de mareas y corrientes.

Por lo tanto, podríamos definir al Geoide como la superficie equipotencial que se corresponde con el nivel medio de los océanos. Como ya apuntábamos al principio de este capítulo, la desigual distribución de las masas continentales, así como la densidad variable de los materiales que componen nuestro Planeta, hacen que el Geoide no sea una superficie regular y que, en cambio, presente protuberancias y depresiones, apartándose de la superficie regular media en desniveles que alcanzan hasta los ± 100 metros (Fig. 10).

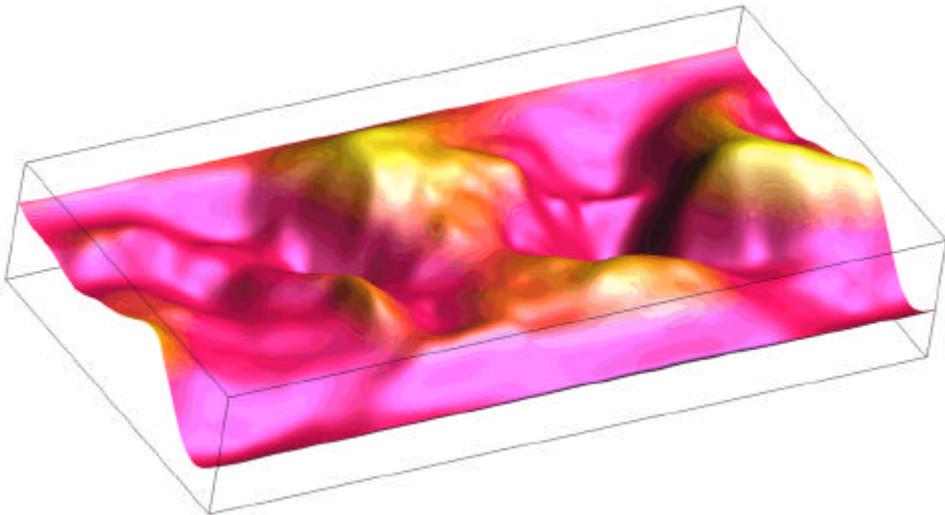


Fig. 10: Modelo tridimensional del geoide en el que se han amplificado sus ondulaciones para una mejor comprensión. Imagen obtenida con ERMapper 5.5

La obtención de una superficie de referencia, con una definición matemática sencilla que permita efectuar cálculos, es imprescindible para poder realizar la proyección de los puntos del relieve terrestre sobre la misma y permitir la elaboración de mapas y planos. El geoide no puede ser la superficie de referencia adoptada, pues, como hemos dicho, es muy compleja e irregular. Se toma entonces la hipótesis de escoger un *elipsoide de revolución* que se adapte en lo posible al geoide y que se define por unos parámetros matemáticos, denominándose *Elipsoide de referencia*.

La elección del elipsoide es más que justificada, por razones de sencillez en su definición matemática y porque se ajusta con aproximación de primer orden al geoide. Hasta aquí, estaríamos hablando de lo que podemos denominar *Elipsoide Medio o General*, que se determinaría teniendo en cuenta los siguientes condicionantes:

- El centro gravitatorio terrestre debe coincidir con el centro del elipsoide.
- El plano definido por el Ecuador terrestre debe coincidir con el del elipsoide.
- La suma de los cuadrados de las alturas geoidales debe ser mínima.

Dada la gran dificultad que supondría realizar las observaciones necesarias para concretar este *Elipsoide General*, las distintas naciones han utilizado los llamados *Elipsoides Locales*, que constituyen una aproximación admisible en zonas geográficas concretas. Esto suele hacerse (según Bomford, 1980) adoptando valores arbitrarios (los que más convengan) para la latitud y longitud geodésicas en un punto de origen, además de una altura sobre el elipsoide. Posteriormente, mediante

la utilización de las ecuaciones matemáticas necesarias, se buscará mantener el paralelismo entre el eje menor del elipsoide y el eje de rotación de la Tierra.

En la Fig. 11 vemos la comparación entre las tres superficies estudiadas, es decir, entre la superficie terrestre real, el Geoide y el elipsoide de referencia.

En topografía, es admisible la sustitución del elipsoide de referencia por una esfera de radio medio.

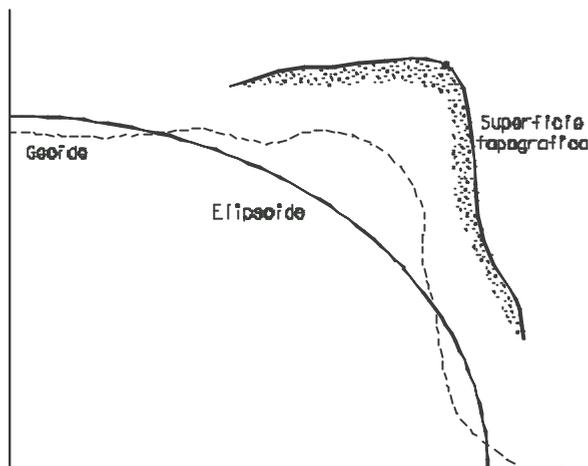


Fig. 11: Geoide, elipsoide de referencia y superficie terrestre.

Como decíamos, los trabajos geodésicos llevados a cabo por los diferentes países han dado lugar a la definición de numerosos elipsoides de referencia, de forma que las medidas efectuadas por cada país están referidas al elipsoide elegido, lo que dificulta sobremanera la conexión de trabajos de ámbito internacional.

Como es lógico, la tendencia desde entonces ha sido la de intentar establecer una cartografía uniforme, referida a un mismo elipsoide. En este sentido, y haciendo un poco de historia, fue Hayford, en el año 1910, el que estableció un elipsoide para la representación de EEUU, que fue adoptado en el año 1924 por la Asamblea Internacional de Geodesia y Geofísica como *elipsoide internacional de referencia*, con los parámetros:

$$a = 6.378.288,00$$

$$a = 1/297$$

Este elipsoide fue perfeccionado con posterioridad gracias a determinaciones obtenidas mediante satélites artificiales, estableciéndose uno con parámetros muy parecidos, que se adoptó como internacional en 1964, por la Unión Astronómica Internacional, en Hamburgo. Los parámetros fueron los siguientes:

$$a = 6.378.160,00$$

$$a = 1/298,25$$

Pocos años después, en 1967, fue Veis el que, basándose en nuevos datos disponibles, estableció unos nuevos parámetros para este elipsoide. Son los siguientes:

$$a = 6.378.142 \pm 6 \text{ m}$$

$$a = 1/298,255 \pm 0,005$$

Los parámetros que definen todo elipsoide de revolución, y las relaciones entre ellos, son los siguientes:

Semieje mayor	a
Semieje menor	b
Aplanamiento	$a = \frac{a-b}{a}$
Excentricidad	$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$
2ª Excentricidad	$e' = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{b}$

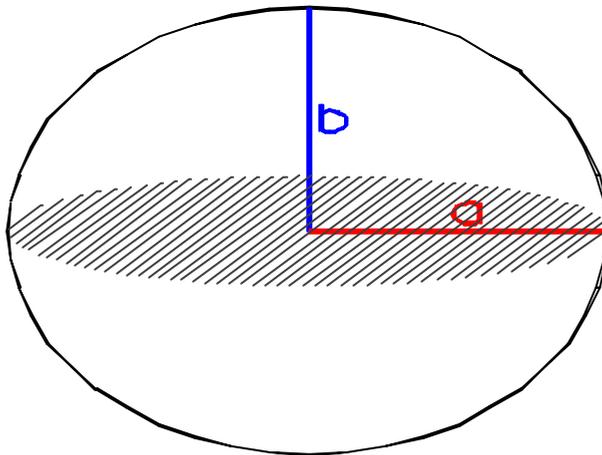


Fig. 12: Parámetros del elipsoide

Tabla 1: Elipsoides de referencia utilizados en cartografía

Nombre del elipsoide	a	b	a	e
Airy 1830	6,377,563.396	6,356,256.909	299.32496	0.081673
Modified Airy	6,377,340.189	6,356,034.448	299.32496	0.081673
Australian National	6,378,160.000	6,356,774.719	298.25000	0.081820
Bessel 1841 (Namibia)	6,377,483.865	6,356,165.383	299.15281	0.081697
Bessel 1841	6,377,397.155	6,356,078.963	299.15281	0.081697
Clarke 1866	6,378,206.400	6,356,583.800	294.97869	0.082272
Clarke 1880	6,378,249.145	6,356,514.870	293.46500	0.082483
Delambre 1800	6,375,635.000	6,356,564.000	334.00000	0.077288
Everest (India 1830)	6,377,276.345	6,356,075.413	300.80170	0.081473
Everest (Sabah Sarawak)	6,377,298.556	6,356,097.550	300.80170	0.081473
Everest (India 1956)	6,377,301.243	6,356,100.228	300.80170	0.081473
Everest (Malaysia 1969)	6,377,295.664	6,356,094.668	300.80170	0.081473
Everest (Malay&Sing 1948)	6,377,304.063	6,356,103.039	300.80170	0.081473
Everest (Pakistan)	6,377,309.613	6,356,108.571	300.80170	0.081473
Modified Fischer 1960	6,378,155.000	6,356,773.320	298.30000	0.081813
Helmert 1906	6,378,200.000	6,356,818.170	298.30000	0.081813
Hough 1960	6,378,270.000	6,356,794.343	297.00000	0.081992
Indonesian 1974	6,378,160.000	6,356,774.504	298.24700	0.081821
Hayford 1910 (Internacional)	6,378,388.000	6,356,911.946	297.00000	0.081992
Krassovsky 1940	6,378,245.000	6,356,863.019	298.30000	0.081813
GRS 80	6,378,137.000	6,356,752.314	298.25722	0.081819
South American 1969	6,378,160.000	6,356,774.719	298.25000	0.081820
Struve 1924	6,378,298.300	6,356,657.100	294.73000	0.082306
Walbeck 1819	6,376,896.000	6,355,833.000	302.80000	0.081210
WGS 72	6,378,135.000	6,356,750.520	298.26000	0.081819

WGS 84	6,378,137.000	6,356,752.314	298.25722	0.081819
--------	---------------	---------------	-----------	----------

Tras la definición del elipsoide de referencia, surge la pregunta sobre la necesidad del mismo y su relación con las observaciones que se efectúan sobre la superficie terrestre. Debe quedar claro que estas últimas deberán ser corregidas (*reducción*) y referidas al elipsoide, pues éste último será la base para la posterior elaboración mapas y planos. Posteriormente ampliaremos este concepto.

1.3. Ángulo radial de la vertical

Ya sabemos que la Tierra no es perfectamente esférica, sino que tiene forma elipsoidal debido a la rotación. De no existir ésta, la dirección de la plomada siempre coincidiría con el radio de la Tierra. Como hemos visto, cada punto de la superficie terrestre está sometido a dos fuerzas:

- atracción gravitatoria debida a la masa terrestre, en la dirección del centro de gravedad de la Tierra.
- fuerza centrífuga (nula en los polos y máxima en el ecuador), en la dirección del radio del paralelo imaginario en que se encuentre dicho punto.

La resultante de estas dos fuerzas en cada punto es la *vertical* (*vertical astronómica o vertical física*), que seguirá la dirección del radio terrestre en el ecuador y en los polos, pero a otras latitudes formará un ángulo con el mismo, al que se llama *ángulo radial de la vertical*. Este ángulo es máximo aproximadamente a los 45° de latitud, alcanzado un valor de unos 11 minutos. No debemos confundir este concepto con el de las desviaciones de la vertical, que vemos en el si-

guiente epígrafe.

1.4. Desviación de la vertical

Se conoce como desviación de la vertical en un punto P del terreno, al ángulo que existe entre la vertical astronómica y la normal al elipsoide (vertical geodésica).

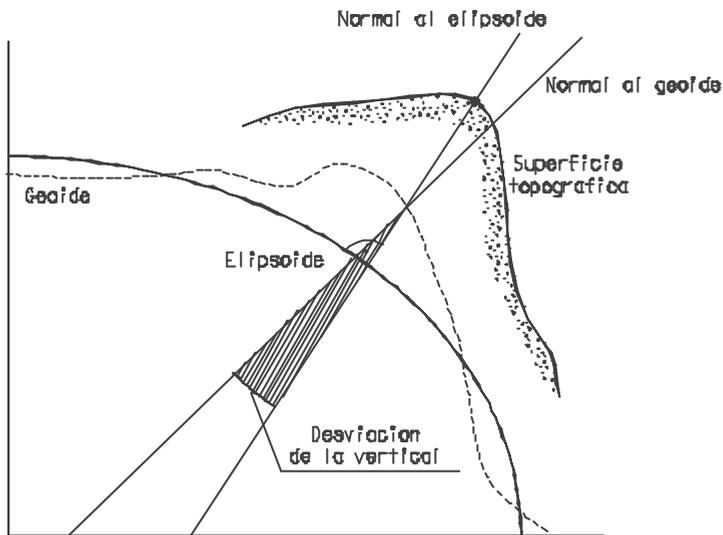


Fig. 13: Desviación de la vertical

Para el estudio de las variaciones de la vertical astronómica en función de las variaciones en el valor de la gravedad, se utilizan unos aparatos especiales denominados clinómetros² (Fig. 14).

² Existen diferentes tipos de clinómetros. En la Fig. 14 se muestran dos de ellos, de larga base, de tipo WT (Water Tube), pues están basados en el principio de los vasos comunicantes, midiendo la diferencia de inclinación entre dos puntos separados una distancia determinada. Los clinómetros de corta base suelen ser de péndu-



Fig. 14: Clinómetros de larga base (WT, Water Tube) instalados en el interior de la Cueva de los Verdes, siguiendo direcciones perpendiculares.

Fuente: <http://www.mat.ucm.es/deptos/iag/lanzinstacueva.htm>

A partir de estas variaciones y del conocimiento de la vertical geodésica, puede determinarse la desviación entre ambas, mediante la aplicación de la ecuación de Laplace. La deducción y explicación de ésta es ciertamente compleja y, desde luego, se sale de los objetivos de esta obra³.

Los puntos en los que se calcula la desviación de la vertical se conocen como *Puntos de Laplace* y tienen gran importancia en Geodesia, ya que conociendo las desviaciones de la vertical en dos puntos, es posible determinar la separación existente entre el geoide y el elipsoide.

La desviación de la vertical es nula en el Datum geodésico.

lo. Entre ellos caben destacar los tipos VMR y los Ostrovsky, ambos presentes también en las instalaciones de la Cueva de los Verdes, en la isla de Tenerife.

³ El tema de la desviación de la vertical y los puntos de Laplace está ampliamente desarrollado, y con gran claridad en el Manual de Geodesia y Topografía, de Mario Ruiz Morales (v. bib.).

1.5. Sistemas de coordenadas utilizados en Geodesia

Según el Dr. Terry Moore, del *Institute of Engineering and Space Geodesy*, en la Universidad de Nottingham (Reino Unido), los sistemas de coordenadas geodésicos han sido de escaso interés para la mayoría de los técnicos hasta la llegada de los modernos sistemas de posicionamiento por satélite, en particular el GPS, del que hablaremos más tarde.

Muchos de los problemas que se presentan hoy día con la utilización de estas nuevas técnicas, es la falta de conocimiento de la verdadera complejidad que presentan los sistemas de coordenadas empleados en geodesia.

1.5.1. Sistemas de coordenadas astronómicas y geodésicas

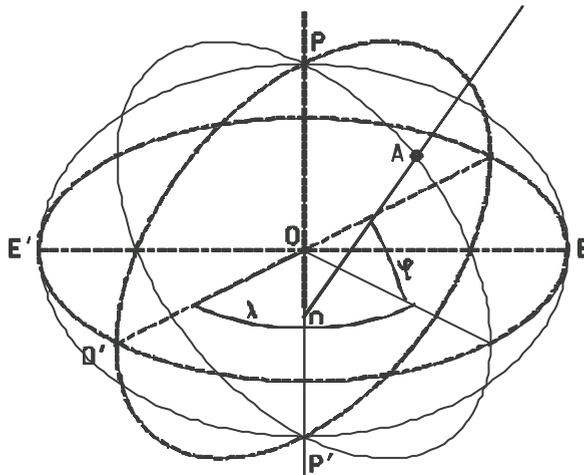


Fig. 15: Longitud y latitud geodésicas

Sea (Fig. 15) un punto A sobre el elipsoide de referencia, del cual queremos determinar sus coordenadas geodésicas y astronómicas. Para ello, vamos a definir los siguientes elementos:

- *Meridiano de origen* de longitudes (Greenwich): $PO'P'$. El meridiano de origen es un plano arbitrario que contiene al eje de rotación terrestre. En la cartografía española antigua se tomaba el meridiano de Madrid. Actualmente se toma el que pasa por Greenwich, existiendo una diferencia entre ellos de $3^{\circ} 41' 15''$.
- *Meridiano que pasa por el punto A*: PAP'
- *Plano ecuatorial*: $EO'E'$. El Ecuador es un plano perpendicular al eje de rotación de la Tierra, pasando por el centro de gravedad de la misma.
- *Vertical geodésica*: es la normal al elipsoide por el punto A: An.
- *Vertical astronómica*: es la línea, que en dicho punto, toma la plomada, en función del campo gravitatorio, y que será independiente del elipsoide adoptado. Se denomina también *vertical local* o *vertical física*, y es la normal al geoide en el punto considerado.
- *Vertical geocéntrica*: es la línea que pasa por el punto A y el centro del elipsoide (O).

Con estos elementos, podemos definir:

- *Latitud geodésica*: es el ángulo (φ) formado por la vertical al elipsoide desde el punto A (línea An, vertical geodésica) y el plano ecuatorial (EO'E'). Se mide en grados sexagesimales, partiendo del Ecuador, siendo positiva al Norte (de 0 a 90°) y negativa al Sur (de 0 a -90°).
- *Longitud geodésica*: es el ángulo (λ) formado por el plano del meridiano origen (plano PO'P') y el del meridiano que pasa por el punto A (plano PAP'). Se mide en grados sexagesimales, de 0 a 360°, con sentido positivo al Oeste.
- *Latitud astronómica*: es el ángulo (Φ) formado por la vertical astronómica y el plano ecuatorial. Se define el meridiano astronómico como el plano que pasa por la vertical astronómica en el punto A, y por la línea definida por el eje de rotación terrestre (o una línea paralela a éste).
- *Longitud astronómica*: es el ángulo (Λ) formado por el plano del meridiano astronómico local y el del meridiano de origen.

Debe quedar claro que las determinaciones geodésicas se realizan sobre la superficie terrestre, aunque para trabajar, como ya dijimos, necesitamos hacerlo sobre la superficie del elipsoide. Recordamos que el conjunto de métodos disponibles para trasladar las determinaciones sobre la superficie real de la Tierra al elipsoide se conoce como *problemas de reducción*.

Para resolver los problemas de reducción es necesario el conocimiento de las desviaciones entre la superficie real terrestre y la del elipsoide de referencia. Para ello tendremos que:

- Determinar la altura de los puntos que están sobre la superficie terrestre (ver ξ 1.7).
- Medir las desviaciones de la vertical en dichos puntos (Fig. 13).
- Calcular la fuerza gravitatoria en los puntos indicados, para lo cual suelen utilizarse los gravímetros, vistos anteriormente (Fig. 3).

Estas determinaciones entran de lleno en el campo de la Geodesia física, y su cálculo se realiza basándose en la Teoría del potencial gravitatorio, las ecuaciones de Laplace, etc. Un desarrollo relativamente simple de todos estos conceptos puede seguirse en el libro *Topografía* del profesor López-Cuervo (v. Bib.).

Las coordenadas definidas, aunque parezcan relativamente complejas, no son, según el Dr. Terry Moore, mas que simplificaciones de un problema todavía más complicado, pues se han despreciado los siguientes efectos:

- El eje de rotación instantáneo no está fijo con respecto a la masa sólida de la Tierra, sino que está afectado de un cierto movimiento, denominado *movimiento polar*. Este efecto fue

predicho por Euler en 1765, pero no ha sido determinado con exactitud hasta mucho tiempo después. Como resultado, la posición del Polo Norte (intersección del eje de rotación con la superficie terrestre) puede variar alrededor de 5 a 10 metros cada año. Por esta razón, lo más usual es definir las coordenadas con respecto a un eje medio, internacionalmente admitido, y no con respecto al eje de rotación instantáneo.

- Por otra parte, el meridiano de origen no pasa por un punto en particular de Greenwich, sino que se define como el valor medio de las longitudes adoptadas para una serie de observatorios en todo el mundo. En este sentido, en el año 1988, el International Earth Rotation Service (IERS), cuya sede está en París, definió el eje de rotación medio, el *IERS Reference Pole* (IRP, Polo Norte de referencia) y el meridiano de origen, denominado el *IERS Reference Meridian* (IRM).
- Por último, si nos centramos en las coordenadas astronómicas, debemos saber que es posible que las direcciones de la vertical (según el vector gravedad) pueden ser paralelas en dos puntos distintos de la superficie terrestre, lo cual implicaría que ambos tendrían la misma latitud astronómica.

1.5.2. Sistema de coordenadas rectangulares geocéntricas (X,Y,Z)

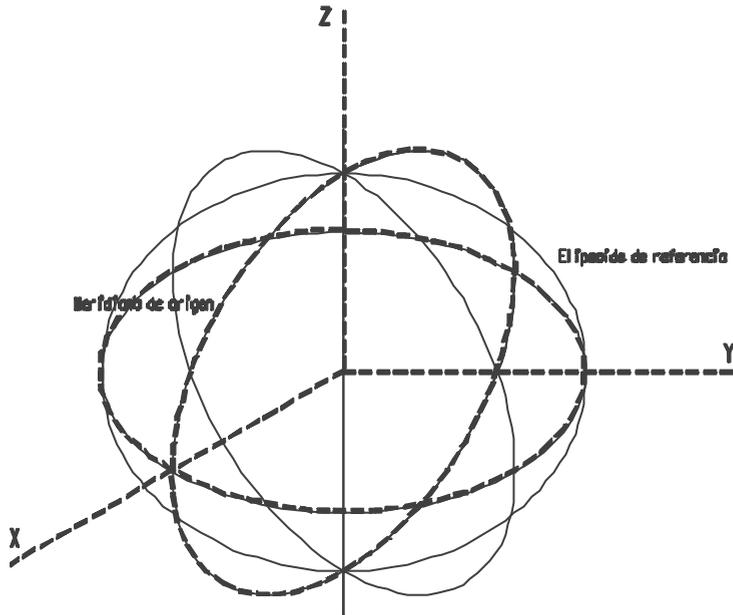


Fig. 16: Coordenadas rectangulares geocéntricas

Una vez definidos el plano ecuatorial y el meridiano de origen, es posible definir un sistema de coordenadas cartesianas (X,Y,Z) asociado. De esta forma, tenemos un triedro en el que el eje X suele tomar la dirección del meridiano de origen, el eje Z es perpendicular al plano ecuatorial, y el eje Y es perpendicular a los otros dos. El origen de este nuevo sistema de referencia puede ser el centro del elipsoide, o bien el centro de masas terrestre.

Con el desarrollo de la Geodesia C3smica, los sistemas de coordenadas espaciales han cobrado una gran importancia. La resoluci3n de los problemas geod3sicos con estos sistemas se denomina *Geodesia Tridimensional*.

1.5.3. Coordenadas geogr3ficas

Si tomamos como superficie de referencia la esfera en lugar del elipsoide, hablaríamos de *longitud y latitud geogr3ficas*, con una definici3n equivalente a las anteriores.

1.5.4. Coordenadas rectangulares planas

En general, el sistema de coordenadas geogr3ficas es muy adecuado para grandes superficies, pero a menudo su empleo es inc3modo, debido principalmente a la complejidad de la geometría esférica en comparaci3n con la geometría plana. As3, empezaron a utilizarse, durante la Primera Guerra Mundial, cuadr3culas de coordenadas rectangulares sobre los mapas. Actualmente, el empleo de sistemas de cuadr3cula es pr3cticamente universal.

El sistema de coordenadas geod3sicas resulta poco satisfactorio de cara a su utilizaci3n pr3ctica en parte porque las unidades de medida son ángulos. Por ello, en la pr3ctica, se suelen emplear sistemas de coordenadas rectangulares planas, que resultan mucho m3s c3modos de utilizar. Sin embargo, el cambio de un sistema a otro no es f3cil, pues la superficie del elipsoide no es desarrollable, es decir, no puede extenderse sobre un plano sin sufrir deformaciones ni rasgaduras.

La soluci3n que se ha adoptado es la de representar la superficie del elipsoide sobre un plano seg3n una determinada ley matem3tica que

podría expresarse como sigue:

$$x = f_1(\mathbf{I}, \mathbf{j})$$

$$y = f_2(\mathbf{I}, \mathbf{j})$$

donde (x, y) son las coordenadas rectangulares planas deducidas a partir de sus homólogas en el elipsoide (λ, φ) , mediante la aplicación de la relación matemática indicada.

Existen gran cantidad de leyes matemáticas que permiten la representación del elipsoide sobre un plano, pero una de las premisas fundamentales es la de obtener la mínima distorsión al proyectar los elementos de una superficie a la otra. Es entonces cuando entramos de lleno en los dominios de la Cartografía y de las proyecciones cartográficas, tal y como veremos en el capítulo siguiente.

En España, el sistema de proyección utilizado es el UTM (el más difundido internacionalmente), en el cual se basa la Red Geodésica Nacional.

1.6. Datum

El Datum geodésico está constituido por:

- Una superficie de referencia con definición geométrica exacta, generalmente un elipsoide de revolución, tal y como hemos venido viendo hasta ahora.
- Un punto Fundamental, en el que coinciden las verticales al geoide y al elipsoide (con lo que también coincidirán las coordenadas astronómicas y geodésicas⁴).

En general, el datum es la superficie de referencia para el cálculo y determinación de coordenadas, estableciéndose unos datos iniciales de los cuales se derivan el resto. En Geodesia se emplean dos tipos de datum, el vertical y el horizontal.

El *Datum Vertical* es la superficie de referencia que permite el cálculo de alturas. Por tanto, es la superficie de altura nula. Lo más usual es que esta superficie sea el geoide⁵ y las alturas a él referidas sean alturas ortométricas (ver § 1.7).

El *Datum Horizontal* permite la determinación de la longitud y

⁴ Es importante señalar que las determinaciones alimétricas clásicas son referidas al geoide, mientras que la moderna utilización del sistema WGS-84 implica que éstas son referidas al elipsoide.

⁵ Ver anterior.

latitud. Se elige un punto en el cual las superficies del elipsoide de referencia y del geoide sean tangentes. De esta forma, ambas verticales (geodésica y astronómica respectivamente) coincidirán, así como las coordenadas astronómicas y geodésicas en dicho punto.

En la geodesia española, el elipsoide utilizado es el internacional de Hayford y el *Datum Europeo* o *Datum Potsdam* (por estar localizado en esta localidad alemana, en la Torre de Helmert, Fig. 19). Este datum se conoce con el nombre de ED-50 (European Datum, 1950). Posteriormente, en 1979, se realizó una nueva compensación de la red, en la cual se localizó el punto fundamental en Munich (Datum Munich), se siguió utilizando el elipsoide de Hayford, y las altitudes se refirieron al elipsoide en lugar de al geoide. A este datum se le denomina ED-79 (European Datum, 1979).

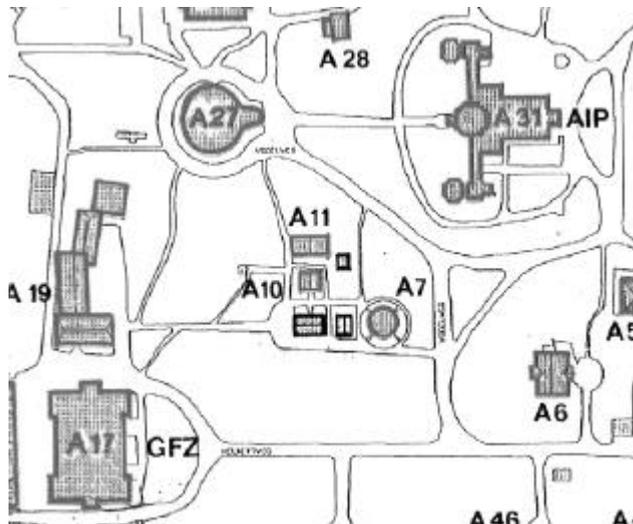


Fig. 17: Localización de la Torre de Helmert (A7) en Potsdam, Alemania. En las cercanías se encuentran el Instituto Geodésico de Potsdam (A17), el Observatorio de Astrofísica (A31) y otros centros de interés



Fig. 18: Vista, desde la cúpula de la Torre de Helmert, del telescopio láser ubicado en la denominada estación Potsdam 7836, perteneciente a la red global de estaciones SLR (Satellite Laser Ranging), entre las cuales también está la de San Fernando, en Cádiz. Fuente: GFZ Potsdam (<http://www.gfz-potsdam.de>)



Fig. 19: Localización de Postdam (Alemania)

Este punto en el cual son tangentes las superficies del geoide y del elipsoide se denomina también *Punto Astronómico Fundamental* (ya que se determinan sus coordenadas por métodos astronómicos y se igualan a las respectivas geodésicas, pues ambas, como hemos indicado, son coincidentes) y es el que sirve como referencia para el posterior cálculo de las coordenadas de todos los vértices de una red geodésica. Es obvio que en el mismo, la desviación de la vertical es nula.

A continuación presentamos una tabla con la mayoría de los Datus empleados en cartografía, así como los elipsoides de referencia correspondientes para el cálculo de coordenadas.

Tabla 2: Datums empleados en geodesia

Nombre del Datum	Elipsoide de referencia
Adindan	Clarke 1880
Afgooye	Krassovsky 1940
Ain el Abd 1970	International 1924
American Samoa 1962	Clarke 1866
Anna 1 Astro 1965	Australian National
Antigua Island Astro 1943	Clarke 1880
Arc 1950	Clarke 1880
Arc 1960	Clarke 1880
Ascension Island 1958	International 1924
Astro Beacon E 1945	International 1924
Astro DOS 71/4	International 1924
Astro Tern Island (FRIG) 1961	International 1924
Astronomical Station 1952	International 1924
Australian Geodetic 1966	Australian National
Australian Geodetic 1984	Australian National
Ayabelle Lighthouse	Clarke 1880
Bellevue (IGN)	International 1924
Bermuda 1957	Clarke 1866
Bissau	International 1924
Bogota Observatory	International 1924
Bukit Rimpah	Bessel 1841
Camp Area Astro	International 1924
Campo Inchauspe	International 1924
Canton Astro 1966	International 1924
Cape	Clarke 1880
Cape Canaveral	Clarke 1866
Carthage	Clarke 1880

Chatham Island Astro 1971	International 1924
Chua Astro	International 1924
Corrego Alegre	International 1924
Dabola	Clarke 1880
Deception Island	Clarke 1880
Djakarta (Batavia)	Bessel 1841
DOS 1968	International 1924
Easter Island 1967	International 1924
European 1950 (ED-50)	International 1924
European 1979 (ED-79)	International 1924
Fort Thomas 1955	Clarke 1880
Gan 1970	International 1924
Geodetic Datum 1949	International 1924
Graciosa Base SW 1948	International 1924
Guam 1963	Clarke 1866
Gunung Segara	Bessel 1841
GUX 1 Astro	International 1924
Herat North	International 1924
Hjorsey 1955	International 1924
Hong Kong 1963	International 1924
Hu-Tzu-Shan	International 1924
Indian 1954	Everest (India 1830)
Indian 1960	Everest (India 1830)
Indian 1975	Everest (India 1830)
Indonesian 1974	Indonesian 1974
Ireland 1965	Modified Airy
ISTS 061 Astro 1968	International 1924
ISTS 073 Astro 1969	International 1924
Johnston Island 1961	International 1924
Kandawala	Everest (India 1830)
Kerguelen Island 1949	International 1924

Kertau 1948	Everest (Malay. & Singapore 1948)
Kusaie Astro 1951	International 1924
L. C. 5 Astro 1961	Clarke 1866
Leigon	Clarke 1880
Liberia 1964	Clarke 1880
Luzon	Clarke 1866
Mahe 1971	Clarke 1880
Massawa	Bessel 1841
Merchich	Clarke 1880
Midway Astro 1961	International 1924
Minna	Clarke 1880
Montserrat Island Astro 1958	Clarke 1880
M'Poraloko	Clarke 1880
Nahrwan	Clarke 1880
Naparima BWI	International 1924
North American 1927 (NAD 27)	Clarke 1866
North American 1983 (NAD 83)	GRS 80
North Sahara 1959	Clarke 1880
Observatorio Meteorologico 1939	International 1924
Old Egyptian 1907	Helmert 1906
Old Hawaiian	Clarke 1866
Oman	Clarke 1880
Ordnance Survey Great Britain 1936	Airy 1830
Pico de las Nieves	International 1924
Pitcairn Astro 1967	International 1924
Point 58	Clarke 1880
Pointe Noire 1948	Clarke 1880
Porto Santo 1936	International 1924
Provisional South American 1956	International 1924
Provisional South Chilean 1963	International 1924
Puerto Rico	Clarke 1866

Pulkovo 1942	Krassovsky 1940
Qatar National	International 1924
Qornoq	International 1924
Reunion	International 1924
Rome 1940	International 1924
S-42 (Pulkovo 1942)	Krassovsky 1940
Santo (DOS) 1965	International 1924
Sao Braz	International 1924
Sapper Hill 1943	International 1924
Schwarzeck	Bessel 1841 (Namibia)
Selvagem Grande 1938	International 1924
S-JTSK	Bessel 1841
South American 1969	South American 1969
South Asia	Modified Fischer 1960
Tananarive Observatory 1925	International 1924
Timbalai 1948	Everest (Sabah Sarawak)
Tokyo	Bessel 1841
Tristan Astro 1968	International 1924
Viti Levu 1916	Clarke 1880
Voirol 1960	Clarke 1880
Wake Island Astro 1952	International 1924
Wake-Eniwetok 1960	Hough 1960
WGS 1972	WGS 72
WGS 1984	WGS 84
Yacare	International 1924
Zanderij	International 1924

1.7. Determinaciones altimétricas en Geodesia. Altura elipsoidal, cota ortométrica, ondulación del Geoi- de, altura topográfica.

Las coordenadas geodésicas (λ , φ) determinan la posición de la proyección de un punto de la superficie real de la Tierra sobre el elipsoide, según la normal a éste.

Pues bien, en este momento tenemos nuestro punto situado sobre el elipsoide, pero es necesario situarlo sobre la superficie terrestre si es que queremos trabajar con él. Para ello, nos bastará con saber cuál es la altura de dicho punto sobre la superficie del elipsoide (la cual se medirá, obviamente, sobre la vertical geodésica), que se conoce como *altura elipsoidal* (h en la Fig. 20).

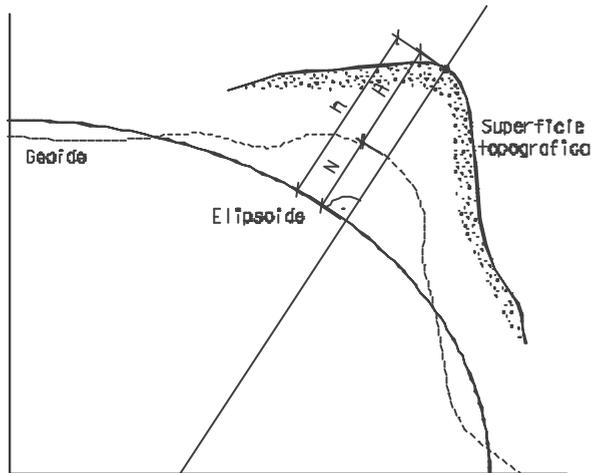


Fig. 20: Determinaciones altimétricas en Geodesia

Normalmente, esta altura no es demasiado utilizada, sino que estamos más acostumbrados a oír hablar de la altura de un punto sobre el nivel medio del mar en algún lugar prefijado (en España se toma el nivel medio en Alicante). Teniendo en cuenta la definición de geoide, no cabe duda de que esta segunda altura de la que hablamos estará referida a la superficie del mismo (H en la Fig. 20), a la que se denomina *altura ortométrica*.

La diferencia entre la *altura elipsoidal* (h) y la *altura ortométrica* (H) es la que llamamos *altura geoidal* (N) u *ondulación del geoide*, pues en realidad representa las desviaciones del geoide con respecto al elipsoide de referencia. Por tanto, las imágenes 5, 6, 7, 8, 9 y 10 están representando alturas geoidales.

La ecuación que liga las tres alturas definidas en la Fig. 20, es la siguiente:

$$h = H + N$$

Por tanto, las coordenadas geodésicas de un punto estarán formadas por la longitud y latitud geodésicas y, además, la altura del punto sobre el elipsoide de referencia, es decir, h . Por tanto, tenemos:

Coordenadas geodésicas del punto P: (l_p, j_p, h_p)

Por último, se define como *altura topográfica* a la distancia sobre la vertical local (astronómica) desde el punto considerado a la superficie del geoide (igual que la altura ortométrica), pero sin tener en cuenta las variaciones de la fuerza gravitatoria. Es el método usual empleado en Topografía.

El conocimiento de h no es inmediato, sino que será necesaria la determinación de H y N .

A continuación vemos, de una forma muy somera, cómo se efectúan dichas determinaciones:

- Las cotas ortométricas (H) se determinan mediante nivelación de alta precisión con respecto a un determinado Datum altimétrico, el cual define una superficie de cota nula (en España es el nivel medio del Mediterráneo en Alicante, ver §1.6).
- La altura geoidal u ondulación del geoide (N), puede determinarse por varios métodos:
 - Método de Helmert: se basa en el conocimiento de las coordenadas geodésicas y astronómicas en una serie de puntos (puntos de Laplace), lo cual permitirá calcular las componentes de la desviación de la vertical en los mismos y, por último, de las ondulaciones del geoide por el método de nivelación astrogeodésica.
 - Utilización de las anomalías gravimétricas: se aplica la fórmula de Stokes para calcular diferencias de ondulación del geoide entre unos puntos y otros. En combinación con el anterior permite obtener determinaciones de N con mayor precisión.
 - Utilización de observaciones espaciales, del tipo GPS, en puntos en los que se conoce la altura ortométrica (H).

En este caso, la resolución es como sigue:

Sean los puntos A y B, en los cuales conocemos H_A y H_B y además, por observaciones espaciales, se ha determinado la diferencia h_A-h_B . Tenemos, por tanto, que:

$$\begin{aligned}h_A &= H_A + N_A \\h_B &= H_B + N_B \\h_A - h_B &= (H_A + N_A) - (H_B + N_B)\end{aligned}$$

de donde

$$N_A - N_B = (h_A - h_B) - (H_A - H_B)$$

Como hemos dicho, (h_A-h_B) es conocido; y (H_A-H_B) se determina mediante nivelación de alta precisión, con lo cual, podemos obtener la diferencia (N_A-N_B) . De esta manera, calculamos las diferencias de ondulación del geoide entre dos puntos separados entre sí una cierta distancia. Partiendo de un punto en el que la ondulación del geoide sea nula (punto en el que coinciden las superficies del elipsoide y del geoide), podemos determinar el resto de alturas geoidales necesarias y, por lo tanto, las alturas de dichos puntos sobre el elipsoide (h).

1.8. Transformaciones entre los sistemas de coordenadas geodésicos

Es posible efectuar transformaciones entre coordenadas geodésicas (longitud, latitud y altura elipsoidal) y rectangulares espaciales X,Y,Z. Para ello podemos emplear las siguientes fórmulas:

$$\tan l = \frac{Y}{X}$$

$$\tan \Phi = \frac{Z + e^2 \cdot u \cdot \sin \Phi}{\sqrt{(X^2 + Y^2)}}$$

$$h = \left[\frac{X}{\cos \Phi \cdot \cos l} \right] - u$$

donde:

$$u = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \Phi}}$$

a = semieje mayor del elipsoide

e = excentricidad del elipsoide

h = altura elipsoidal

En este caso, a la vista de las fórmulas indicadas, es claro que resulta necesario proceder por iteraciones para llegar a un resultado satisfactorio.

El paso de coordenadas rectangulares espaciales a longitud y latitud geodésicas puede efectuarse como sigue:

$$X = (\mathbf{u} + h) \cdot \cos \Phi \cdot \cos I$$

$$Y = (\mathbf{u} + h) \cdot \cos \Phi \cdot \sin I$$

$$Z = (\mathbf{u} \cdot (1 - e^2) + h) \cdot \sin I$$

1.9. Las líneas geodésicas

Una línea geodésica es la distancia más corta, sobre el elipsoide, entre dos puntos dados.

Veamos este concepto con mayor detalle.

No cabe duda de que la distancia más corta entre dos puntos es la línea recta, pero esto sólo se cumple si estamos hablando de una superficie plana. Supongamos, en primer lugar, esférica la superficie terrestre.

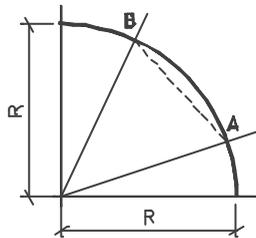


Fig. 21: Distancia entre dos puntos suponiendo esférica la superficie terrestre

En ella, será imposible seguir tal línea recta, y la mínima distancia entre los puntos A y B (Fig. 21), vendrá determinada por la línea que resulta de la intersección del plano que pasa por los puntos A, B y por el centro de la esfera, con la superficie terrestre.

Si tomamos como superficie de referencia la del elipsoide, las cosas ya no son tan sencillas. En primer lugar, debemos tener en cuenta que *“Las normales al elipsoide trazadas desde dos puntos con diferente latitud, se intersectan con el eje menor del elipsoide en puntos diferentes (Fig. 22)”*.

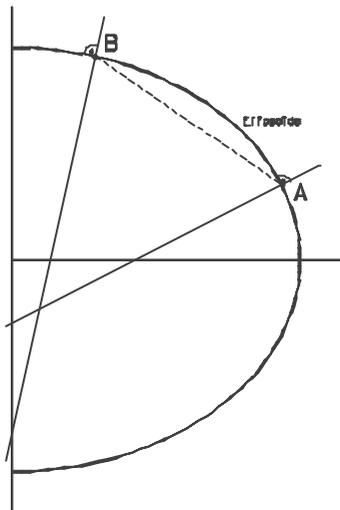


Fig. 22: Distancia entre dos puntos sobre el elipsoide de referencia

El problema se complica cuando los puntos A y B se encuentran en distintas elipses meridianas (tienen distinta longitud geodésica, caso más frecuente), pues las verticales al elipsoide serán dos rectas que se cruzan en el espacio, siendo imposible determinar, al contrario que su-

cedía con la esfera, un único plano que contenga a los dos puntos y a las verticales trazadas desde ellos a la superficie del elipsoide. Por esta razón, suele decirse que el *plano normal directo de A a B* es el que pasa por estos puntos y contiene a la normal al elipsoide en A. Del mismo modo, el *plano normal directo de B a A* será el que pasa por estos puntos y contiene a la normal en B.

Está claro que las secciones generadas por estos dos planos con la superficie del elipsoide no serán coincidentes (Fig. 23).

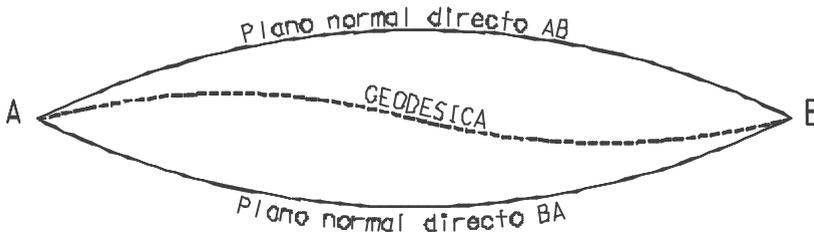


Fig. 23: Determinación de las líneas geodésicas

Este efecto, aunque en principio podría parecer de poca importancia, es de gran trascendencia cuando estamos trabajando con el elipsoide y no con la esfera, es decir, cuando estamos en los dominios de la Geodesia.

La razón puede comprenderse con un ejemplo: supongamos que, estacionados en un punto A, visamos otros dos puntos B y C, midiendo el ángulo horizontal correspondiente. Este ángulo estaría determinado por el diedro formado por los planos normales directos A-B y A-C. Si quisiéramos medir el resto de los ángulos del triángulo formado por estos tres puntos, nos situaríamos en B y C respectivamente. Desde B,

el ángulo estaría definido por el diedro que forman los planos normales directos B-A y B-C, y lo mismo pasaría con C. Como hemos dicho que los planos directos desde dos puntos correlativos no coinciden, llegaríamos a obtener un triángulo sobre el elipsoide que no es cerrado.

La solución consiste en unir los vértices de los triángulos (A, B y C) mediante líneas geodésicas (mínima distancia entre cada dos puntos), y no mediante secciones normales.

Tras haber comprendido este concepto, podemos definir ya las líneas geodésicas como curvas alabeadas en las cuales su normal principal⁶ es coincidente con la normal al elipsoide en cada uno de los puntos de dicha curva.

1.10. Redes Geodésicas

El establecimiento de *redes geodésicas* es uno de los objetivos principales que se persiguen con la Geodesia, pues en ellas se basarán una gran cantidad de estudios y trabajos posteriores (levantamientos topográficos, etc.).

Las redes geodésicas consisten básicamente en una serie de puntos distribuidos por toda la superficie de un país, formando una malla de triángulos, en los cuales, tras un proceso de complejos cálculos, se conocen todos sus elementos, incluyendo las coordenadas de todos sus

⁶ Es conveniente recordar que, en una curva alabeada, el plano osculador es el que contiene a la tangente y a la normal principal en un punto dado de dicha curva. La binormal es la normal a la curva que, a su vez, es perpendicular al plano osculador.

vértices, a los que denominaremos *vértices geodésicos*.

Para determinar las coordenadas de los vértices geodésicos se parte de las del Punto Astronómico Fundamental, que se determinan por métodos exclusivamente astronómicos, como ya hemos dicho anteriormente. Posteriormente, se irán determinando el resto de puntos mediante visuales que formen una malla triangulada. Es necesario medir, con la máxima precisión, los tres ángulos de cada triángulo (triangulación), además de una línea determinada por dos vértices que suele tomarse hacia el centro del país, denominándose *base*, que, como su propio nombre indica, es la base de toda la red geodésica, razón por la cual es imprescindible establecerla con absoluta precisión, muy por encima de la que estamos acostumbrados a obtener en los trabajos topográficos convencionales.

A partir de la base, que constituye el lado de uno de los triángulos, y de la medición de los ángulos, se van determinando el resto de coordenadas, teniendo en cuenta que estos triángulos están sobre el elipsoide y sus lados serán líneas geodésicas (lo que complica los cálculos enormemente), y apoyándose unos triángulos en otros.

La Geodesia también necesita conocer la orientación, y se determina, en cada punto geodésico, la dirección Norte-Sur, que es la intersección del plano horizontal, tangente al elipsoide en ese punto y el plano del meridiano que pasa por el mismo punto. Esta línea se llama **meridiana**. El ángulo que forma la meridiana con una dirección dada del terreno se llama **acimut** de dicha dirección.

Para evitar en lo posible la lógica acumulación de errores que supone el cálculo de unos triángulos apoyados en los anteriores, se es-

tablecen redes geodésicas de distinta precisión u orden. Generalmente se disponen redes de primero, segundo y tercer orden, con precisiones progresivamente decrecientes.

- La red geodésica de primer orden está formada por triángulos de 30 a 80 Km de lado, pudiendo llegar en casos excepcionales a más de 200 Km (caso en la geodesia española del lado Mulhacén (Sierra Nevada)-Filhaussen (Argelia), con 270 Km.).
- La red de segundo orden se basa en la anterior y tiene triángulos de 10 a 30 Km.
- La red de tercer orden se apoya en la de segundo y tiene triángulos con lados de 5 a 10 Km.

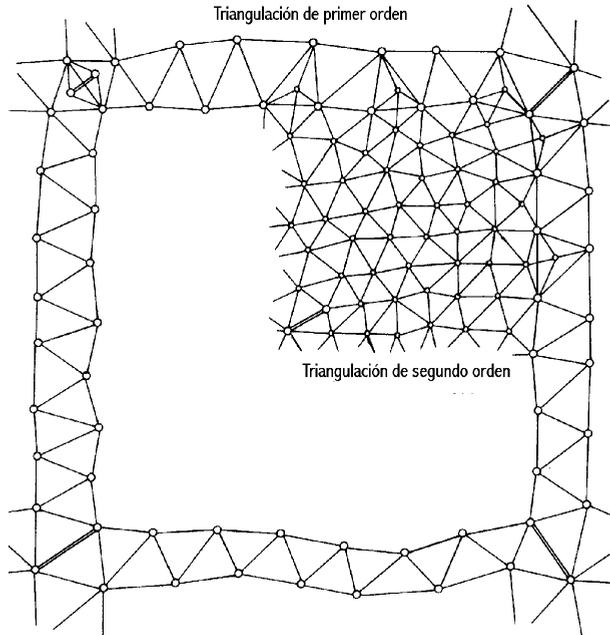


Fig. 24: Red geodésica. Fuente: Topografía, Serafín López-Cuervo y Estévez, Ed. MundiPrensa, 1993

Los triángulos de primer y segundo orden son elipsoídicos, es decir, se calculan sobre el elipsoide, pues con estas dimensiones no puede prescindirse de la esfericidad terrestre. Los triángulos de tercer orden se calculan ya como planos, y el terreno limitado por ellos entra ya en los dominios de la Topografía.

En España, actualmente, tras la reconstrucción de la Red Geodésica Nacional, sólo se contemplan ya dos tipos de vértices: los de primer orden y los de orden inferior.

Completamos este apartado relativo a las redes geodésicas con

palabras del profesor Mario Ruiz Morales⁷, el cual afirma con acierto que “el objetivo final de la red geodésica es el cálculo de las coordenadas geográficas de los vértices. Como la superficie de referencia es un elipsoide de revolución, se tratará entonces de calcular las coordenadas latitud y longitud relativas a una serie de puntos aislados sobre él situados. Tras las mediciones efectuadas en campo y realizados los correspondientes cálculos y compensaciones, se dispondrá de un conjunto de distancias, ángulos y acimutes que describen las figuras triangulares formadas por todos los vértices. Evidentemente, serán necesarios los datos de partida que establezcan la posición de la red sobre el elipsoide y su orientación sobre el sistema de meridianos y paralelos del mismo. Estos datos de partida se pueden presentar de dos formas:

- Mediante las coordenadas geodésicas de un punto, la distancia entre dos vértices y el acimut del lado correspondiente.
- Mediante las coordenadas geodésicas de dos vértices.

⁷Ruiz Morales, M: Manual de Geodesia y Topografía, Granada, 1991, pág. 64.

1.11. La Red Geodésica Española

Ya en el siglo XVIII tuvieron lugar los primeros intentos para iniciar el estudio de la red geodésica española, a cargo de Jorge Juan. Pero no fue hasta 1853, con la *Ley de Medición del Territorio*, cuando se iniciaron estos trabajos de una forma seria. Primero fueron encomendados al *Ministerio de la Guerra* y después al de *Fomento*. El objetivo era la creación del *Mapa General de España*.

En 1857 se midió la *base de Madrideojos*, lado fundamental de la triangulación geodésica del País.

Los trabajos avanzaban con lentitud, en parte debido a confusión administrativa, hasta que el 12 de septiembre de 1870 se crea el *Instituto Geográfico*, cuya dirección pasó a ocupar el General Don Carlos Ibáñez de Ibero.

El Instituto Geográfico tenía como misión principal la creación del *Mapa Topográfico Nacional* a escala 1/50.000, que comenzó a publicarse en 1875. Así comenzó la observación de la red de primer orden. Simultáneamente, el *Depósito de la Guerra*, creado en 1810, seguía desarrollando sus trabajos cartográficos, convirtiéndose en 1939 en el actualmente conocido *Servicio Geográfico del Ejército*⁸.

1.11.1. El sistema RE-50

Es la red geodésica actualmente en vigencia en España. El siste-

ma de referencia está determinado por el elipsoide internacional de Hayford (1924), el Datum Potsdam y el meridiano de Greenwich como origen de longitudes.

La red de primer orden está formada por un total de 573 vértices, con un espaciamiento medio de unos 40 Km (Fig. 25).

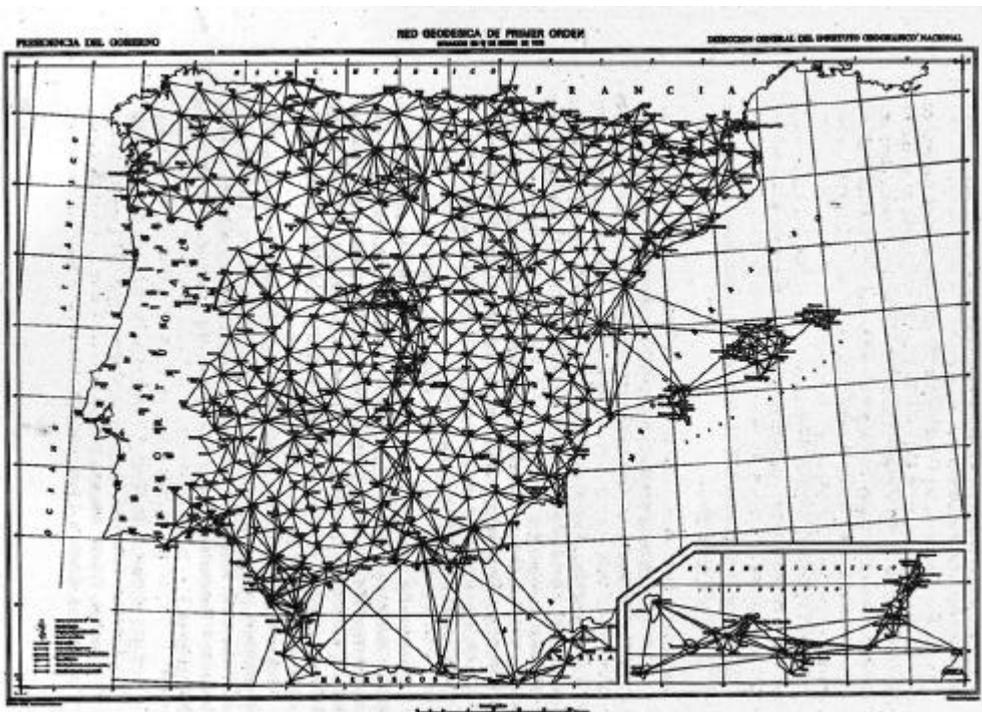


Fig. 25: Red Geodésica Nacional de primer orden. Fuente: Dirección General del Instituto Geográfico Nacional

⁸ Vázquez Maure, F./Martín López, J.: *Lectura de Mapas*, Madrid, 1987, pág. 309.

Sus trabajos terminaron poco después que los de la red de segundo orden, concretamente en el año 1930.



Fig. 27: Vértice geodésico de tercer orden, denominado "Sierrilla". Situado en las proximidades de la zona de la Sierrilla (Cáceres), cuenta con una altitud de 521,20 metros y unas dimensiones reglamentarias para este tipo de señales (base prismática cuadrangular de 1 metro de lado y pilar cónico de 0,30 metros de diámetro y 1,20 de altura). Este vértice pertenece además a la red IBERIA95

Apoyándose en los vértices de la red, y mediante la intersección de varias visuales, se determinaron también las coordenadas de las veletas de las iglesias de los pueblos.

A continuación se muestra una imagen del formato oficial con el que se registran y catalogan todos los vértices geodésicos de la red. A este documento se le conoce con el nombre de "reseña".

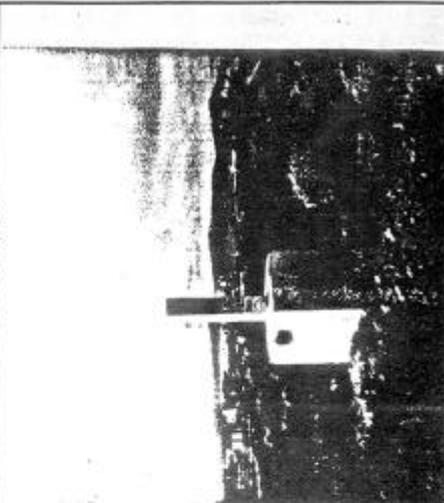
CIRCUITO DE ACCESO					
VERTICE	PR	NOMBRE DEL VERTICE	TERMINO MUNICIPAL	CONST.	OBS.
	00	SIERRILLA	CÁCERES	0.180	
ALTIUD (G)		LATITUD	LONGITUD	ALTIUD (E)	CALCULO
521.120		57° 29' 33.440	-6° 03' 34.300		
Escala		X	Y	CONVERGENCIA	FACTOR ESCALA
2844301		95	4373832	47	1.0002443
VERTICE	VE VISADO	NOMBRE VERTICE VISADO	DISTANCIA	ACIMUT	FOTOGRAFIA
					

Fig. 29: Reseña del vértice geodésico "Sierrilla", en Cáceres. Parte trasera

1.11.2. La red de nivelación

El desarrollo de una red de nivelación se acometió con el objeto de asignar cota a los vértices geodésicos previamente determinados mediante operaciones planimétricas. Para ello, se tomó como referencia de altitudes el nivel medio del mar en Alicante, instalándose una escala de mareas en el puerto marítimo de esta ciudad. El primer punto de la llamada *Nivelación de Precisión* (NP-1), se situó en el primer peldaño de la escalera del Ayuntamiento de Alicante, enlazándose con la base de la escala de mareas mencionada.

En España, la nivelación de precisión ha experimentado tres fases en su desarrollo.

Entre 1867 y 1922 se acometió la llamada Nivelación de Precisión (Red NP), en la que fueron utilizados aparatos muy simples y no se llevaron a cabo correcciones ni compensaciones de ningún tipo. En 1925 se publicó el *Catálogo de altitudes de las señales metálicas de la red*, tratándose de altitudes geométricas calculadas arrastrando desniveles sucesivos.

Después de 1922 se detuvieron los trabajos de nivelación, en espera de poder iniciar la Nueva Nivelación de Alta Precisión con las directrices marcadas por la XVII Conferencia de la Asociación Geodésica Internacional, celebrada en Hamburgo, en 1912. El objetivo era recalcular la red NAP con nuevos instrumentos más modernos y precisos, y complementar las observaciones con el conocimiento del valor de la gravedad en una gran parte de las señales de la red de nivelación.

A partir del año 1975 se inició la reconstrucción de la red NAP, dado el mal estado en que ésta se encontraba⁹.

En la actualidad, según datos recabados a través del Servicio de Información Geográfica en Junio de 1998, la red geodésica española está totalmente reconstruida, aunque los nuevos vértices no siempre coinciden con los anteriores. Por ejemplo, antiguamente a todas las torres de las iglesias se les daba coordenadas, lo cual no se ha hecho en la nueva red.

1.11.3. La red IBERIA95

A continuación mostramos un breve resumen sobre la red IBERIA95, obtenido a través de las páginas con que cuenta el IGN en Internet.

“Durante la semana del 8 al 12 de Mayo de 1995 se llevó a cabo la observación de la campaña *IBERIA95* preparada en colaboración directa entre el *IGNE* (Instituto Geográfico Nacional de España) y el Instituto Portugués de Cartografía e Cadastro (IPCC). El objetivo primordial de *IBERIA95* es la densificación en la Península Ibérica del "*European Terrestrial Reference Frame 1989*" (*ETRF89*) y la mejora de precisiones de la campaña *EUREF89* en España y Portugal, estableciendo así una red geodésica tridimensional de alta precisión, alguna de cuyas estaciones coincide con la campaña *EUREF89*. La red está formada por 39 estaciones, de las cuales 27 son españolas y 12 portuguesas. El cálculo ha sido realizado utilizando el programa *Bernese GPS* software, Version UNIX 4.0, resultando las coordenadas finales en el sistema de referencia *ITRF96* para la época 1995.4 y en el sistema de referencia

⁹ López-Cuervo, S.: Topografía, Madrid, 1993, págs. 341 y ss..

ETRS89. Las coordenadas aproximadas se muestran en la tabla”.

Mediante la red IBERIA95 se pretende establecer una red de vértices geodésicos con coordenadas referidas al sistema WGS84, es decir, el empleado por los modernos receptores GPS. De esta manera, será posible actualizar la geodesia española a este sistema, con lo que sería del todo innecesario efectuar las transformaciones que la utilización del GPS conlleva, necesarias para conseguir la referenciación de las coordenadas WGS84, que suministra el receptor, con el sistema local empleado (veremos esto con más detalle en el siguiente epígrafe).



Fig. 30: Mapa de los vértices de la red Iberia 95 en Junio de 1998. Fuente: Instituto Geográfico Nacional (<http://www.geo.ign.es/>)

Tabla 3: Denominación y coordenadas aproximadas de los vértices de la red IBERIA95. Fuente: Instituto Geográfico Nacional (<http://www.geo.ign.es/>)

Estación	Latitud	Longitud
LAGOA (IE01)	43° 33' N	8° 14' W
TAZONES (IE02)	43° 32' N	5° 24' W
SAN TELMO (IE03)	43° 23' N	1° 47' W
CRUZ DE SOTO (IE04)	42° 38' N	6° 55' W
FRESAS (IE05)	42° 26' N	3° 10' E
QUINTANILLA (IE06)	42° 13' N	3° 52' W
SAN PEDRO (IE07)	42° 11' N	0° 19' E
LOMA NEGRA (IE08)	42° 04' N	1° 21' W
CABO (IE09)	41° 50' N	5° 44' W
ATALAYA (IE10)	41° 34' N	3° 10' W
RIGÜELA (IE11)	41° 13' N	0° 04' W
SALOU (IE12)	41° 03' N	1° 10' E
CORRAL (IE13)	40° 49' N	5° 36' W
SAN SEGUNDO (IE14)	40° 48' N	1° 40' W
IGNE (IE15)	40° 26' N	3° 42' W
CARBONERA (IE16)	39° 32' N	3° 35' W
PICAYO (IE17)	39° 38' N	0° 18' W
SIERRILLA (IE18)	39° 28' N	6° 23' W
LAS CABEZAS (IE19)	38° 44' N	2° 59' W
CASTILLO (IE20)	38° 44' N	2° 59' W
CARCHE (IE21)	38° 25' N	1° 10' W
RUBIO (IE22)	37° 51' N	4° 53' W
PIQUERAS (IE23)	38° 00' N	3° 15' W
TORRE MOYA (IE24)	36° 42' N	4° 11' W

BAÑOS (IE25)	36° 42' N	2° 50' W
VN9 (IE27)	36° 05' N	5° 48' W

1.11.4. La red 0 de España

Se trata en este caso de insertar, en cada hoja del MTN, un vértice con coordenadas referidas al sistema WGS84, para facilitar el trabajo con sistemas GPS. Se pretende finalizar el cálculo durante este año 1998. Actualmente (Junio 98) se dispone de aproximadamente tres cuartas partes de la Península calculadas y compensadas, aunque la compensación definitiva no podrá efectuarse hasta que se disponga de todos los vértices, pues, lógicamente, hay que actualizarla por cada vértice nuevo que se determina. Seguramente, en el año 1999 estén disponibles todos estos datos.

1.12. El sistema de posicionamiento global (GPS)

1.12.1. Introducción

El GPS (Global Positioning System, o Sistema de Posicionamiento Global) fue desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos (DoD) como un sistema de navegación de precisión, con fines militares.

Anteriormente, desde el año 1967, se venía utilizando el sistema TRANSIT (del que hablaremos posteriormente). A partir de 1973 se comenzó el desarrollo de lo que sería la actual constelación NAVSTAR (NAVigation Satellite Timing And Ranging, o Navegación por satélite con medición de tiempo y distancia), hasta que se lanzó el primer satélite de que formaría parte de la misma, concretamente el día 22 de Febrero de 1978. El propósito era lograr un sistema con precisiones 10 veces superiores a las del sistema TRANSIT.



Fig. 31: Satélite de la constelación NAVSTAR

Actualmente la constelación NAVSTAR está formada por 27 satélites (24 principales y 3 de reserva), que dan un alto grado de disponibilidad al sistema GPS en todo momento del día y en cualquier lugar.

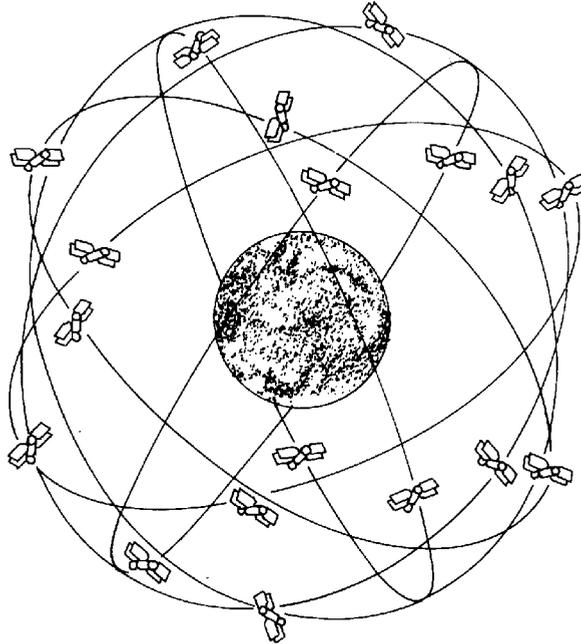


Fig. 32: Esquema de la constelación NAVSTAR

Sin embargo, no debe olvidarse que se trata de un sistema cuyo objetivo principal es servir como sistema de navegación para operaciones militares, razón por la cual el DoD puede alterar su funcionamiento en caso de considerarlo necesario.

Hoy día no se concibe el GPS como un sistema exclusivamente diseñado para la navegación, sino que se le han encontrado multitud de aplicaciones de gran interés, todas ellas basadas en la posibilidad de “posicionar” puntos sobre la superficie terrestre con gran precisión.

Tanto es así que podemos hablar de una “nueva era de la Topografía¹⁰”.

Actualmente se están empleando con éxito las técnicas GPS a la Topografía y la Geodesia, de manera que en muchas ocasiones resulta mucho más rentable que los procedimientos convencionales (baste con el ejemplo de que mediante GPS puede realizarse la batimetría de un embalse con rendimientos próximos a los 3.000 puntos diarios, superando de forma contundente a lo que podría obtenerse mediante una moderna estación total¹¹ y permitiendo realizar complejos trabajos en plazos de tiempo antes inimaginables). Además, no sólo es un sistema rápido a la hora de captar la información, sino que diversos añadidos (colectores de datos, software específico, etc.) permiten automatizar todo el proceso de toma y tratamiento de datos. Si lo combinamos con un ordenador personal y el software adecuado, los resultados son sorprendentes.

Si hablamos de precisión, los resultados en la medición de bases cortas son comparables a los obtenidos con distanciometría electrónica (EDM, Electronic Data Measurement) y en la determinación de grandes bases similares a los obtenidos con los métodos SLR (Satellite Laser Ranging) o VLBI (Very Long Baseline Interferometry).

Quiere todo esto decir que cada vez es más probable que nos encontremos con uno de estos aparatos en el ejercicio de nuestra actividad

¹⁰ Tal y como se refleja en el título de la obra “GPS: La Nueva Era de la Topografía”, por Alfonso Núñez-García del Pozo, José Luis Valbuena Durán y Jesús Velasco Gómez (v. bib.).

¹¹ Datos suministrados por la empresa extremeña ATICSA (Asistencia Técnica de Ingeniería Civil, S.A.), relativos a uno de los trabajos realizados por personal de la misma.

ingenieril. Por ello, nada mejor que actualizar algunos conocimientos y prepararse para lo que se presenta ya como un futuro inmediato.

El funcionamiento del sistema GPS a nivel básico es bastante sencillo, aunque encierra un sinfín de complejidades técnicas que, sin embargo, no deben preocuparnos excesivamente, pues los modernos receptores están muy avanzados y permiten su utilización por personal no especialmente cualificado. La complejidad está dentro, igual que en otros muchos aparatos que normalmente utilizamos (como los teléfonos móviles GSM), aunque no nos demos cuenta de su existencia.

1.12.2. Constitución del sistema GPS

El sistema GPS está formado por tres “segmentos”, a saber:

- Segmento espacial
- Segmento de control
- Segmento de usuario

1.12.2.1. El segmento espacial

Está constituido por los satélites de la constelación NAVSTAR. Como ya dijimos anteriormente, en la actualidad esta constelación está formada por un total de 27 satélites, de los cuales 3 son de reserva y los otros 24 están distribuidos en 6 planos orbitales (cada uno de ellos con 4 satélites en una órbita prácticamente circular, a 20.180 Km de altitud. Fig. 32). Estos 6 planos están igualmente espaciados entre sí en 60° y forman un ángulo de unos 55° con el plano definido por el Ecuador.

La constelación NAVSTAR, así configurada, permite que sobre el horizonte de cualquier lugar de la Tierra puedan verse simultáneamente entre 6 y 11 satélites (normalmente denominados SVs, o Space Vehicles), lo cual posibilita la continuidad¹² de las observaciones durante las 24 horas del día.

1.12.2.2. El segmento de control

La constelación NAVSTAR está controlada desde tierra a través de una serie de cinco estaciones oficiales de seguimiento repartidas por todo el planeta (Fig. 33). Existe una estación central (la de Colorado Springs, y otras cuatro estaciones secundarias, en Hawaii, Ascensión, Diego García y Kwajalein.



Fig. 33: GPS. Segmento de control. Estaciones de seguimiento.
Fuente: Peter H. Dana, Department of Geography, University of Texas at

¹² Veremos más adelante que se necesitan como mínimo cuatro satélites para determinar las coordenadas de un punto.

Austin

Las estaciones de seguimiento, tal y como se observa en el mapa de la Fig. 33, están espaciadas regularmente en longitud y sus coordenadas están determinadas con suma precisión. Su misión es la de estar en continua comunicación con los satélites, recibiendo las señales emitidas por estos, para así poder determinar sus órbitas con gran exactitud.

Los datos recogidos por las estaciones secundarias son enviados a la principal, donde son debidamente procesados, calculándose las efemérides¹³, el estado de tiempos, etc. Toda esta información se transmite a los satélites en los cuales queda almacenada.

Por tanto, queda claro que es posible, desde tierra, determinar las posiciones exactas de cualquiera de los satélites GPS en un momento determinado.

1.12.2.3. El segmento usuario

Está formado por los instrumentos que nosotros, los usuarios, necesitamos para utilizar el sistema GPS de cara a la navegación, posicionamiento, control preciso de tiempos, etc.

Básicamente, un equipo GPS está compuesto por un receptor o sensor con antena (que puede ser externa o integrada en el propio sensor, Fig. 34) que se comunica con los satélites, y por una unidad de control que permite la interoperatividad con el usuario. Adicionalmente, cada vez se incluyen mayor número de accesorios con diversas funcionalidades.

¹³ Las efemérides son el conjunto de posiciones de los cuerpos celestes calculadas para diferentes instantes separados uniformemente en el tiempo. Fuente: Enciclopedia Multimedia PlanetaDeAgostini.



Fig. 34: Sensor GPS con antena integrada. Fuente: <http://www.leica.com>



Fig. 35: Unidad de control para GPS. Permite al usuario utilizar el sistema.
Fuente: <http://www.leica.com>

Los modernos sistemas GPS son muy ligeros, tanto que todo el equipo necesario puede transportarse en un maletín (Fig. 36), a excepción de otros elementos de mayores dimensiones como el trípode o el bastón de aplomar.



Fig. 36: En un pequeño maletín cabe todo el equipo, desde el sensor y la unidad de control hasta las baterías, soportes, cables, etc. Fuente: <http://www.leica.com>

Bien, tras haber hecho una introducción y una visión rápida de los tres segmentos que conforman el sistema GPS, vamos a estudiar los principios de funcionamiento del mismo.

1.12.3. Esquema de funcionamiento del GPS

Hasta ahora hemos visto que existe una constelación de satélites distribuidos en órbitas determinadas, de los cuales puede determinarse su posición en un momento concreto en función de la posición de una serie de estaciones de seguimiento en tierra que cuentan con coordenadas bien definidas.

Asimismo, hemos visto que el segmento del usuario se compone de unos receptores que se comunican con los satélites NAVSTAR y que nos van a permitir determinar su posición basándonos en la de los satélites.

La base de todo el sistema es una medición exhaustiva de la distancia que nos separa de los satélites.

La explicación es sencilla: si sabemos que nos encontramos a 20.000 Km de un satélite determinado, está claro que estaremos situados dentro de la superficie de la esfera que, con centro en el satélite, tiene un radio de 20.000 Km (Fig. 37).

Si disponemos de las distancias a dos satélites, las posibilidades se reducen, y nos encontraremos dentro de la circunferencia de intersección entre las dos esferas que tienen centros en cada uno de los satélites y radio las distancias a cada uno de ellos respectivamente (Fig. 38).

Por último, si disponemos además de la distancia a un tercer satélite, nuestra posición estará determinada por la intersección de la tercera esfera con la circunferencia anterior (intersección de las dos pri-

meras esferas). La intersección de una esfera con una circunferencia da como resultado dos puntos del espacio, que serán los únicos en los que podemos encontrarnos si disponemos de las distancias a tres satélites distintos (Fig. 39).

En estos momentos puede surgir la pregunta de cómo podemos saber cuál de los dos puntos obtenidos representa realmente nuestra posición. Bien, para ello existen varios métodos. Uno de ellos consistiría en realizar otra medición más (la cuarta) a otro satélite. Otro suele ser el descartar uno de los puntos por ser absurdo, lo que sucede a menudo. Adicionalmente, si conocemos nuestra altitud también podemos descartar uno de los puntos.

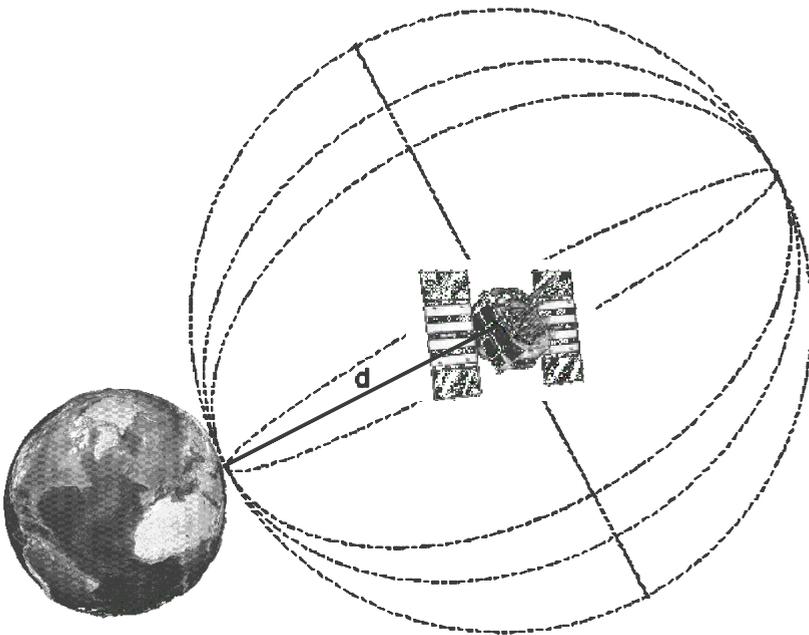


Fig. 37: Con la distancia a un solo satélite nuestra posición estará dentro de la esfera de la figura

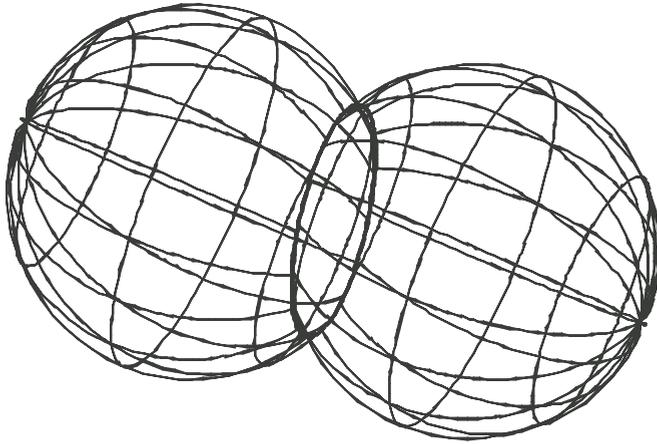


Fig. 38: Disponiendo de la distancia a dos satélites, nos encontraremos dentro de la circunferencia intersección de las esferas de la figura

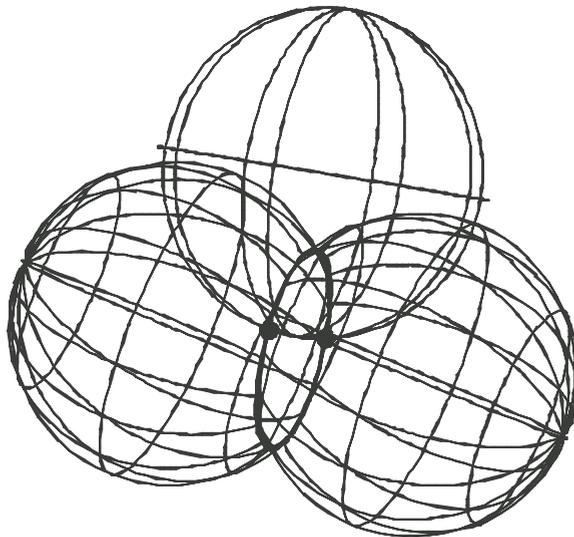


Fig. 39: Con las distancias a tres satélites solamente existen dos puntos del espacio en los que podemos estar

Como puede verse, el fundamento del sistema GPS es sencillo y claro. En palabras de Jeff Hurn¹⁴, “todo lo demás que se diga acerca del mismo, no serán más que detalles técnicos destinados a llevar a cabo este proceso de medición de distancias”.

1.12.4. Medición de la distancia a los satélites

De nuevo, el concepto es muy sencillo, pues se basa en que los satélites GPS emiten señales en forma de ondas de radio, las cuales “viajan” a la velocidad de la luz (aproximadamente 300.000 Km/seg. en el vacío). Si sabemos el momento en que un satélite emite una señal y el momento en el que la recibimos en nuestro receptor, el cálculo de la distancia es tan sencillo como aplicar la fórmula:

$$S = C \cdot \Delta t$$

donde C es la velocidad de la luz y Δt el tiempo transcurrido durante el viaje de la señal desde el satélite hasta el receptor.

Lo que ya no es tan sencillo es disponer de la tecnología suficiente como para medir con gran exactitud intervalos muy cortos de tiempo. ¿Por qué son tan cortos dichos intervalos?. Pues basta con hacer un rápido cálculo:

Si suponemos que un satélite GPS se encuentra a unos 20.000 Km de distancia y que la luz viaja a 300.000 Km/seg., serán necesarios solamente 6/100 segundos (0,06 seg.) para que la señal llegue hasta no-

¹⁴ GPS: Una guía para la próxima utilidad, por Jeff Hurn para Trimble Navigation

sotros.

Por tanto, se necesitan relojes de gran precisión, tanto en los satélites como en los receptores, para obtener resultados satisfactorios. Los primeros disponen de relojes atómicos, con precisiones que oscilan entre 10^{-11} y 10^{-14} segundos (10^{-11} a 10^{-12} en los osciladores de Rubidio, 10^{-12} a 10^{-13} en los de Cesio y 10^{-14} en los de Hidrógeno). Los receptores cuentan con osciladores de cuarzo (mucho más baratos) muy precisos (del orden de nanosegundos, 10^{-9} seg.).

1.12.5. Cálculo de coordenadas

La diferencia de precisión entre unos relojes y otros es enorme (la luz recorre 30 cm en 10^{-9} seg., pero tan solo recorre 0,003 mm en 10^{-14} seg.). Esto va a causar cierta ambigüedad a la hora de determinar nuestra posición.

Una solución al problema sería instalar relojes atómicos también en los receptores, pero el inconveniente es el enorme costo de estos dispositivos. Existe una solución mucho más sencilla y económica, basta con efectuar una cuarta medición a otro satélite. Se establece así un sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas (las tres coordenadas del punto y la desviación del reloj del receptor), tal y como se muestra en el siguiente desarrollo:

Recordando la ecuación de una esfera de centro (X_o, Y_o, Z_o) y radio R :

$$(X - X_o)^2 + (Y - Y_o)^2 + (Z - Z_o)^2 = R^2$$

En nuestro caso, disponemos de cuatro esferas, con radios R_1 , R_2 , R_3 y R_4 ; de tal manera que:

$$R_1 = C \times \Delta t_1$$

$$R_2 = C \times \Delta t_2$$

$$R_3 = C \times \Delta t_3$$

$$R_4 = C \times \Delta t_4$$

donde C es la velocidad de la luz y Δt_n es el intervalo de tiempo que transcurre desde que el satélite “ n ” envía la señal hasta que el receptor la capta.

Teniendo en cuenta que las distancias así calculadas contienen ciertos errores derivados de la imprecisión de los relojes de los receptores, podemos corregirlas introduciendo una nueva incógnita que sea la desviación de los mismos, generalmente designada por CB (Clock Bias). De manera que tendríamos:

$$R_1' = C \times \Delta t_1 - CB$$

$$R_2' = C \times \Delta t_2 - CB$$

$$R_3' = C \times \Delta t_3 - CB$$

$$R_4' = C \times \Delta t_4 - CB$$

Por tanto, el sistema de ecuaciones quedaría establecido de la forma siguiente:

$$\begin{aligned}(X - X_1)^2 + (Y - Y_1)^2 + (Z - Z_1)^2 &= (R_1 - CB)^2 \\(X - X_2)^2 + (Y - Y_2)^2 + (Z - Z_2)^2 &= (R_2 - CB)^2 \\(X - X_3)^2 + (Y - Y_3)^2 + (Z - Z_3)^2 &= (R_3 - CB)^2 \\(X - X_4)^2 + (Y - Y_4)^2 + (Z - Z_4)^2 &= (R_4 - CB)^2\end{aligned}$$

donde (X, Y, Z) son las coordenadas del punto que queremos determinar, CB es la desviación del reloj y (X_n, Y_n, Z_n) las coordenadas de los centros de cada una de las cuatro esferas (conocidas, pues coinciden con la posición de cada satélite).

Lógicamente, nosotros no tenemos que encargarnos de resolver este sistema de ecuaciones, sino que la unidad de control que acompaña al receptor GPS (Fig. 35) será la que los efectúe y nos presente los datos finales en pantalla. Además, esta unidad dispone de muchas funciones adicionales que veremos más adelante.

El hecho de que necesitemos al menos cuatro determinaciones, implica que el receptor GPS debe ser capaz de recoger de forma simultánea las señales de cuatro satélites como mínimo, es decir, deberá contar con cuatro *canales* independientes. Los modernos receptores cuentan con 9 y hasta 12 canales, lo cual permite efectuar otras tantas determinaciones a satélites distintos simultáneamente.

Esto tiene una gran importancia, pues veremos posteriormente que la posición espacial de unos satélites es más favorable que la de otros. Está claro que si disponemos de más satélites y de un sistema que analice sus posiciones relativas y efectúe los cálculos con los más favorables (como de hecho lo hacen los actuales receptores), obtendremos mayor precisión.

1.12.6. Los códigos utilizados en el sistema GPS

¿Cómo sabemos cuándo envió el satélite la señal que recibimos?. Esta pregunta es de gran importancia, pues sin respuesta a la misma, no habría forma de medir el tiempo. De nuevo, todo está pensado. Tanto los satélites como los receptores GPS están diseñados de tal manera que el oscilador presente en ambos genera el mismo código a la misma hora. El código del satélite tardará algún tiempo en llegar hasta nosotros, así que si lo comparamos con el código generado por nuestro receptor, podremos determinar el desfase existente entre ambos.

Vayamos en primer lugar con los satélites: Los osciladores de estos generan una *frecuencia fundamental* de 10,23 MHz. De ésta se derivan el resto de frecuencias utilizadas, en concreto las dos *frecuencias portadoras* L1 y L2, obtenidas de la siguiente forma:

$$\text{Fundamental } (10,23\text{MHz}) \times 154 = \text{Portadora L1 } (1575,42\text{MHz})$$

$$\text{Fundamental } (10,23\text{MHz}) \times 120 = \text{Portadora L2 } (1227,60\text{MHz})$$

Estas dos frecuencias¹⁵ portadoras (L1 y L2) se denominan con la letra L porque pertenecen a dicha banda de radiofrecuencias, la cual está comprendida entre 1 GHz y 2 GHz.

Sobre estas dos frecuencias portadoras se transmiten, a su vez,

¹⁵ Veremos un poco más adelante, en el epígrafe dedicado a las fuentes de error inherentes al sistema GPS, que la utilización de dos frecuencias distintas va a permitir el cálculo del retraso ionosférico y la corrección de esta fuente de error. Para ello, necesitaremos los hoy generalizados receptores de doble frecuencia.

dos códigos, a saber:

- El código C/A (Course/Acquisition) o también denominado S (Standard) es el de menor frecuencia (utiliza la fundamental dividida por 10, es decir, 1,023 MHz). En principio es el que ofrece menores precisiones y se utiliza en el llamado SPS (Standard Positioning Service, o Servicio de Posicionamiento Standard), para uso civil. Se transmite sobre la portadora L1.
- El código P (Precise) se transmite directamente a la frecuencia fundamental (10,23 MHz), ofrece mayor precisión y se utiliza en el denominado *posicionamiento preciso* (PPS, Precise Positioning Service). Se transmite sobre las portadoras L1 y L2.

Junto con estos dos códigos, se envía un *mensaje*, que es el que suministra toda la información que necesitan los usuarios del sistema GPS.

Cada satélite debe emitir un código diferente, pues en caso contrario, como todos se basan en las mismas frecuencias portadoras, que a su vez se derivan de una única frecuencia fundamental, no habría forma de distinguirlos entre sí.

La complejidad del código generado es muy grande, pues se basa en desarrollos polinómicos, dando lugar a códigos que más se parecen a una serie de impulsos aleatorios (XX), razón por la que se han denominado *códigos pseudo-aleatorios*.

1.12.7. Fuentes de error en el sistema

A pesar de que, dentro de lo posible, se ha intentado que cada uno de los componentes del sistema GPS tenga una elevada precisión, existen fuentes conocidas de error que afectan a los resultados finales. A continuación mostramos cuáles son:

1.12.7.1. Retraso ionosférico y atmosférico

Ya comentamos que el GPS utiliza ondas de radio en las transmisiones. El hecho es que al estar los satélites a unos 20.000 Km de altitud, las señales deben atravesar sucesivamente el vacío, la ionosfera y la troposfera.

Hemos visto que las ondas de radio viajan a la velocidad de la luz, que normalmente se supone un parámetro inmutable y fijo de valor igual a 300.000 Km/seg. Sin embargo esta es la velocidad de propagación de la luz en el vacío, cuando se propaga en otro medio existe un cierto retardo que, aunque pudiera parecer muy pequeño, afecta de una manera importante a las precisas mediciones efectuadas por los sistemas GPS.

El principal problema se encuentra en la ionosfera, una capa situada entre los 100 y los 1.000 Km de altitud en la que se ioniza (debido a la radiación solar) una parte de las moléculas de gas existentes, liberándose electrones en tal proceso. Estos electrones libres afectan directamente a la velocidad de propagación de las señales de radio, tanto más cuanto mayor cantidad de ellos sea interceptada por dichas señales.

Este problema tiene una solución bastante efectiva. Todo se basa en el conocimiento de que el retraso de las señales GPS es inversamente proporcional al cuadrado de las frecuencias de las mismas, es decir, cuanto menor sea la frecuencia (y por tanto mayor la longitud de onda), mayor será el retraso.

Teniendo esto en cuenta, si se emiten desde el satélite dos señales con frecuencias distintas en un instante determinado, podemos examinar, una vez que llegan al receptor, el desfase existente entre dos partes de dichas señales que, teóricamente, deberían haber llegado al mismo tiempo. De esta forma puede calcularse con bastante aproximación el retraso ionosférico (partiendo de las frecuencias de ambas señales y del desfase medido entre ambas en la recepción).

Por esta razón, se diseñó el sistema con las portadoras L1 y L2 anteriormente mencionadas.

Para poder aplicar estas correcciones necesitaremos un receptor que sea capaz de leer las portadoras L1 y L2. A este tipo de receptores se les llama de “*doble frecuencia*”, y su precio es bastante superior a los de una sola.

Una vez atravesada la ionosfera, queda todavía la troposfera, en la cual las fuentes de error más importantes son la variación de temperatura del aire seco y la presencia de vapor de agua. La primera tiene mucha mayor influencia (alrededor del 90%), pero el gradiente térmico puede determinarse con relativa facilidad, con lo que se eliminaría de igual manera el error cometido por este factor. Aunque la influencia del vapor de agua es mucho menor, es muy difícil determinar la distribución del mismo en la troposfera, y por tanto corregir esta fuente de imprecisión.

Existen unos aparatos que pueden medir la cantidad de vapor de agua en una determinada dirección. Se llaman radiómetros de vapor de agua y se utilizan solamente en circunstancias excepcionales en las que se requiera máxima precisión.

1.12.7.2. Otras fuentes de error

Podríamos destacar la imprecisión de los relojes, tanto en los satélites (muy pequeña, pero existente), como en los receptores. Ya hemos visto que la imprecisión del reloj de tierra puede eliminarse utilizando una cuarta determinación. Los relojes atómicos de los satélites son controlados regularmente por el DoD, efectuando las correcciones oportunas.

Otro error de cierta importancia es el conocido como “*multi-path*” o “*multisenda*”, que se produce cuando las señales no van directamente del satélite al receptor, sino que se desvían y sufren varios rebotes antes de alcanzar su objetivo. Los receptores GPS actuales incorporan diversos mecanismos para evitar este fenómeno y minimizar su influencia.

1.12.7.3. Dilución de la precisión geométrica (GDOP)

Anteriormente vimos, muy por encima, que la precisión final obtenida no solamente depende de que tengamos a nuestra disposición un cierto número de satélites, sino también de que estos tengan una situación espacial favorable de cara a las determinaciones geométricas que vamos a efectuar. Esto puede verse claramente en las siguientes figuras.

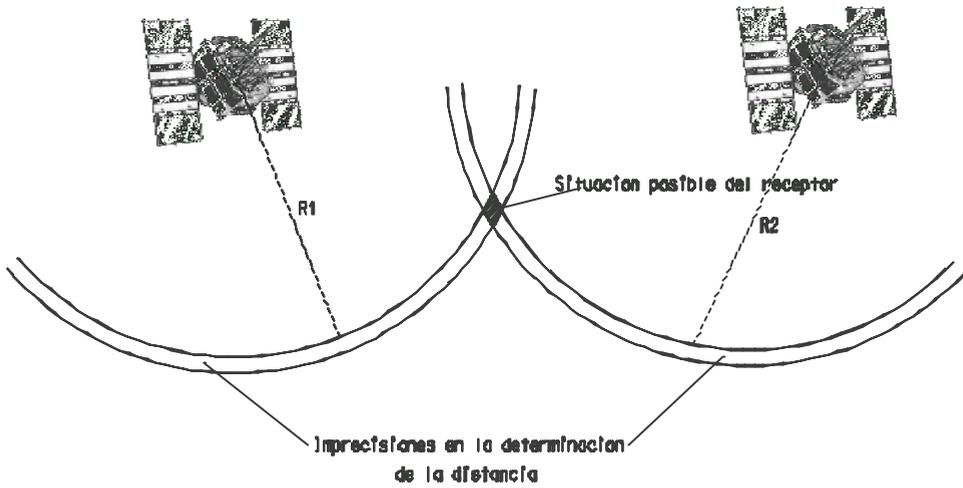


Fig. 40: Si los satélites están situados favorablemente, la zona en la que puede encontrarse el receptor es más pequeña

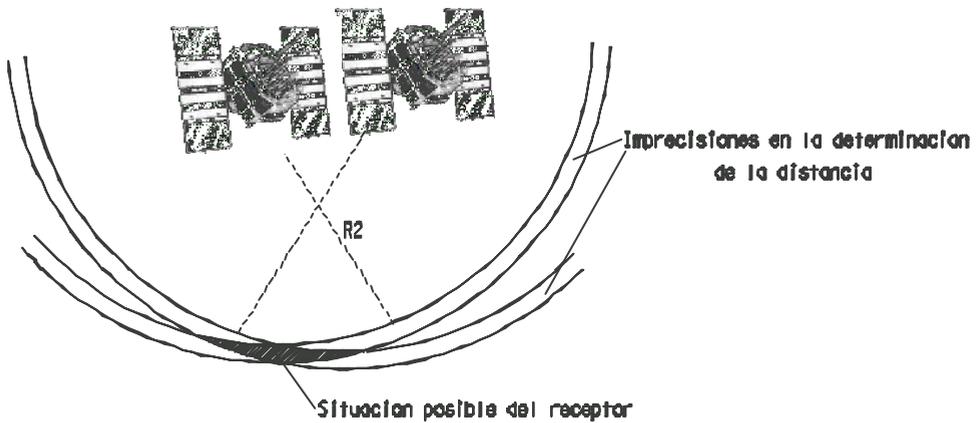


Fig. 41: Una distribución espacial desfavorable de los satélites, origina una mayor indeterminación en la situación del receptor

La GDOP es un valor adimensional representativo de la situación espacial de los satélites favorable o desfavorable. El valor ideal es 1, y va creciendo según empeoran las condiciones de los satélites visibles, hasta llegar a cierto límite en el cual no debería realizarse ninguna medición (establecido generalmente en 6).

Los receptores modernos, como ya se dijo, cuentan con funciones que les permiten evaluar la distribución espacial de los satélites y seleccionar los más adecuados para la medición, presentando en la pantalla de la unidad de control la GDOP mínima disponible (Fig. 35). Por ello, repetimos que es mejor disponer de varios canales¹⁶ adicionales en el receptor, de forma que éste puede efectuar el seguimiento simultáneo de un mayor número de satélites y minimizar el error GDOP.

1.12.7.4. La disponibilidad selectiva

Es una técnica mediante la cual el Departamento de Defensa de E.E.U.U. (DoD) se reserva el derecho de degradar la precisión del método SPS (Standard Positioning Service) con el objeto de impedir a los usuarios civiles obtener mejores de 100 metros.

A esta técnica se la ha denominado SA (Selective Availability, o Disponibilidad Selectiva) y se aplicó por primera vez en Marzo de 1990, como consecuencia del descubrimiento de que el SPS ofrecía precisiones mucho mayores de lo que se esperaba (casi tan grandes como las del PPS), lo cual, lógicamente, en previsión de momentos de crisis, no interesaba a las fuerzas militares norteamericanas.

¹⁶ Actualmente, en receptores de calidad, se están imponiendo modelos de 9 y hasta 12 canales independientes.

Actualmente, la SA puede ser aplicada sin previo aviso, lo que podría originar errores de gran importancia en nuestras medidas.

1.12.7.5.El Anti Spoofing (AS)

Es otra técnica mediante la cual el DoD puede convertir el código P, utilizado para el posicionamiento preciso (PPS), en código Y. Este último consiste en una combinación del código P con otro código secreto, el W. De esta forma, en un determinado momento, puede restringirse por completo el acceso al código P, salvo a determinados centros militares autorizados.

Por tanto, no debe confundirse la Disponibilidad Selectiva (SA) - mediante la cual se degrada el contenido del mensaje emitido junto con los códigos P y C/A -, con el Anti Spoofing (AS) mediante el cual puede encriptarse el código P para transformarlo en Y.

1.12.8. Nivel de precisión alcanzado con el GPS

La utilización del GPS con fines geodésicos ha pasado por gran cantidad de pruebas y experimentos para asegurar su precisión y efectividad. Podemos decir¹⁷ que hace pocos años se midió de nuevo la base de Madrideoj obteniendo errores del orden de 10^{-6} . Esta exactitud lo convierte en un método increíblemente adecuado para el control de redes geodésicas en primer término y, hoy día, dados los enormes avances que el método ha experimentado y su menor costo, para su utilización con fines topográficos convencionales.

¹⁷ Ruiz Morales, M.: Manual de Geodesia y Topografía, Granada, 1991, pág. 77.