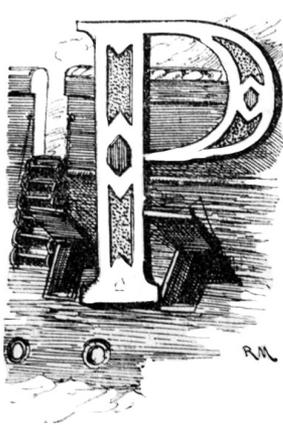


EL DATUM, EL GEOIDE, EL ELIPSOIDE Y LA CARTOGRAFÍA

Raúl VILLA CARO
Secretario de EXPONAV
Ingeniero naval y oceánico, capitán de la Marina
Mercante y profesor asociado de la UDC.

Introducción histórica



ODRÍAMOS definir la Cartografía como la ciencia y el arte de expresar gráficamente, mediante mapas y cartas, el conocimiento de la superficie de la Tierra. Es ciencia porque se basa en la coordinación de observaciones astronómicas con topográficas y geodésicas, utilizando técnicas matemáticas de cálculo y análisis; y es arte porque tiene en cuenta las leyes estéticas de simplicidad, claridad y armonía, procurando alcanzar un ideal artístico de belleza.

Nunca sabremos cuándo, dónde ni con qué objeto se le ocurrió por primera a alguien la idea de dibujar un boceto para comunicar un concepto de lugar. Antes de que los europeos llegaran al Pacífico, los indígenas de las islas Marshall ataban unos palos para indicar los vientos dominantes y el vaivén de las olas. Los hombres prehistóricos trazaban mapas esquemáticos en las paredes de las cuevas, y los incas hacían mapas en relieve de piedra y arcilla.

Determinar la longitud de la circunferencia de la Tierra constituyó el primer hito importante de la cartografía científica. Fue obra de un sabio, crítico teatral y bibliotecario griego llamado Eratóstenes, que vivió en el siglo III a. de C. y fue una de las lumbreras de la famosa Biblioteca de Alejandría. Eratóstenes conocía la existencia de un polo Nilo arriba, en Siena, donde a mediodía del solsticio de verano, el 21 de junio, los rayos del Sol descendían en vertical hasta el fondo. Si el mundo es una esfera, razonó, entonces el Sol debería iluminar en el mismo momento diferentes partes de la Tierra según ángulos distintos y proyectar unas sombras mensurables. Dado que supuestamente Alejandría estaba al norte mismo de Siena, disponía de dos lugares,

separados por una distancia conocida (precisada por caravanas de camellos), que se hallaban en el mismo meridiano.

Sin salir del recinto de la biblioteca, Eratóstenes examinó la sombra proyectada por una columna a mediodía del solsticio. Su ángulo medía un cincuentavo de círculo. Si se multiplica por cincuenta la distancia entre Alejandría y Siena se obtendría la circunferencia de la Tierra, que él cifró en 40.555 kilómetros. A pesar de que Alejandría y Siena no están exactamente en el mismo meridiano y que las mediciones de las caravanas no podían ser muy precisas, el cálculo del bibliotecario fue de una fidelidad extraordinaria. Hoy sabemos que la circunferencia longitudinal del planeta es de 39.720 kilómetros.

Apoyándose a menudo en las ideas de sus predecesores, en el siglo II d. de C. el astrónomo Tolomeo ideó un sistema para organizar los mapas según unas cuadrículas de latitud y longitud, y dejó otro legado importante, que fue su advertencia a los cartógrafos de aquilatar el conjunto en sus proporciones justas, es decir, trabajar a escala.

Dicen que todos los caminos llevan a Roma, y los romanos naturalmente fueron los primeros en levantar mapas de carreteras rigurosos. Sus copias en pergamino, modificadas y ampliadas en el curso de los años, formaban parte de la impedimenta de los generales y del equipaje de los viajeros.

Los manuales de navegación llamados portulanos supusieron tanto un cambio radical en la cartografía occidental como la innovación más fructífera de la Edad Media, en fecha tan temprana como el siglo XIII.

El origen de esta cartografía no está clarificado, según Luisa Martín-Merás:

«Es incierto aunque se sitúa en algún momento del Siglo XII y está ligado a la generalización de la brújula. Raimon Llull en el libro *Fénix de las maravillas del Orbe* de 1278 dice que los navegantes de su tiempo se servían de instrumentos de cartas marinas y de la aguja imantada» (1).

La manera en que se elaboraba la cartografía de esos años queda patente con John Noble Wilford:

«En la Biblioteca del Congreso de Washington examino una carta catalana anónima portulana del Mediterráneo, fechable alrededor de 1350. Esta carta evoca una imagen del arte de la cartografía tal como se ejercía entonces. Un escribiente solitario, inclinado sobre una mesa en algún taller marítimo, tal vez de Barcelona o de Mallorca, traza con pulso firme una línea

(1) MARTÍN-MERÁS, L.: *La imagen del mundo, 500 años de cartografía*. Instituto Geográfico Nacional, vol. «De los portulanos al padrón de las Indias», 1992, pp. 13-54,

costera. Dibuja redes de líneas rectas por las que los marinos podían encontrar el rumbo a lo largo de la costa usando la recién introducida aguja magnética» (2).

Si la brújula mejoró la navegación y alentó la demanda de cartas útiles, la prensa de imprimir permitió que los mapas llegasen a manos de un mayor número de personas y empezó a arrebatar su elaboración a los monjes. Las naves transoceánicas promovieron una era de hegemonía y descubrimientos y un naciente espíritu intelectual, motor del Renacimiento, que despertó el afán de conocer el mundo.

Los cartógrafos del siglo xv, inspirándose en Tolomeo, sustituyeron la teología por el conocimiento de lugares remotos extraídos de las crónicas de Enrique el Navegante y de mercaderes nómadas venecianos, como Marco Polo. Al estudiar aquellos mapas, los eruditos de Florencia reconocieron el océano ya no como una barrera, sino como una vía navegable que comunicaba todos los confines del orbe. Según algunos relatos, su concepto liberador animó a Colón, quien probablemente se sirvió de una única carta y del consejo de un cosmógrafo para trazar su ruta y acometer su viaje a las Indias.

Pero al final Colón sería traicionado por los cartógrafos. En un mapa de 1507, Martin Waldseemüller escribió en el continente meridional del Nuevo Mundo, en la región de Brasil, la palabra «América» en homenaje a otro navegante, Amerigo Vespuccio. El nombre se consolidó.

Gerardus Mercator, el cartógrafo más eminente del siglo xvi, desarrolló una técnica para distribuir los meridianos y los paralelos de tal manera que los navegantes pudieran trazar líneas rectas entre dos puntos y marcar un rumbo de brújula constante.

La cartografía científica terrestre adquirió gran auge con los logros de la familia Cassini (padre, hijo, nieto y bisnieto), quienes inventaron un complejo método para determinar la longitud basándose en observaciones astronómicas.

El hombre al que habitualmente asociamos con los cometas también se ganó un hueco en la historia cartográfica por trazar los primeros mapas que ilustraban el rumbo de los vientos y el magnetismo. En 1686, Edmond Halley levantó lo que se consideró el primer mapa meteorológico.

La combinación de la fotografía y la aviación, iniciada durante la Primera Guerra Mundial, agilizó la cartografía e hizo posible que sus especialistas accedieran a un terreno donde habían fracasado los topógrafos más intrépidos. En la actualidad, satélites espaciales diseñados para el reconocimiento militar permiten a los cartógrafos medir y plasmar más cosas en unas horas de lo que antes hacían en semanas, en años o quizá nunca.

(2) NOBLE, J.: «Revoluciones en cartografía», *National Geographic*, Vol. II. Núm. II, 1998.

Los cartógrafos actuales emprenden sus trabajos provistos de unos instrumentos electrónicos con los que pueden comunicar en cualquier momento con varios satélites orbitales del GPS (*Global Position System*/Sistema de Posicionamiento Mundial). Sus receptores portátiles GPS son la más socorrida de las nuevas tecnologías cartográficas. Desarrollado por el Departamento de Defensa de Estados Unidos, el sistema de satélites que fija objetivos de misiles y detecta rastros de buques y tropas de hasta unos pocos metros es utilizado cada vez más por los cartógrafos,

El geoide y el datum

Debido a la imposibilidad de materializar mediante una expresión matemática la superficie real de la Tierra, hay que adoptar distintas superficies de aproximación. La primera es considerar que en la Tierra no existen continentes y prescindir de todas aquellas causas que, como las mareas, vientos, corrientes, presión, etc., puedan alterar la figura formada por el mar en equilibrio extendido sobre la superficie terrestre. A esta superficie se le denomina geoide.

El geoide es pues una superficie de nivel, normal en todos sus puntos a la dirección de la gravedad y que goza de la siguiente propiedad importante: el plano tangente a cualquiera de sus puntos es normal a la dirección de la gravedad.

Esta superficie sería la ideal si pudiese expresarse en forma matemática, pero medidas de alta geodesia han demostrado que el geoide no es una superficie regular, ni tan siquiera simétrica, por lo que no puede expresarse mediante una fórmula matemática. Para resolver este problema hay que elegir una superficie hipotética que se aproxime lo más posible al geoide, suponerla tangente en un punto fundamental astronómico de la zona que se vaya a levantar y determinar la desviación de esta superficie con respecto al geoide a medida que nos alejamos del punto fundamental. A partir de las medidas efectuadas por Bessel (1841), Clarke (1880), Helmert (1907), y Hayford (1909) se dedujo que la superficie matemática que más se aproxima al geoide es la de un elipsoide de revolución.

A lo largo de los años este elipsoide ha ido sufriendo modificaciones en los parámetros que lo definen, buscando aquel que más se aproximara al geoide. En particular los dos últimos utilizados en la cartografía española son el de Struve, con el origen en Madrid, y el de Hayford, con origen en Potsdam, este último adoptado internacionalmente en 1924 como Elipsoide Internacional de Referencia.

Hay que procurar que las figuras proyectadas sobre el elipsoide de referencia discrepen lo menos posible de sus proyecciones sobre el geoide, tanto en su forma y magnitud como en su orientación, lo que se logrará cuando el elip-

soide se adapte lo mejor posible en forma, dimensiones y orientación al geode. Al conjunto de los siete parámetros que definen el elipsoide se le denomina el datum de la red. El datum geodésico no es otra cosa que un sistema de referencia de coordenadas geodésicas (latitud, longitud y altitud).

En la figura 1, de forma desmesurada y exagerada, pueden verse el geode, el elipsoide que se adapta a aquel en Europa, centrado en O' , y el que se adapta a Norteamérica, centrado en O'' . Si se extrapolan los dos elipsoides, respectivamente, se puede observar, de forma exagerada, el desajuste entre el geode y el elipsoide en los citados continentes. Los dos elipsoides son distintos en forma y tamaño.

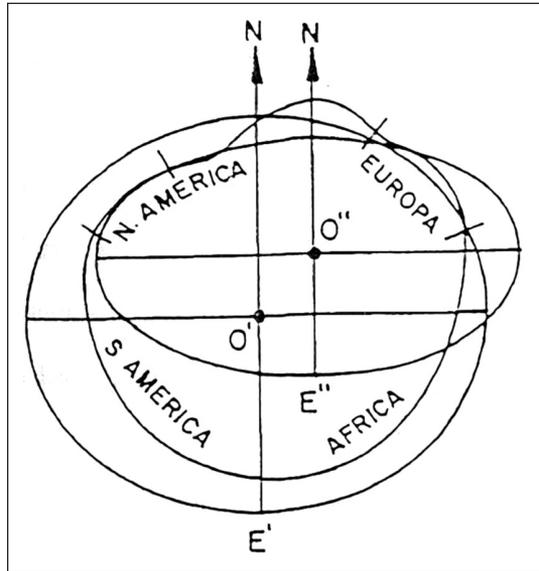


Figura 1: elipsoide y geode.

Al escoger un punto fundamental para efectuar nuestra observación astronómica y al elegir un elipsoide de referencia para efectuar sobre él nuestros cálculos, estamos estableciendo un datum geodésico. Todos los puntos enlazados, normalmente mediante triángulo, constituyen una red geodésica, cuyas coordenadas están todas ellas referidas a un mismo datum. Dicho de otra manera, al lado de cualquier coordenada de latitud y longitud tiene que figurar el datum al que están referidas, ya que las coordenadas son datos relativos.

A lo largo y ancho de la superficie terrestre se fueron estableciendo datums, definidos, como he dicho, por el punto fundamental y el elipsoide, a los que se denominan datums locales, en oposición a los que posteriormente se crearon con carácter mundial. Muchos de estos datums locales sirven todavía de referencia a las coordenadas de muchas de nuestras cartas (3).

La cartografía que no está basada en un datum único no es homogénea, pues un mismo vértice tiene coordenadas distintas, dependiendo del datum al que están referidas. Los puntos comunes, en dos cartas con distinto datum, tendrán coordenadas de latitud y longitud distintas. Es fácil de comprender,

(3) BONFORD, S.: *Geodesy*. Clarendon Press, Oxford, 1983, p. 102.

con la simple observación de la figura, que un mismo punto del geoido proyectado sobre cada uno de los elipsoides tiene en ellos distintas coordenadas. Basta ver las separaciones existentes entre los dos orígenes de coordenadas, O' y O''.

Dicho lo anterior, conviene precisar lo que sigue: las diferencias en las coordenadas son pequeñas cuando se trata de un vértice que está referido a dos datums locales cuyos puntos fundamentales están relativamente próximos. En estos casos suele ser tan pequeña la diferencia que no es representativa en la carta. Las diferencias son todavía menores cuando, además de estar los puntos fundamentales próximos, los dos datums tienen el mismo elipsoide.

Existen otros campos y actividades, como puede ser el militar, en el que la homogeneidad de todas las coordenadas sí que tiene importancia. Por este motivo, a nivel nacional, se intentó efectuar un enlace geodésico de todos los vértices de la Península y Baleares, tratando de referirlos a un único datum. De ello surgió el sistema de referencia español, denominado Datum Observatorio de Madrid, basado en los siguientes datos:

- Punto fundamental: Observatorio de Madrid.
- Elipsoide referencia: Struve.
- Origen de latitudes: Ecuador.
- Origen de longitudes: Meridiano Observatorio de Madrid.

En el año 1852 se nombró la Comisión del Mapa de España, que estableció las reglas con las que habría que medir la red geodésica, encargándose el Ministerio de la Guerra de la elaboración de dicho mapa, que comprendía la Península y Baleares y sus coordenadas referidas al Datum Madrid. Con ellas se reconstruyeron las cartas del norte de la Península, sin más corrección que la llevada a cabo para referir el origen de las longitudes al meridiano de Greenwich. En las cartas que utilizan este sistema de referencias de coordenadas figura una leyenda que dice «Datum Madrid».

Finalizada la Segunda Guerra Mundial, y por razones estrictamente militares, el Army Map Service de Estados Unidos unificó todas las redes geodésicas, obteniendo una red para todo el continente basada en los siguientes datos:

- Punto fundamental: Torre de Helmert (Potsdam).
- Elipsoide de referencia: Internacional o de Hayford.
- Origen de latitudes: Ecuador.
- Origen de longitudes: Meridiano de Greenwich.

A este sistema se le llamó en un principio Datum Potsdam, confundiendo el punto fundamental o punto de origen con el datum, y posteriormente y con más propiedad, Datum Europeo o Datum 50 (E. D. 50). A él se encuentran

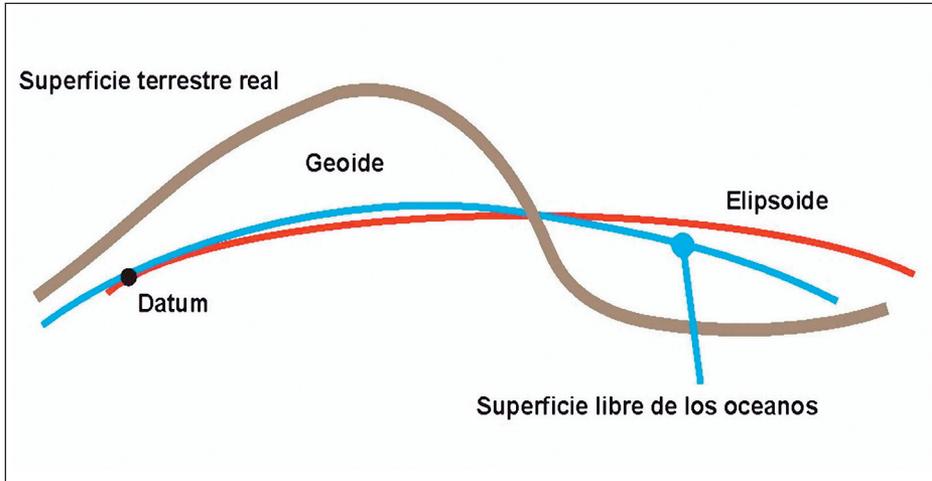


Figura 2: elipsoide, geoide y datum.

referidas las coordenadas de todos los vértices de la red geodésica española y de muchas de nuestras cartas. Estas incluyen una leyenda que reza «Datum Potsdam», aunque debería decir con más propiedad «Datum Europeo».

En todas las cartas debe figurar una leyenda en la que se indique el datum en que están basadas sus coordenadas y otra con la corrección que hay que aplicar a aquellas para pasarlas a Datum Potsdam. Esta última leyenda no figura en las de Canarias por no existir enlace geodésico clásico entre estos territorios y Europa. La corrección, que es variable, puede llegar a valer en algunos casos hasta 17 segundos en latitud. Esta cantidad sí que es representativa en una carta de navegación costera, y la no aplicación de la corrección puede dar lugar a errores de bulto.

Con la llegada de los satélites, los geodestas alcanzaron dos de las aspiraciones más ampliamente sentidas y que tienen gran importancia con respecto al sistema de referencia de coordenadas geográficas. Se pudo obtener un sistema geodésico mundial referido al centro de la Tierra.

El conocer dónde se encuentra el centro es muy importante, pues podemos referir nuestro elipsoide a dicho centro, con lo que el trasvase de coordenadas es más sencillo. Los movimientos de un satélite artificial que recorre una órbita a baja altura dependen casi en exclusiva de la fuerza de la gravedad terrestre. Siguiendo su trayectoria desde distintos observatorios terrestres se calcula su órbita y, por tanto, el centro de masas de la Tierra.

Por otro lado, el satélite sirve de conexión a puntos de la Tierra situados en continentes distintos, con lo que podemos obtener una red geodésica mundial, y por consiguiente, un sistema de coordenadas de cobertura mundial. La parti-

cularidad de este sistema de referencia de coordenadas o datum mundial está en que el elipsoide lo situamos en el centro de la Tierra y que la forma y tamaño del mismo se intenta adaptar a la totalidad del geode y no a una parte de su superficie, como en los locales. Desaparece, por tanto, el concepto de punto fundamental o punto de tangencia entre el elipsoide y el geode.

El primer sistema mundial fue el Datum World Geodetic System (WGS 72). A este datum estaban referidas las coordenadas de los primeros satélites y en general los sistemas de radionavegación (como el Omega). Las correcciones obtenidas con estos sistemas debían ser corregidas, aplicándolas un incremento en latitud y longitud que figuraba en las cartas náuticas.

Finalmente la Defense Mapping Agency desarrolló un nuevo datum, el WGS 84, que reemplazó al anterior. Este cambio tuvo poco efecto en la cartografía náutica, puesto las diferencias en las coordenadas en ningún caso superaban las tres décimas de segundo. Comentar que existen fórmulas para pasar del nuevo datum a los principales datums continentales.

Diferentes clases de mapas y cartas

No existe una diferencia rígida entre los conceptos de mapas y cartas. La palabra mapa data de la Edad Media y se empleaba exclusivamente para designar representaciones terrestres. Desde el siglo XIV, los mapas marítimos pasaron a denominarse cartas, como por ejemplo las cartas de mareas portuguesas. Posteriormente, se generalizó la palabra carta, que sirvió para designar, además de a las cartas marítimas, a una serie de otras modalidades de representación de la Tierra, ocasionando cierta confusión en la terminología.

En España, suele utilizarse la palabra mapa para designar representaciones de la parte terrestre, y carta para representaciones marinas. El término cartografía se aplica tanto a la construcción de mapas como de cartas, existiendo diferentes clases:

- Mapas topográficos que incluyen los accidentes naturales y artificiales y son utilizados para mediciones de altitudes y distancias.
- Mapas aeronáuticos diseñados especialmente para la navegación aérea.
- Mapas temáticos que destacan aspectos particulares, tales como minería.
- Mapas meteorológicos.
- Cartas náuticas para la navegación marítima.
- Globos que representan toda la superficie de la Tierra.

La carta náutica es la representación gráfica sobre un plano de un trozo de costa y la parte de mar comprendida entre ella y los marcos de la misma. Se pueden agrupar según la extensión de la zona representada en los siguientes grupos:

- Cartas generales, por abarcar gran extensión, son las apropiadas para la navegación oceánica. Su escala oscila entre 1/40.000.000 y 1/3.500.000.
- Cartas de *arrumbamiento* para navegar distancias medias a rumbo directo. Su escala oscila entre 1/3.000.000 y 1/200.000.
- Cartas de *navegación costera* que permiten navegar reconociendo la costa. Su escala oscila entre 1/200.000 y 1/50.000. Dentro de este grupo, deben incluirse las llamadas «cartas base», que constituyen el documento básico de nuestra cartografía, puesto que al ser las de mayor escala (aproximadamente 1/50.000), que cubren todas nuestras costas, contienen la representación más detallada del litoral español.
- *Cartas de recalada (aproches)* que, al representar con más detalle las proximidades de los puertos y las zonas de más importancia o peligro, son los idóneos para realizar la aproximación a estos. Su escala está en torno a 1/25.000.
- *Portulanos* que representan detalles completos de pequeña extensión, radas, ensenadas, fondeaderos, etc. Su escala es en general superior a 1/15.000.

Algunas cartas pueden llevar insertadas a mayor escala representaciones de determinados accidentes geográficos, como pasos angostos de los que no existan portulanos, a los cuales llamamos planos de detalle.

Las alturas y el geoide

Las alturas y diferencias de alturas pueden ser determinadas usando el GPS, pero con menores exactitudes y mayores complejidades que las correspondientes componentes horizontales. La principal dificultad para la determinación de las alturas reside en la dependencia de los satélites GPS de las alturas elipsoidales, mientras que la mayoría de los usuarios busca alturas ortométricas. Por ello es muy importante que aquellos interesados en la aplicación del GPS para la medición de altitudes comprendan las diferencias entre estos de alturas y como aclararse con ellas. Este punto dará la información preliminar pertinente a este fin.

Las alturas se miden, tradicionalmente, usando técnicas de nivelación, que se basan en el campo gravitatorio terrestre y están referidas al nivel medio del mar. En cada punto de la Tierra la gravedad tiene una cierta magnitud y dirección, lo que puede ser descrito por un vector. Cada vez que se nivela un instrumento, la línea de mira se pone perpendicular al vector gravedad en ese punto, y cada vez que se levanta una regla de nivelación, esta se coloca alineada con el vector de gravedad. A las alturas obtenidas por técnicas de nivelación se las conoce habitualmente como cotas sobre el nivel medio del mar.

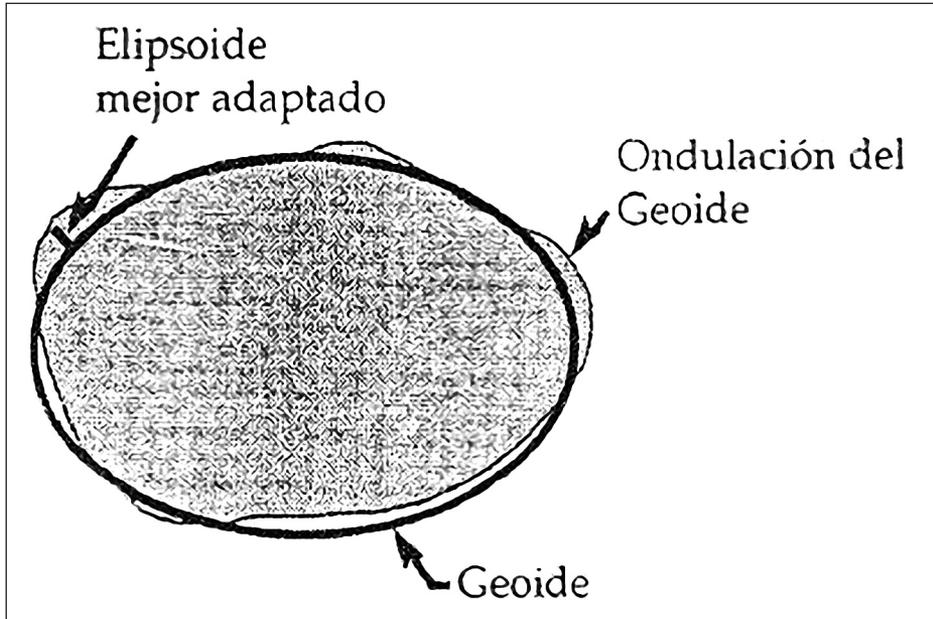


Figura 3: adaptación geoide-elipsoide.

Estas alturas son denominadas *cotas ortométricas* y en realidad están referidas al geoide. Las alturas ortométricas son las que se utilizan en la vida diaria y las que están representadas en los mapas topográficos.

El geoide es la superficie equipotencial que mejor se aproxima al nivel medio del mar. Forma una superficie irregular, pero de variación muy suave, alrededor de la Tierra y es extremadamente compleja de representar matemáticamente. Por otra parte, el elipsoide, que es en esencia una esfera achatada, tiene una representación matemática simple y su manipulación es sencilla. Por esta razón se utiliza un elipsoide como forma de describir aproximadamente el geoide; por ello también se suelen determinar las alturas *elipsoidales* (referidas al elipsoide), de preferencia a las alturas geoidales (basadas en el geoide). Las elevaciones obtenidas usando los satélites GPS se basan en la superficie elipsoidal. La relación entre elipsoide y geoide se muestra en las figuras 1 y 3.

La distancia que separa el geoide del elipsoide es la ondulación del geoide (también llamada altura del geoide). Esta puede ser positiva o negativa dependiendo de si el geoide está por encima o por debajo del elipsoide en un punto dado. Si la ondulación del geoide, N , y la altura elipsoidal, h , son conocidas, se puede obtener la altura ortométrica usando la relación $h = H + N$.

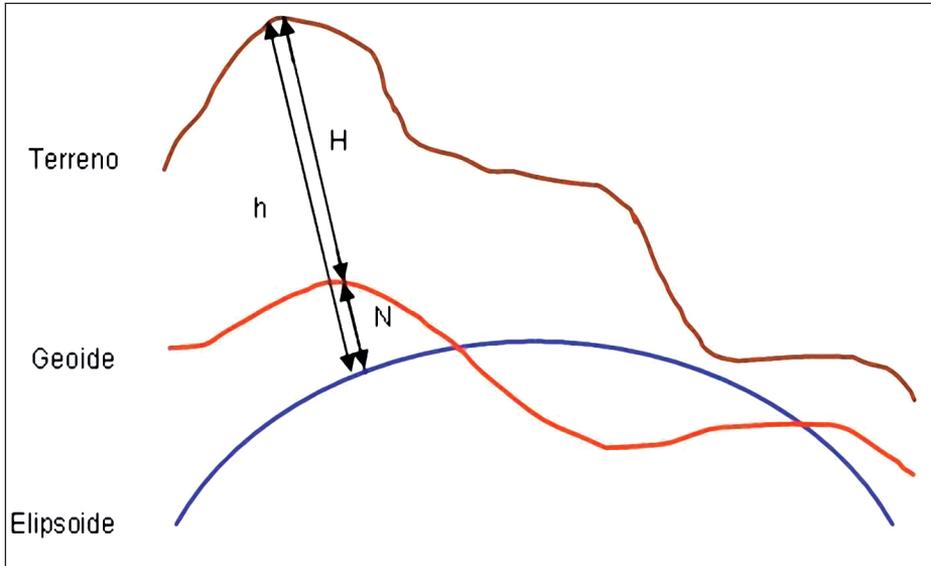


Figura 4: relación entre alturas.

Como se puede observar en la figura 4, la altura ortométrica es igual a la altura elipsoidal menos la ondulación del geoide. Es evidente que se deben conocer las ondulaciones del geoide para calcular las alturas ortométricas cuando se usa el GPS (4).

Conclusiones

Siempre que se trabaje con cartas náuticas, debemos tener muy presente el datum al que están referidas para poder tener en cuenta las correcciones que haya que llevar a cabo en el caso de que se utilicen dos cartas con dos datums diferentes.

(4) ERIKSON, C.: *GPS Positioning*, Geodetic Survey Division, Canada, 1993.