

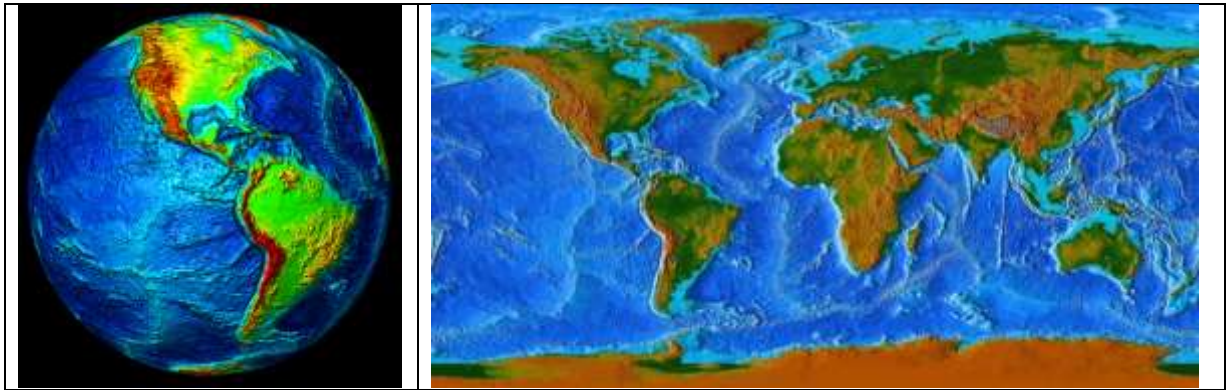


LA FORMA DE LA TIERRA Y EL DATUM

La forma de la Tierra

La forma real de la Tierra depende, en realidad, de la escala de observación. Observada desde el espacio (y asumiendo que pudiera despejarse totalmente la atmósfera que la rodea) no sería muy diferente de una esfera. Sin embargo, cuando se la observa desde su misma superficie su forma es irreconocible y domina su aspecto el relieve topográfico. Es así que cadenas montañosas, valles, planicies, cuencas oceánicas, edificios volcánicos, etc., constituyen los rasgos característicos de la superficie terrestre pero estos rasgos, sin embargo, no resultan relevantes cuando se contempla la Tierra desde el espacio y, en muchos casos, el relieve topográfico debe ser exagerado en el dibujo para que sea perceptible. El mayor desnivel posible, medido entre la cima del Everest, a 8850m

sobre el nivel del mar, y la sima de las Marianas, a 10.994m bajo el mismo, alcanza los 19.844m, es decir, sólo un 3% del radio terrestre que mide unos 6.300km.



El relieve terrestre en un globo y en un mapa

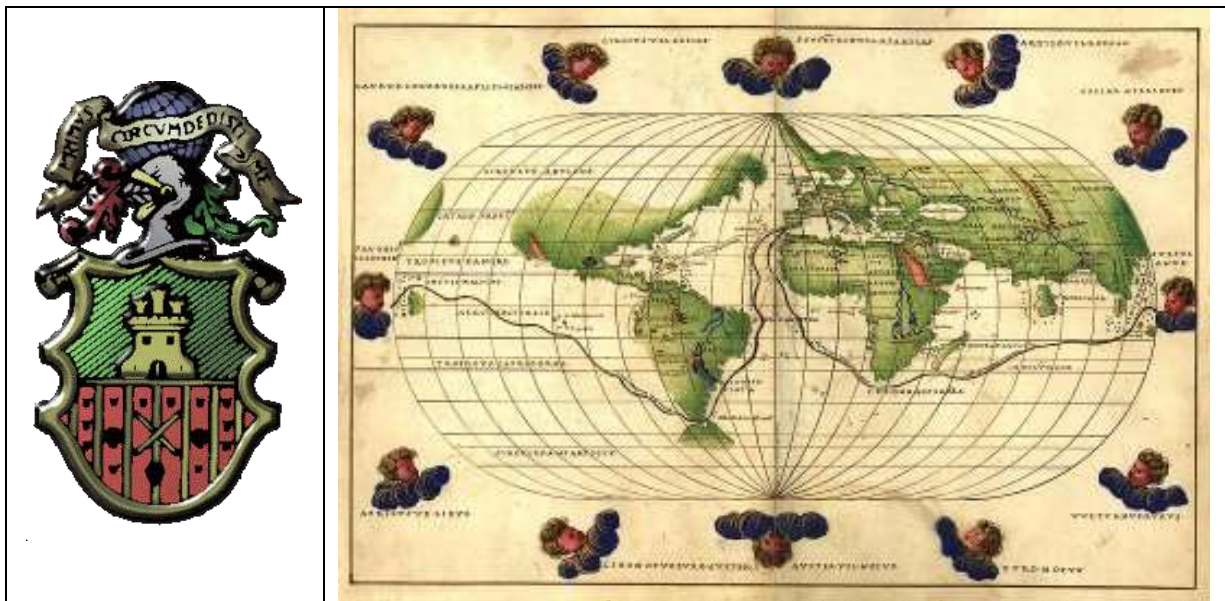


La forma de la tierra, observada desde la superficie, está completamente desdibujada por el relieve local

Los griegos, tanto por razones filosóficas como mediante una comprobación práctica, consideraban que el planeta era de forma esférica, llegando a medir su radio con una aproximación sorprendente. Luego de que, a partir de unos 500 años AC, la mayor parte de los filósofos griegos asumiera como un hecho la redondez de la Tierra, Eratóstenes da una primera idea de su tamaño. Su cálculo arrojó un valor que, convertido a la unidad de medida actual, se aproximaría al valor real con un error menor al 2% según los estudiosos que asumen que usó como unidad de medida los “*estadios*” egipcios, o de casi al 20% si utilizó los “*estadios*” griegos. Esta discusión carece casi de sentido mientras no exista una comprobación

indudable de qué unidad de medida utilizó, por cuanto la exactitud obtenida es en realidad una gran casualidad resultante de la compensación fortuita de una gran cantidad de errores en las mediciones, ya que si bien el método era correcto, las formas de medir las grandes distancias y los ángulos en ese momento no eran nada precisas.

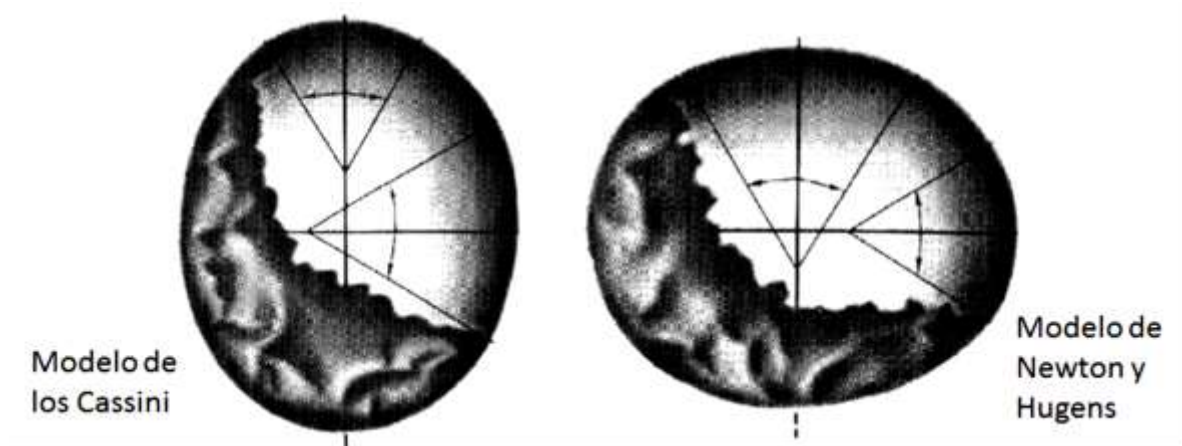
Más allá de que los mapas medievales representan a la Tierra como un disco, en diferentes lugares pervivió la idea de su forma esférica, y como tal se la representa nuevamente en la época de los grandes viajes europeos de exploración y conquista. Su esfericidad queda demostrada, en forma ya definitiva, con la circunnavegación del globo por la expedición de Magallanes-Elcano de 1519-1522.



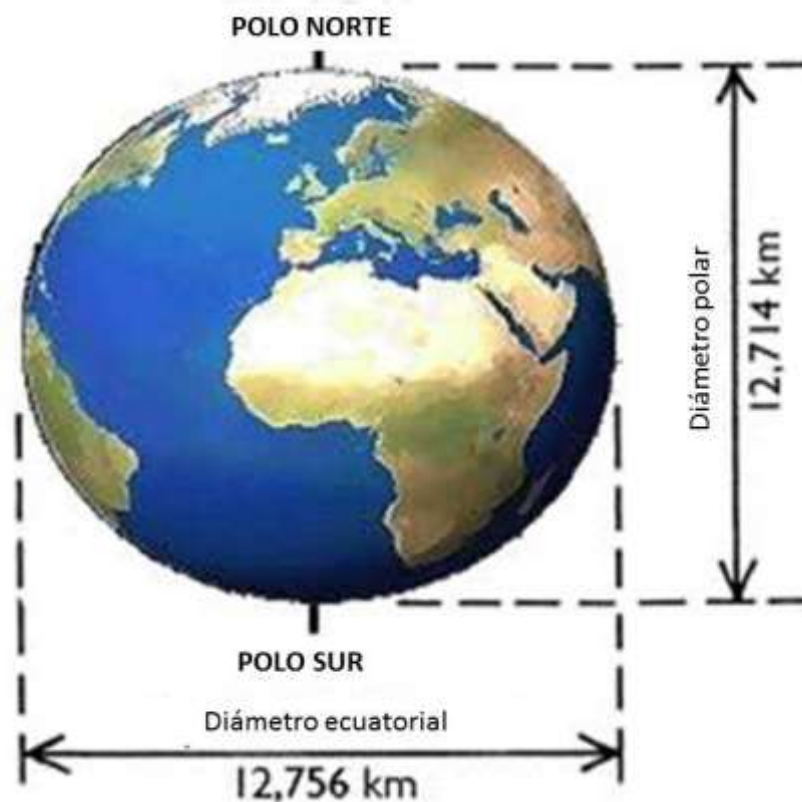
Escudo otorgado a Sebastián Elcano por Carlos 1º de España. En él se lee “Primus Circumdedit Me”, es decir, “Me circunnavegaste primero” sobre el globo terráqueo. El mapa muestra la ruta de la expedición (mapa de B. Agnesse, 1543)

La idea de una forma esférica perduró hasta el Siglo XVIII, cuando entran en conflicto, por un lado, las ideas de Newton (1687) y de Huygens (1690) quienes, a partir de consideraciones teóricas, proponen que la Tierra debe tener forma achatada en los polos. Por el otro, el modelo de los Cassini (Giovanni y Jacques, aprox. 1715), quienes postulan, a partir de sus mediciones del arco de meridiano, que es un elipsoide con el eje de rotación más largo que el diámetro ecuatorial. Como consecuencia de esta disputa, son enviadas sendas expediciones a realizar la medición de la longitud del grado de latitud en las proximidades del Círculo Polar (Mappertius et al., 1736) y del Ecuador (de la Condamine et al., 1745), con el fin de comparar estos valores (relacionados obviamente con el radio de la Tierra). Como consecuencia de ello, y al decir de Voltaire, “Newton aplastó la esfera... y a los Cassini”, dado que los resultados obtenidos favorecen el menor radio polar. Los más grandes científicos de la época participan de la discusión y Clairaut en 1743 enuncia el teorema que lleva su nombre y que condicionaba la forma de la Tierra al

potencial gravimétrico. Mc Laurins (1742) relacionó la forma de la Tierra con su momento angular, es decir con su velocidad de rotación.



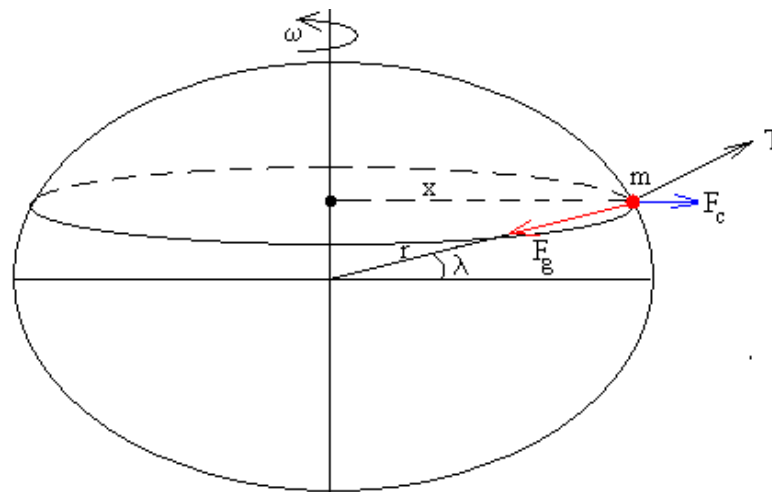
Las hipótesis en conflicto



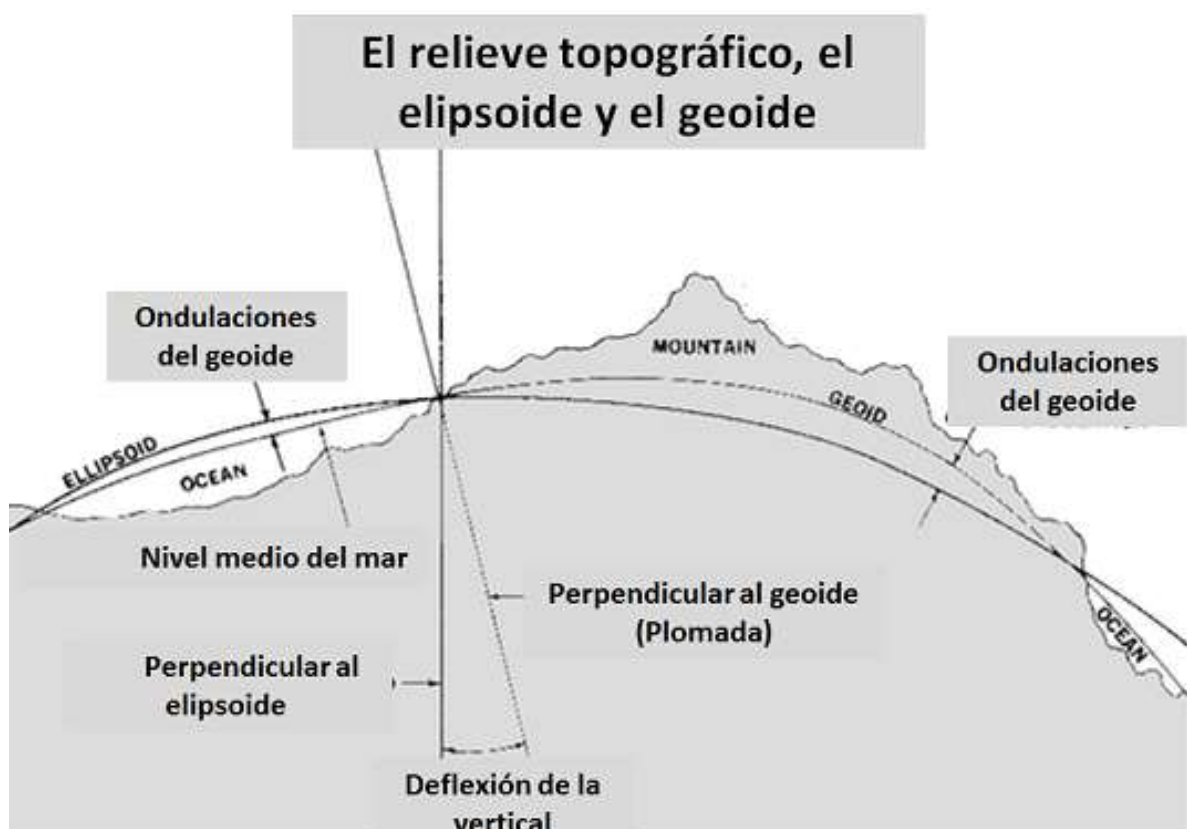
Los diámetros ecuatorial y polar según datos actuales. Téngase en cuenta que la diferencia entre ambos diámetros es de 42km, valor imperceptible a la escala de la figura.

La vertical de la plomada y la dirección del radio terrestre... no coinciden

En una Tierra inmóvil la dirección de la plomada apuntará al centro de gravedad del planeta, pero si el planeta gira, la dirección de la plomada estará influenciada por la resultante de todas las fuerzas que actúan sobre ella y por lo tanto deberá tenerse en cuenta el efecto de la “fuerza centrífuga”.

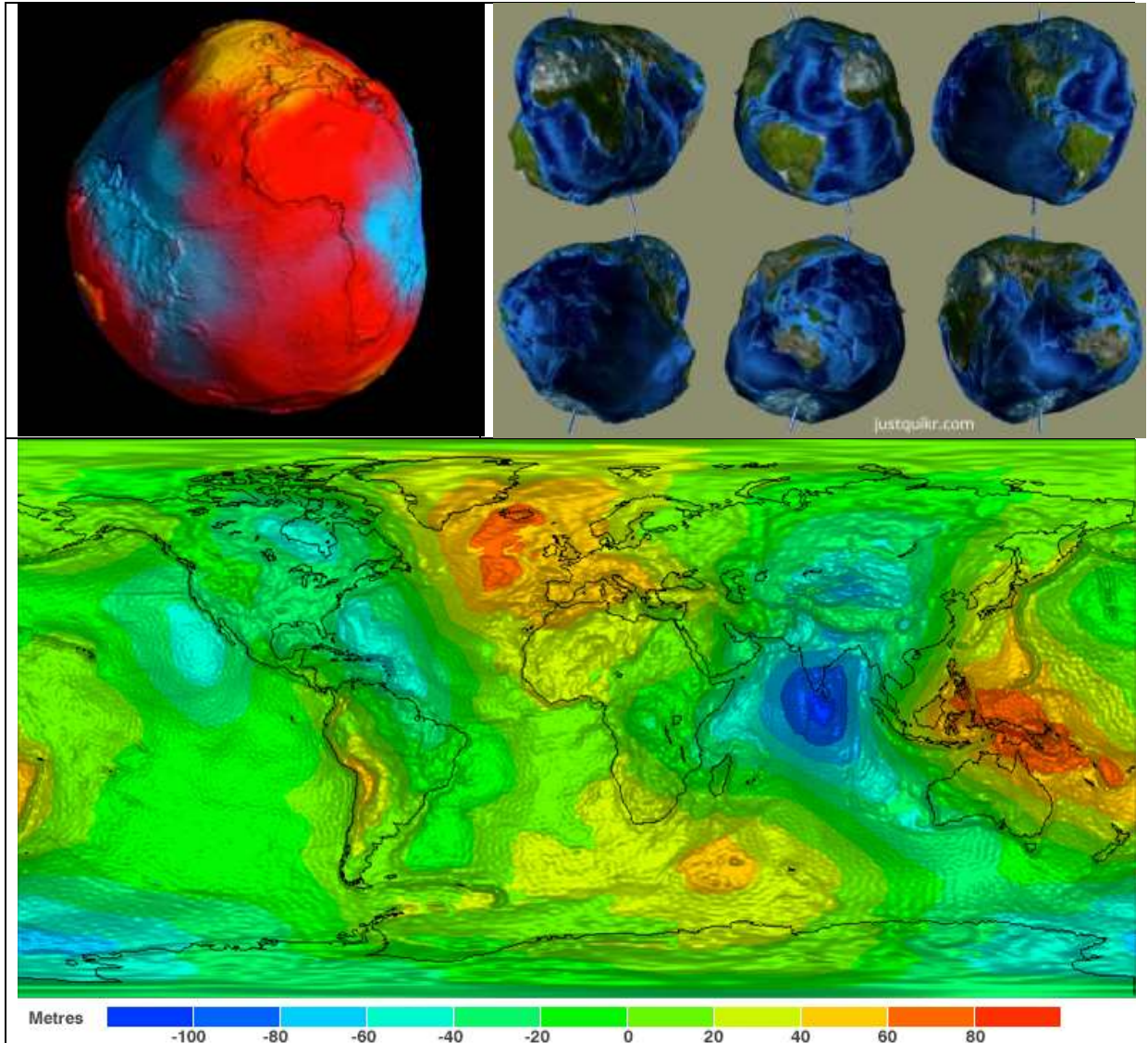


La existencia de una fuerza adicional como consecuencia de la rotación terrestre produce un desvío en la dirección de la “vertical”

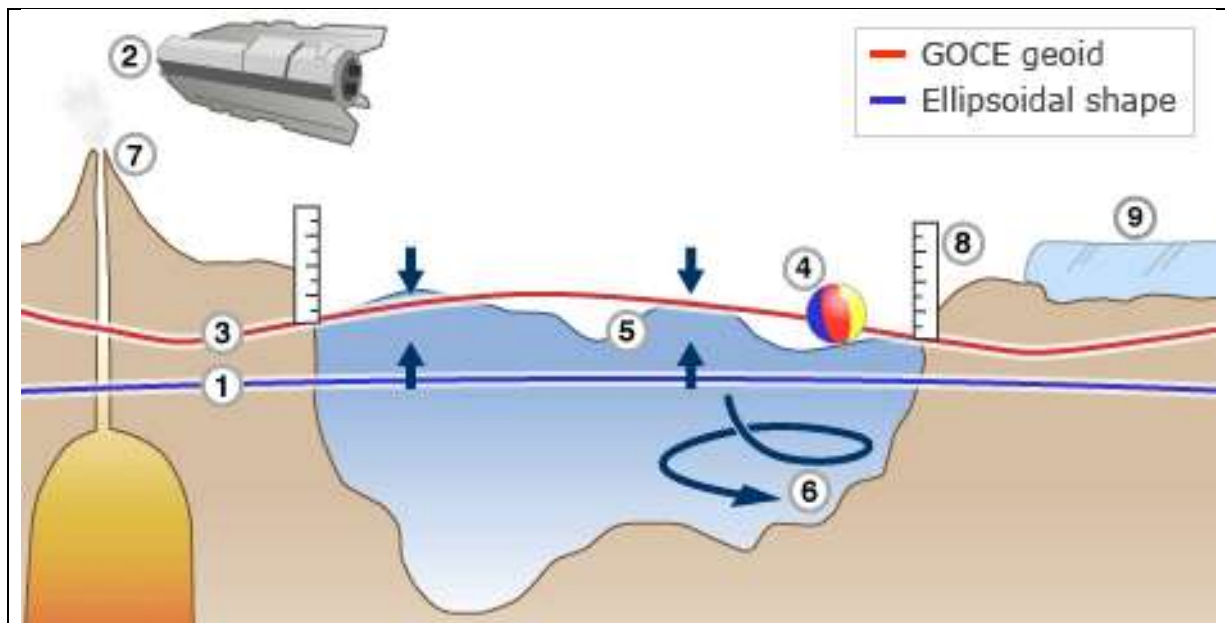


Comparación de las superficies del geoide, del elipsoide y de la topografía local

En la actualidad, y debido a la precisión y abundancia de las mediciones de la gravedad realizadas desde los satélites espaciales, la forma de la superficie equipotencial ha sido determinada con una gran precisión. El almacenamiento y procesamiento de dicha información por métodos computacionales permite su manipulación y presentación en una gran diversidad de formatos.

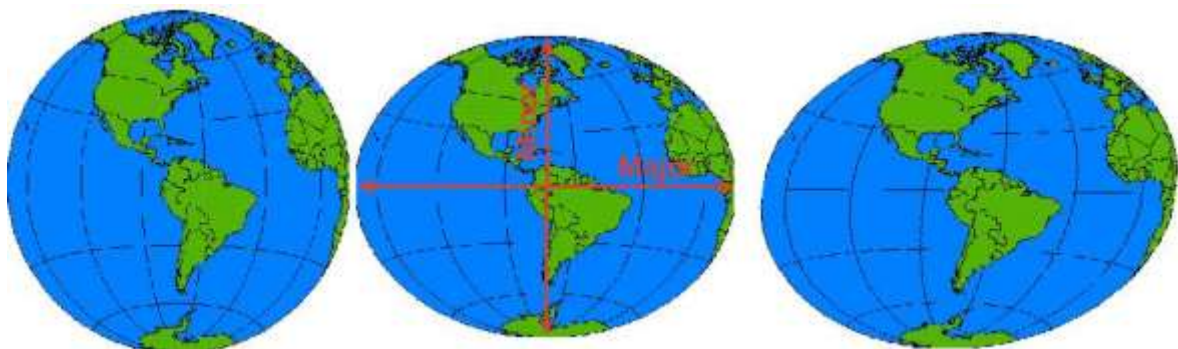


Formas de mostrar las características de la superficie equipotencial que representa la forma de la Tierra tomando en consideración el valor de la fuerza de gravedad en función de la distancia al centro del planeta



1. La Tierra es una esfera ligeramente achatada (elipsoide)
2. El satélite percibe muy leves variaciones en la atracción gravitatoria
3. Esta información se utiliza para construir una superficie ideal, la del geode
4. El geode representa superficies equipotenciales (sobre las cuales una esfera no rodaría pendiente abajo)
5. Representa también la superficie de un océano universal sin vientos ni corrientes
6. La comparación entre el geode y el nivel del océano brinda información acerca del comportamiento de éste.
7. Las perturbaciones de la gravedad pueden revelar movimientos de magma bajo los volcanes
8. Un geode preciso es la base de un sistema internacional de referencia de alturas
9. La medición de la gravedad también puede monitorear la pérdida de hielo en las grandes calotas

Ilustración que sintetiza el método de determinación de la forma de la Tierra



La evolución del conocimiento de la forma de la Tierra. Los apartamientos con respecto del elipsoide a la esfera y del geode al elipsoide están muy exagerados.

Sabemos además, que tanto la forma de la superficie equipotencial como la de la topografía ni siquiera son constantes, sino que se encuentran en permanente

cambio debido a los procesos dinámicos internos y externos que actúan en el planeta.



Agentes que contribuyen al cambio permanente en la forma de la Tierra
(http://www.nasa.gov/images/content/105249main_earth_gray_large.jpg)

La forma del geoide puede determinarse por medio de:

a) *Medidas atracción gravitatoria:* Dado que la Tierra se aproxima a una forma esférica achatada en los polos la atracción de la gravedad es menor en el Ecuador (mayor distancia entre el centro de gravedad de la Tierra y el instrumento de medición) que en los Polos, donde la distancia disminuye.

b) *Mediciones astronómicas:* Se fundan en medir la vertical del lugar y ver sus variaciones. Esta variación se relaciona con su forma.

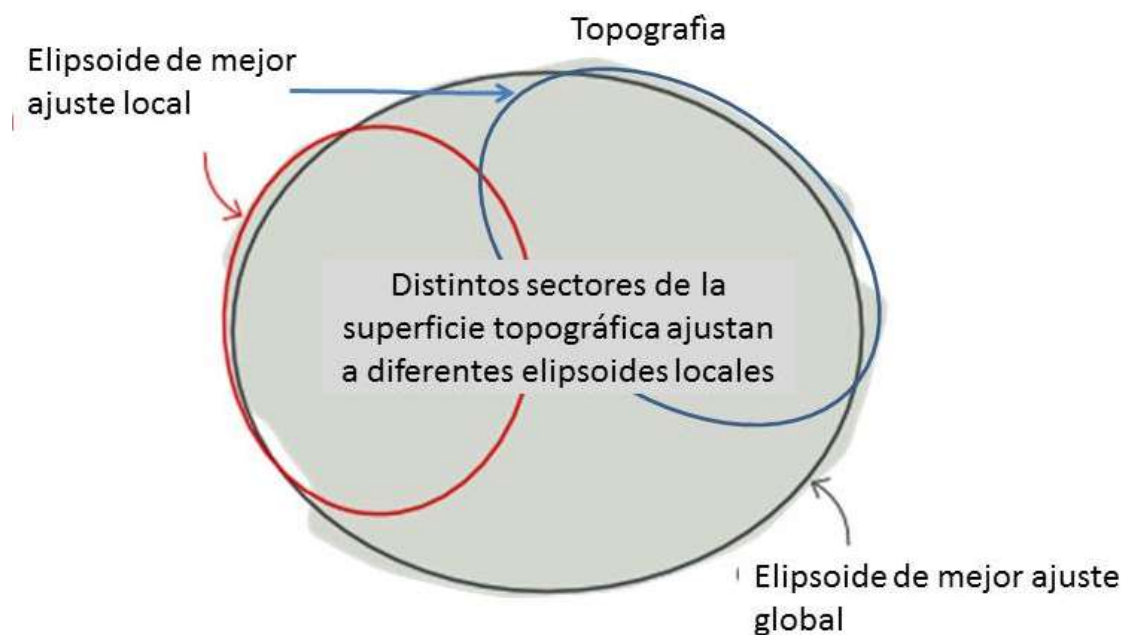
c) *Medición de las deformaciones producidas en la órbita de los satélites causadas porque la Tierra no es homogénea:* Así se ha determinado un geoide con decenas de abultamientos o depresiones respecto al esferoide teórico. Estas irregularidades son menores de 100 metros.

EL DATUM

Recibe el nombre de “**datum**” la superficie de referencia, correspondiente a un modelo matemático, con respecto a la cual se refieren las posiciones sobre la superficie terrestre. Estas posiciones poseen una componente horizontal y una componente vertical. Cada una de estas puede establecerse con referencia a un datum diferente.

Sistemas de referencia horizontales.

Si se realiza un corte de la Tierra por un círculo máximo que coincida con un meridiano cualquiera podrían trazarse sobre el contorno real (la topografía de la superficie terrestre representada por la línea en que la misma corta al plano del círculo máximo) diferentes curvas que se ajustarían con mayor precisión al trazo de la superficie terrestre. Algunas de ellas, de mayor tamaño, ajustarían a casi la totalidad de la figura y otras, de menor dimensión, lograrían una mejor aproximación a sectores determinados. Podría hablarse así de un elipsoide de mejor ajuste a nivel global y de un conjunto de elipsoides de mejor ajuste para determinadas regiones del planeta.



Elipsoides de mejor ajuste global y local

Dado que existen múltiples sistemas de referencia, la posición de un punto cualquiera de la superficie terrestre puede tener diferentes valores según los sistemas de coordenadas y los datum que se utilicen. Distintos datum pueden ser más adecuados para diferentes regiones, pero no adaptarse para otras en particular. En la actualidad el sistema más utilizado es el WGS84, que incluye modificaciones introducidas con posterioridad a la fecha de su lanzamiento (1984). Este sistema es muy similar al NAD83 (USA) y al ETRS89 (Europa).

Las diferencias en la posición de un punto según el sistema de referencia o datum que se utilice pueden alcanzar algunos cientos de metros, lo cual puede resultar de importancia o no según la escala de trabajo (si se trata de determinar la posición de un volcán o de un fósil, por ejemplo).

Determinación de la posición vertical

En general la asignación de altura a un determinado punto se expresa en referencia al nivel del mar (msnm), pero la determinación de éste no es tarea sencilla, ya que la posición de la superficie del agua es variable en diferentes lapsos de tiempo y está condicionada por las mareas, los vientos, las corrientes oceánicas, etc., y las diferencias en un mismo lugar y entre diferentes lugares de la Tierra pueden superar la decena de metros. El datum denominado **nivel medio del mar** (nmm o msl por sus siglas en inglés) se calcula como la media aritmética de todas las mediciones realizadas en intervalos de una hora en un período específico de 19 años). Este cálculo promedia las mareas altas y bajas causadas por la acción de los campos gravitatorios del Sol y la Luna y variaciones de corto período. Sin embargo no elimina los efectos de las variaciones de la gravedad en un determinado sitio como resultado de la topografía y la composición del sustrato. En algunos países se establece algún punto específico como punto cero de la referencia al NMM, generalmente en algún puerto o estación marítima en la cual se puede llevar un registro prolijo de la variación de la altura.

Para superar el problema de la determinación del nivel medio del mar se han adoptado también superficies de referencia de tipo geodésico, que pueden estar fijadas, en algún punto, al nivel del mar establecido a partir de las mareas o bien usar superficies basadas en el elipsoide que pueden diferir notablemente del geoide.

El datum WGS84

El desarrollo de nuevas tecnologías (sobre todo el uso de satélites para determinar la altimetría mediante técnicas de radar) y las posibilidades de combinar datos provenientes de diferentes fuentes de medición hicieron que hacia el comienzo de la década de los ochenta, se pensara en desarrollar un nuevo datum de utilidad generalizada a toda la Tierra. Este sistema, que es geocéntrico y tiene una consistencia de $\pm 1\text{m}$ a nivel global, es el que usan actualmente los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) y se denomina WGS84 (WGS por World Geodetic System). El sistema utilizaba inicialmente como elipsoide de referencia el denominado GRS80, pero ha ido teniendo actualizaciones a medida que se refinaban las mediciones. La expresión de las longitudes en el WGS84 se hace con referencia al Meridiano de Referencia IERS tal como fuera definido por la Oficina de la Hora Internacional como resultado de numerosas mediciones astrales en diferentes países. Esta determinación desplazó la posición del meridiano de

referencia unos 100m hacia el Este con referencia al Meridiano original de Greenwich.

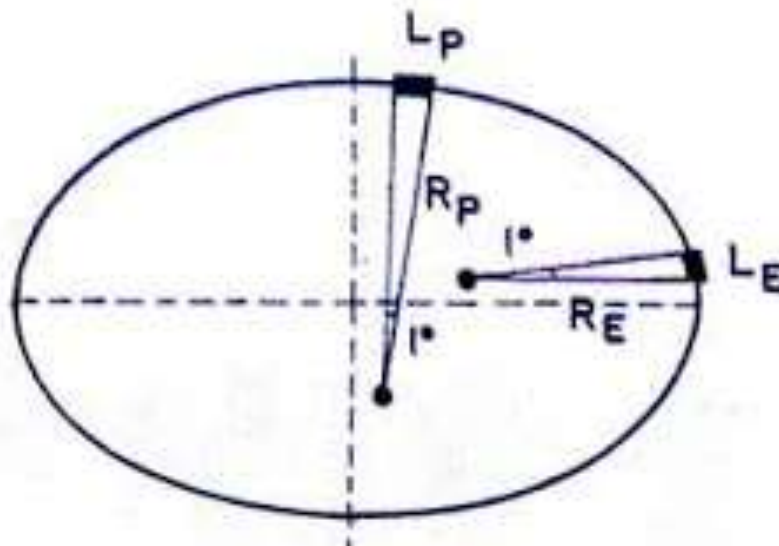
La paradoja de la mayor longitud del grado a mayor latitud (menor radio)

Si se dibujan dos esferas concéntricas y se trazan las líneas desde el centro de ellas, para un radio menor habrá, sin duda, una longitud menor para un mismo arco de meridiano. ¿Por qué no es esto así en el caso planteado?

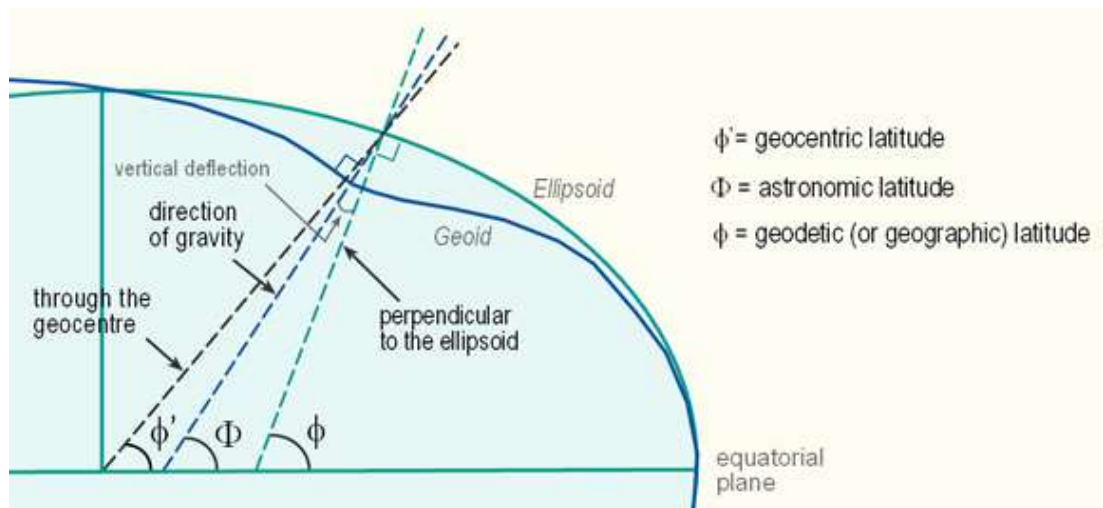
Porque la menor longitud del arco en el Ecuador, es decir a mayor distancia del centro de la Tierra, surge del hecho de que el ángulo es medido en función de la determinación de la vertical en cada punto de la superficie terrestre y no a partir del centro del planeta.



Esta figura (tomada de Internet) ilustra, sin proponérselo, la paradoja de la relación entre la longitud del grado de meridiano en las cercanías del Círculo Polar y en el Ecuador al asumir que la medición parte del centro de la Tierra



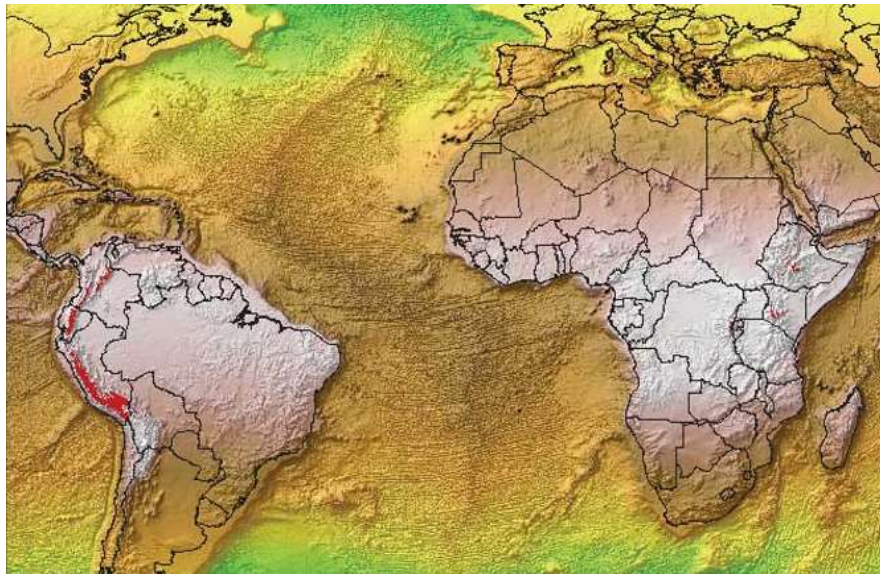
Para una determinación cerca del Polo, la superficie terrestre es más plana que cerca del Ecuador y tiene, por lo tanto, un radio de curvatura mayor, lo que aleja el centro así determinado del centro real. Lo opuesto vale para la medición cerca del Ecuador.



Tres centros distintos para el planeta quedan determinados según cómo se realice la medición

Otra paradoja, la cima del Everest es el punto más alto sobre el nivel del mar, pero no el más alejado del centro (de masa) de la Tierra.

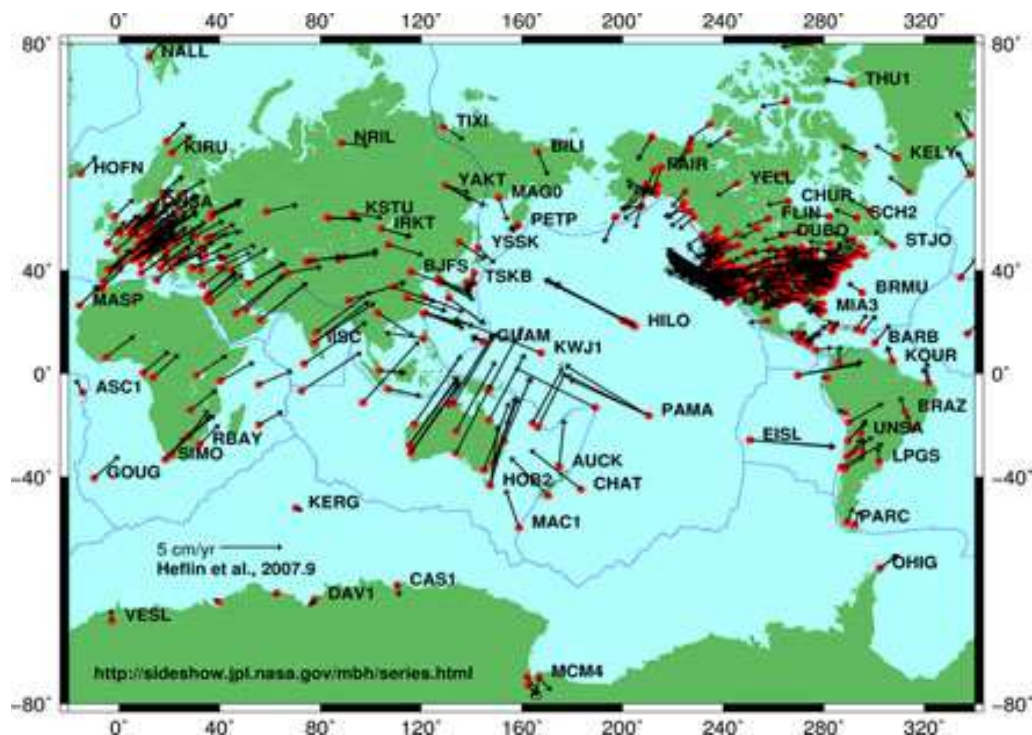
El Everest (que se levanta sobre una meseta que ya está a más de 4.000m de altura) no es la montaña más alta del mundo, ya que el volcán hawaiano Mauna Kea supera ligeramente los 10.000m sobre el fondo del mar. Sin embargo no es este el único mérito que el Everest no detenta... como consecuencia de la forma irregular del planeta el punto de la superficie terrestre más alejado del “centro” del planeta no es la cima del Everest, sino la del volcán ecuatoriano Chimborazo.



En este mapa se muestran en rojo las áreas más alejadas del centro de masa de la Tierra.

Y una tercera, ¡El meridiano de Greenwich se mueve!

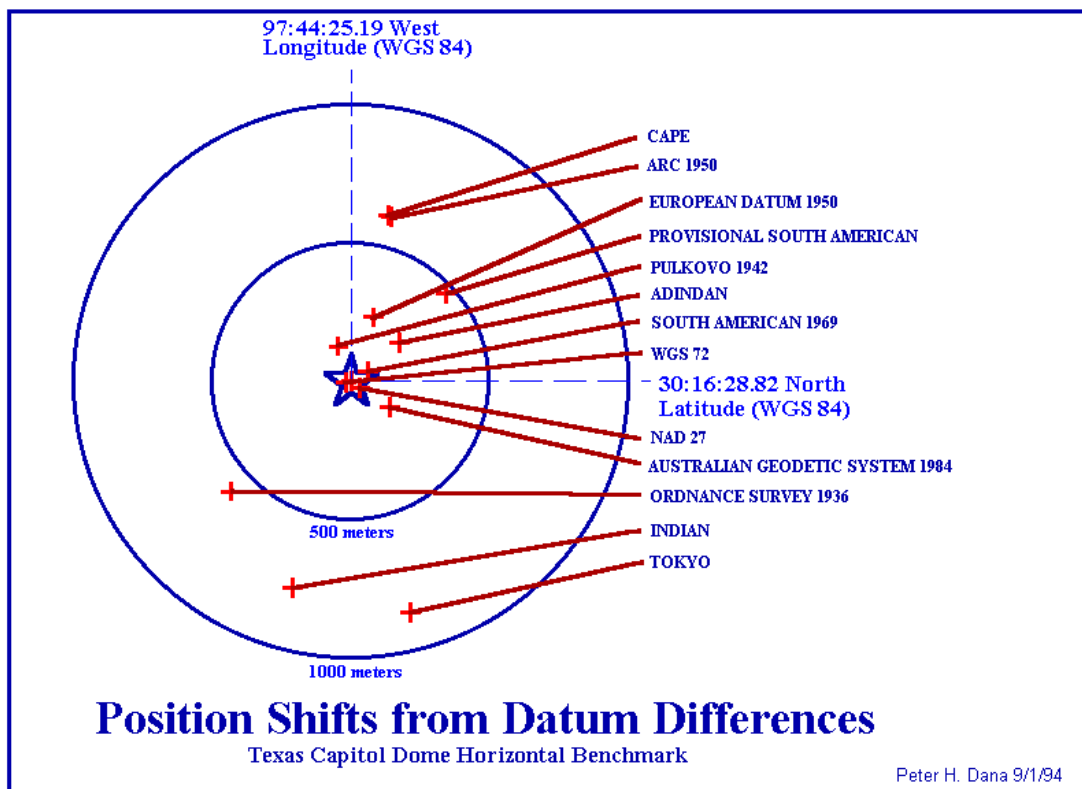
Las determinaciones de la posición de un punto han llegado a ser tan exactas que el movimiento de los continentes comienza a ser un factor a tener en cuenta cuando las mediciones tienen algunos años de antigüedad. Téngase en cuenta que la precisión puede ser del orden de centímetros, comparable a la velocidad de desplazamiento de las placas (cm/año).



La longitud de las líneas es proporcional a la velocidad de desplazamiento del punto origen de cada una ellas.

Finalmente... ¿Dónde queda verdaderamente un punto sobre la superficie terrestre?

Si bien la localización de un punto sobre la superficie terrestre parece fácil en principio, la verdad es que la misma depende de una serie de factores y de criterios que deben ser establecidos y compartidos por todos los usuarios del sistema de referencia adoptado. El dibujo siguiente ilustra con claridad cuán lejos puede encontrarse el punto de destino cuando el datum del mapa que se utiliza y el del GPS con que se realiza la determinación emplean diferentes datums. Si bien en algunos casos sólo se trata de pocos metros, en otros la diferencia puede ser superior a los 500m.



Esta figura señala las diferentes posiciones que ocuparía un mismo punto de acuerdo al datum que se utilice en la determinación de la misma. El dibujo asume como centro la posición determinada mediante WGS84.

Enlaces de interés

<http://geology.com/records/highest-mountain-in-the-world.shtml>

http://en.wikipedia.org/wiki/Figure_of_the_Earth

<http://spainillustrated.blogspot.com.ar/2011/11/expedicion-geodesica-para-la-medicion.html>

<http://personales.upv.es/jpadin/tema1adap.pdf>

<http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/8767763.stm>

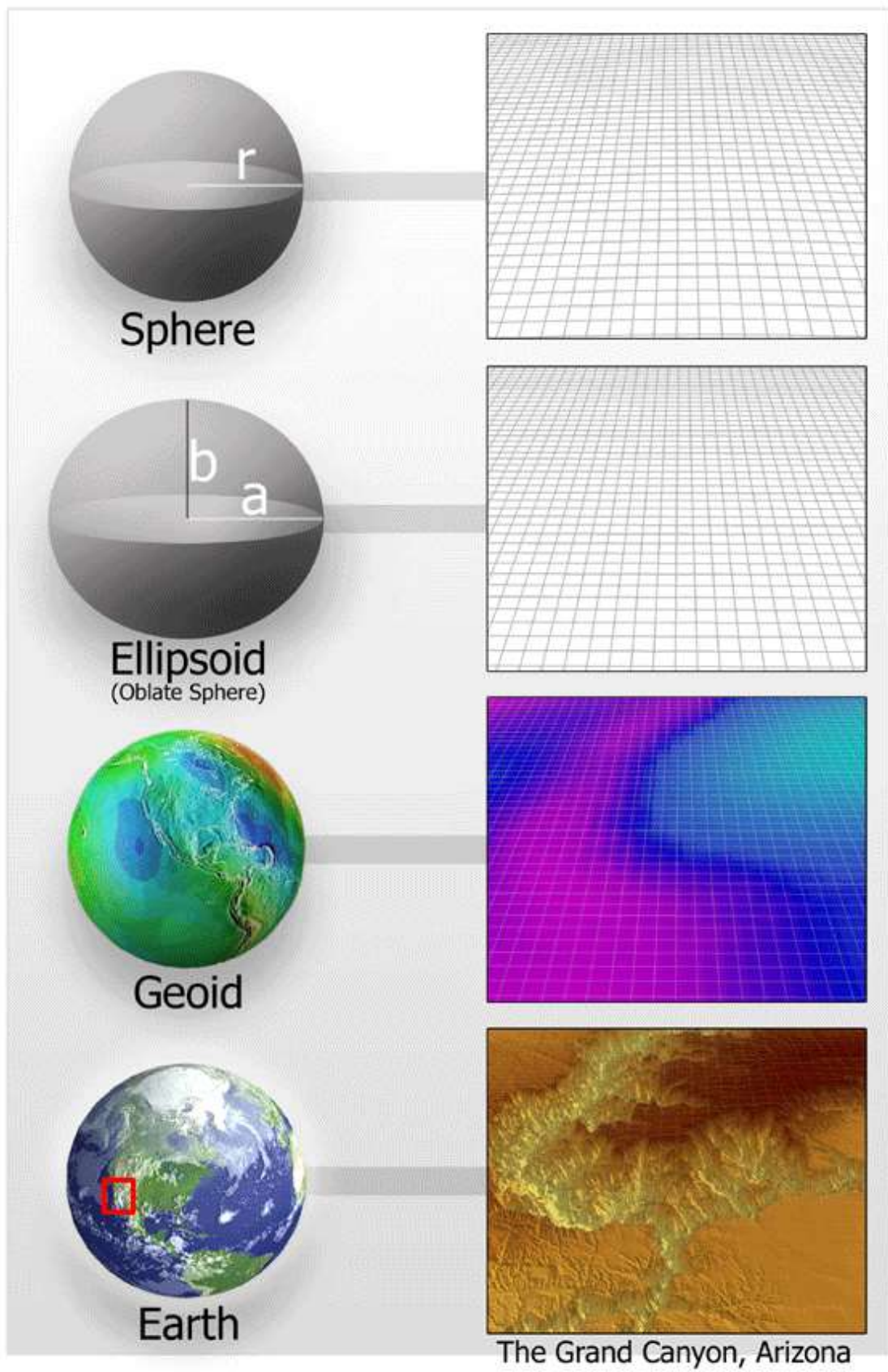
<http://www.esri.com/news/arcuser/0703/geoid3of3.html>

<http://badc.nerc.ac.uk/help/coordinates/OSGB.pdf>

<http://slideplayer.es/slide/1621758/>

http://www.ign.gob.ar/descargas/sig/dia_del_sig/sist_refygeorref.pdf

<http://justquikr.com/wp-content/uploads/2013/05/geoid-earth.jpg>



Cuatro aproximaciones a la forma de la Tierra, todas ellas ciertas