

Tema 4.1 Superficies y sistemas de referencia

Cartografía I

2º Curso de IT en Topografía

1^{er} Cuatrimestre 2008/09

EPS Jaén

T4.1 Sistemas de referencia



T4.1 Sistemas de referencia

1. La esfera terrestre

- Elementos
- Coordenadas geográficas
- Cálculo de distancias

2. El elipsoide

3. El geoide

4. Sistemas referencia

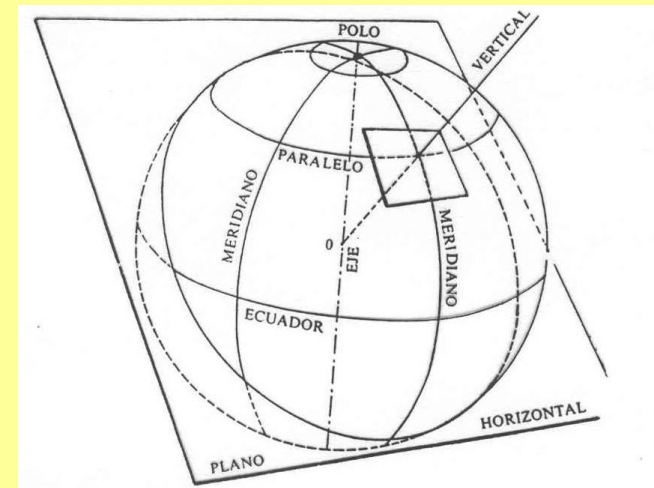
5. Métodos

T4.1 Sistemas de referencia

- La forma esférica deducida por filósofos griegos (pitagóricos, Platón ...)
- La primera medida aproximada: Eratostenes de Cirene (siglo III a JC)
- Otras medidas posteriores (Posidonio, Ptolomeo) tuvieron menos suerte
- Tras la Edad Media la idea de la Tierra esférica no fue rescatada en Occidente hasta e siglo XV
- Las medidas más precisas se realizaron a partir del siglo XVII

Elementos

- Eje de la Tierra, según el que gira en sentido directo (antihorario) cada día sobre sí
- Polos Norte y Sur: Puntos de corte del Ecuador con la esfera terrestre
- Ecuador: Circunferencia máxima (plano que pasa por el centro) perpendicular al eje
- Paralelos: Circunferencias menores (plano no pasa por el centro) paralelas al Ecuador
- Meridianos: Circunferencias máximas que contienen al eje de la Tierra



T4.1 Sistemas de referencia

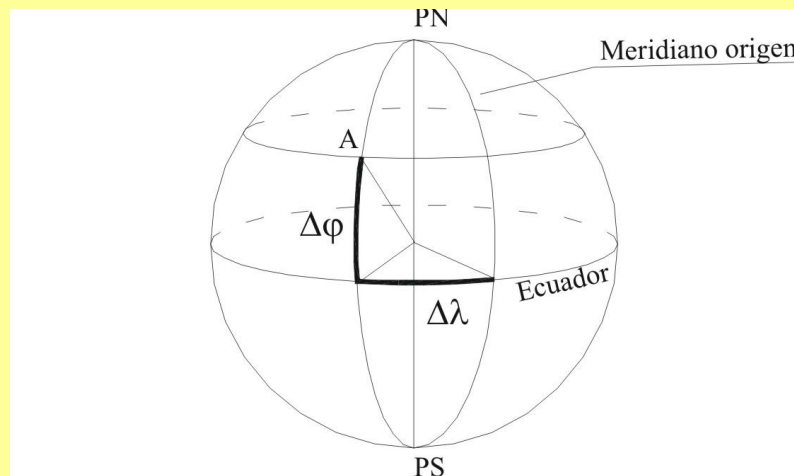
- El sistema de coordenadas geográficas en un sistema geocéntrico (origen es el centro de la Tierra)
- Dos coordenadas angulares con Ecuador de plano fundamental

Latitud

- Angulo que forma la vertical del lugar (radio) con el plano del Ecuador
- Es el menor de los arcos de meridiano entre el Ecuador y el punto
- Se pueden medir hacia el N o hacia el S y varían entre 0 y 90°

Longitud

- Angulo diedro entre el meridiano del punto y otro tomado como origen
- Menor de arcos de paralelo o Ecuador entre el punto y meridiano origen
- Se puede medir hacia el E u W y varían de 0 a 180° (a partir de origen)



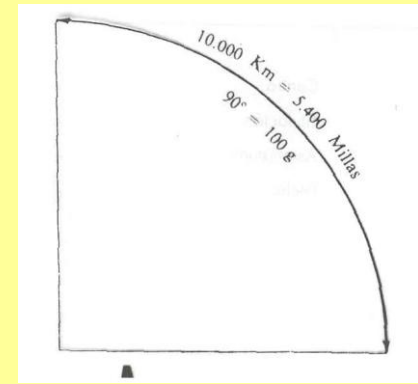
T4.1 Sistemas de referencia

Puntos de igual longitud

- La medida se realiza sobre un meridiano
- Circunferencias máximas de 40.000 Km de desarrollo
- La distancia correspondiente a 1' = 1 milla marina

$$\frac{\Delta\varphi}{360} = \frac{l}{40000\text{Km}}$$

Donde $\Delta\varphi$: diferencia de longitud entre los puntos y l : la distancia

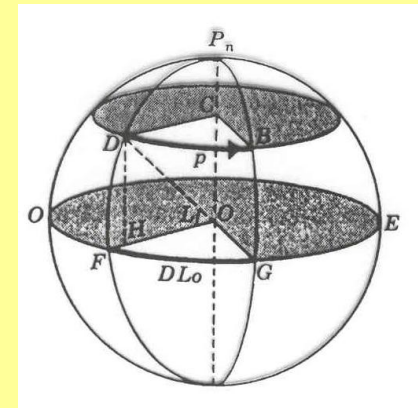


Puntos de igual latitud

- La medida se realiza sobre un paralelo
- Circunferencias máximas de 40.000 Km * cos φ

$$\frac{\Delta\lambda}{360} = \frac{p}{40000\text{Km} * \cos\varphi}$$

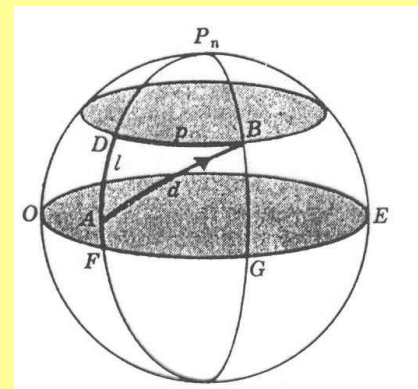
Donde $\Delta\lambda$: diferencia de longitud y p es la distancia ("departure")



Puntos cualquiera

- La medida se realiza sobre circunferencia máxima
- Se precisa emplear la trigonometría esférica
- Resolución de triángulos esféricos con:
 - Tres lados: la distancia y las colatitudes de puntos
 - Tres ángulos: diferencia de longitudes y rumbos
- Ley del coseno para los lados

$$\cos c = \cos a * \cos b + \text{sen} a * \text{sen} b * \cos C$$



T4.1 Sistemas de referencia

1. La esfera terrestre

2. El elipsoide

- Elipsoides de revolución
- Otros elipsoides
- Coordenadas geográficas

3. El geoide

4. Sistemas referencia

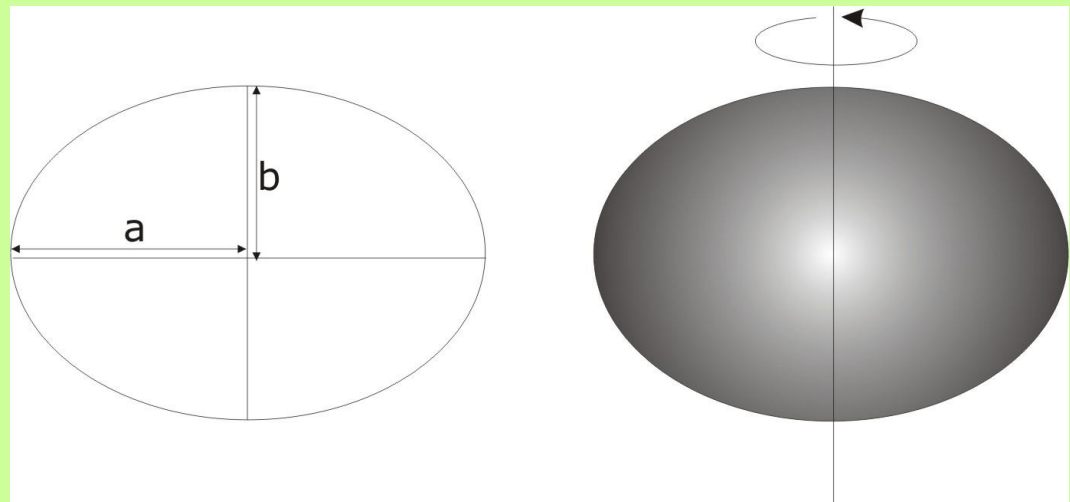
5. Métodos

T4.1 Sistemas de referencia

- A partir de las medidas realizadas para la Carta Geométrica de Francia (Picard, Cassini) surge la idea de Tierra elipsoidal achatada por Ecuador
- En contraposición con achatamiento polar propuesto por Newton
- Expediciones a Laponia y Perú aclararon la controversia a favor de éste
- Elipsoide de revolución: Figura 3-D resultante de la rotación de elipse en torno a uno de sus ejes
- Paralelos y Ecuador: circunferencias; Meridianos son elipses
- Queda definido cuando se conocen las dimensiones de los 2 ejes o 1 de ellos y el aplamamiento
- También llamado esferoide por que el aplamamiento es pequeño

$$\alpha = \frac{a-b}{a}$$

- Donde α :
aplanamiento;
- a: semieje mayor; y b:
semieje menor



T4.1 Sistemas de referencia

- A medida que se fueron teniendo medidas se calcularon nuevos elipsoides
- Estos se ajustaban a las distintas zonas del planeta donde eran calculados

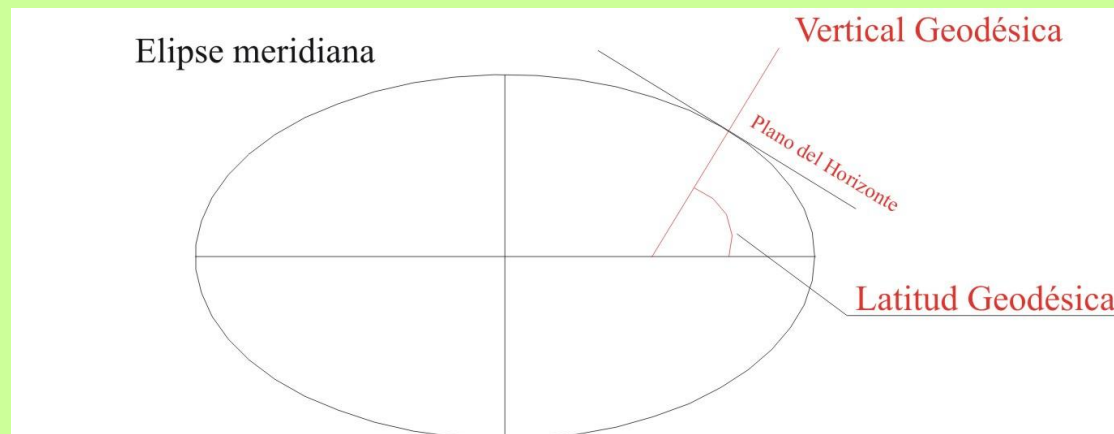
Año	Autor	Semieje Mayor (Km)	Aplanamiento	Países en que se utilizó
1830	Everest	6.377,276345	1/300,8017	India, Ceylan, Malasia
1841	Bessel	6.377,397155	1/299,1528	Europa Central y China
1849	Airy	6.377,563396	1/299,3249	Gran Bretaña
1858	Clarke	6.378,294	1/294,261	Australia
1860	Struve	6.378,2983	1/294,73	España, Rusia
1866	Clarke	6.378,2064	1/298,97867	Norte América
1876	Andrae	6.377,10443	1/300,0	Dinamarca, Islandia
1880	Clarke	6.378,24917	1/293,465	Francia y África
1909	Hayford	6378,388	1/297	Internacional *

* En 1924 adoptado como elipsoide internacional

- La conclusión fue que la Tierra no se ajustaba a un elipsoide perfecto
- Se supusieron otras posibilidades como elipsoide triaxial (Schubert, Clarke, Helmert, Krassovski)
- Tres ejes ortogonales distintos, y todas las secciones son elipses
- Aproximación más real a la forma: geoide
- Otros elipsoides como el WGS-84 (1/298), utilizado para el GPS

T4.1 Sistemas de referencia

- Con el uso del elipsoide, redefinir coordenadas
- La longitud no resulta afectada en elipsoide de revolución (Ecuador y paralelos: circunferencias)
- La latitud geodésica se define como el ángulo que forma la vertical geodésica con el Ecuador
- Esta vertical (normal al elipsoide) no coincide con el radio, no pasa por el centro de la Tierra
- La latitud no puede medirse como arco de meridiano, su desarrollo varía según latitud. Así 1°:
 - En Ecuador tiene desarrollo de 110,573 Km
 - A latitud 40° es de 111,025 Km
 - En el Polo llega a valer 111,697 Km



T4.1 Sistemas de referencia

1. La esfera terrestre

2. El elipsoide

3. El geoide

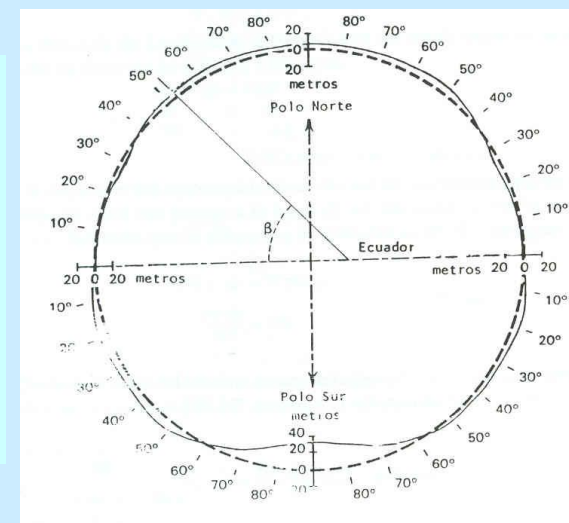
- Concepto
- Relaciones con otras superficies
- Datum
- Coordenadas astronómicas

4. Sistemas referencia

5. Métodos

T4.1 Sistemas de referencia

- En siglo XVIII algunos científicos constataron imposibilidad de ajustar una figura geométrica y barajar la idea de una Tierra irregular
 - Forma relacionada con el campo gravitatorio terrestre, irregular por la distinta distribución de las capas internas (y externas) de la Tierra
 - A esta figura se le llamó geode (Herschell): "con forma de Tierra"
 - Geode: Superficie equipotencial del campo gravitatorio terrestre que coincide con nivel de mar
 - Su materialización "física" (visible) sería la prolongación bajo los continentes de la superficie de los mares en calma
 - El geode se adapta bastante, no obstante, al elipsoide o esferoide
-
- La determinación del geode se realiza mediante observaciones gravitatorias
 - El método astrogravimétrico (Krassovski, Molodensky) permite además:
 - Determinar el campo gravitatorio externo
 - Reducir los datos obtenidos sobre la superficie terrestre al elipsoide de referencia



T4.1 Sistemas de referencia

Separación u ondulación del geode

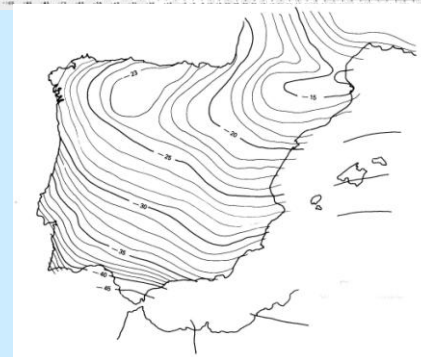
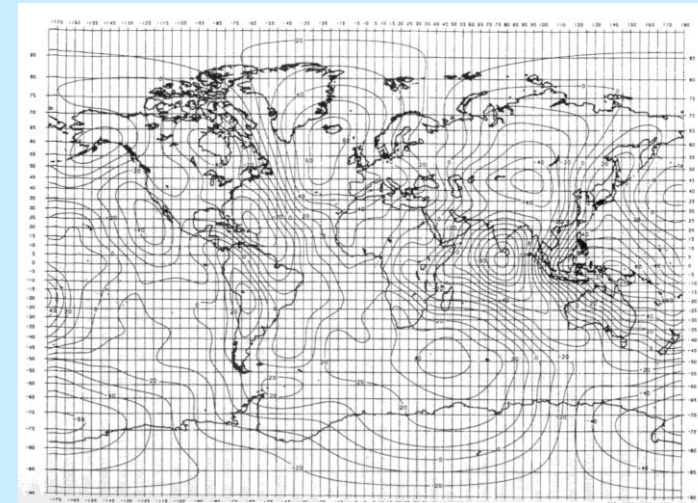
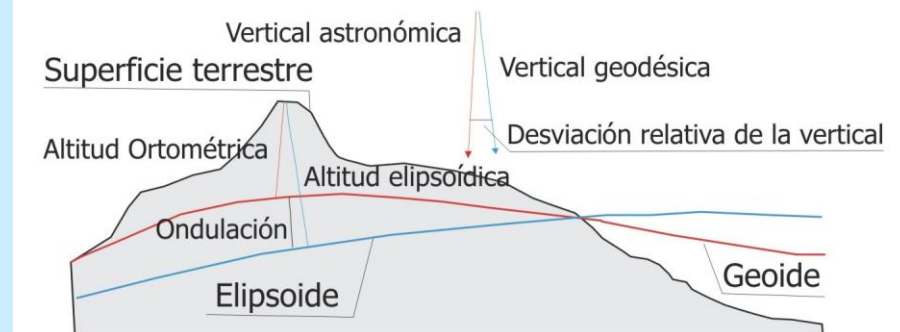
- Diferencia o distancia entre un elipsoide y el geode

$$h = H + N$$

Donde N es la ondulación;

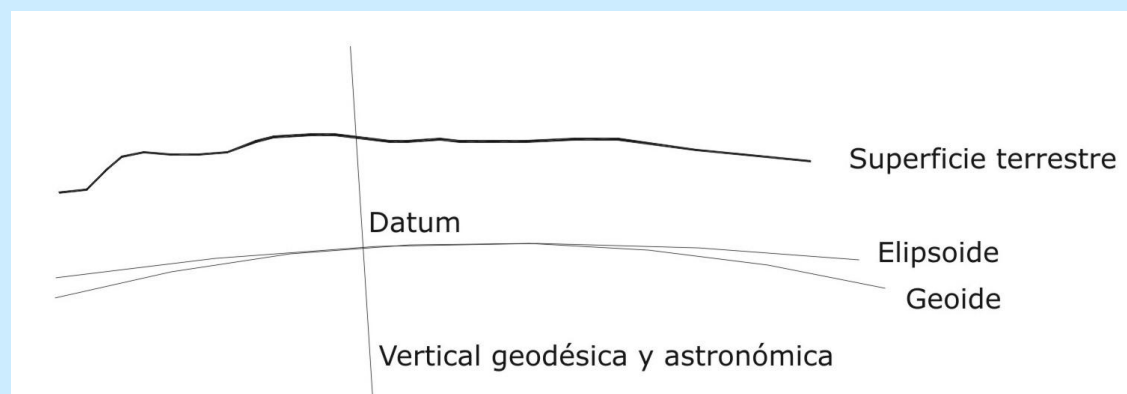
h y H: altura elipsoídica y ortométrica

- La altitud elipsoídica h se obtiene normalmente de las observaciones a satélites
- La altitud ortométrica H se obtiene por nivelaciones y medidas de la gravedad
- La ondulación permite el paso del elipsoide al geode y viceversa
- Puede tener sentido positivo o negativo y no suele superar los 60 m en todo el planeta
- Valores (-) en zonas continentales (geode sobre elipsoide) y (+) en oceánicas
- Si se requiere precisión métrica hay que tener en cuenta la ondulación a distancias de Km
- A nivel de España, ondulación negativa (- 30 m)



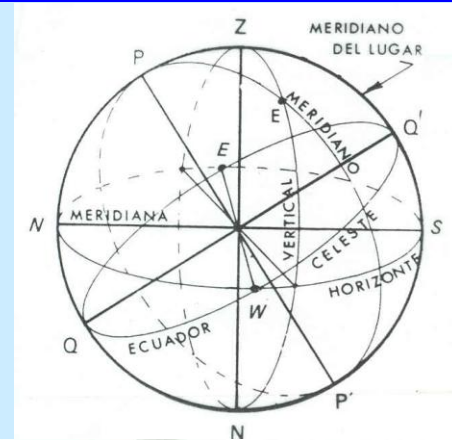
T4.1 Sistemas de referencia

- Se denomina datum o punto fundamental al punto en que se hacen coincidir al elipsoide y al geoide (ondulación 0)
- En él además coinciden la vertical geodésica y astronómica (normal al geoide), se anula la desviación relativa de la vertical
- La desviación debida a irregularidad del campo gravitatorio, en las capas más superficiales se debe a la isostasia ("raíces" de las montañas)
- Esto se hace orientando el elipsoide adecuadamente mediante las observaciones de Laplace
- En el caso del sistema de referencia europeo ED-50 el datum es la Torre Helmert de Postdam



T4.1 Sistemas de referencia

- Latitud astronómica en cada punto: Angulo que forma vertical astronómica (péndulo) con plano del Ecuador
- Se determina mediante métodos astronómicos

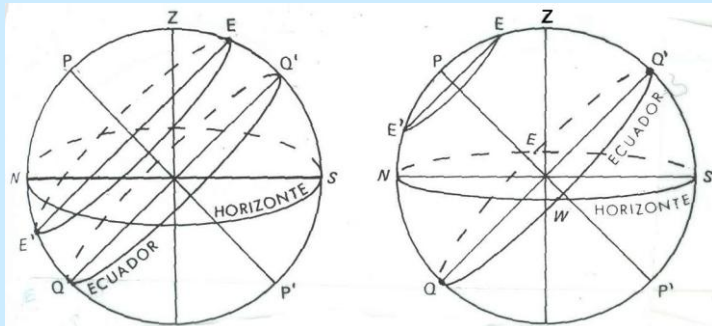
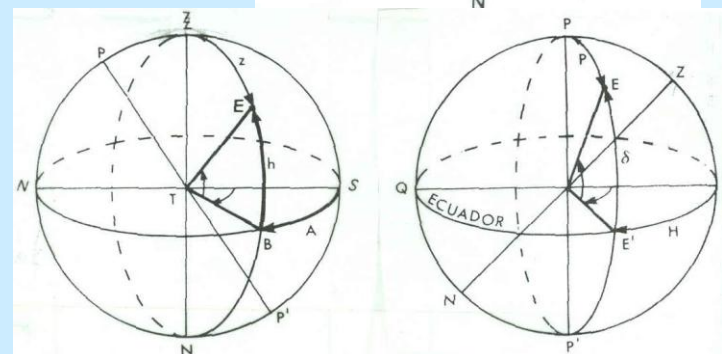


Elementos de la esfera celeste

- Eje mundo, Ecuador, paralelos y meridianos celestes
- Vertical (ZN), horizonte del lugar y planos verticales
- Meridiano del lugar: Contiene al eje y vertical

Coordenadas astronómicas

- Coordenadas horizontales: altura de horizonte (h), distancia cenital (z) y azimut (A)
- Coordenadas ecuatoriales horarias: declinación (δ), distancia polar (p) y ángulo horario (H)



Método de culminaciones

- Observar una estrella en el momento de su paso por meridiano del lugar (normalmente superior)
- La declinación se conoce y la altura se mide

Otros métodos

- Alturas absolutas y método de Talcott
- Fórmula de Litrow (observación de la polar)

$$PE = PZ + ZE$$

$$\varphi = 90 - h + \delta$$

$$PZ = PE + ZE$$

$$\varphi = 90 + h - \delta$$

T4.1 Sistemas de referencia

- Determinación de la longitud: problema de medida del tiempo
- El Sol da una vuelta completa a la Tierra (360°) en un día (24 h) de E a W
- En cada momento el Sol pasa por el meridiano de un lugar determinado
- A cada intervalo de tiempo corresponde una diferencia en la longitud de puntos de paso del Sol

$$\Delta\lambda = \Delta t * 15^\circ/h$$

- La longitud de un punto se obtiene comparando el tiempo de paso por su meridiano y el tiempo de paso por el meridiano de Greenwich (TUC)
- El tiempo de paso por el punto por observación del Sol (Tverdadero)
- TUC (Tiempo Universal Coordinado) a partir de señales horarias (pitidos)
- Hora verdadera (Tv): Sol real pasa 2 veces al día por meridiano del lugar
- Hora media (Tm): Sol medio (en el que se elimina el efecto de traslación)
- Se pasa de una a otra a través de la ecuación del tiempo
- Hora civil (Tc): Se + o - 12 h a la media (cambio de día por la noche)
- Hora oficial (To): Reducción de todas las horas locales de un huso (zona horaria) a la civil del meridiano central del uso
- Hora legal (Tl): Se suman 1 o 2 horas a la oficial (políticas o economía)
- Es la que marcan los relojes y se puede usar para calcular la longitud
- Varía un número entero respecto al TUC (legal en el huso de Greenwich)

T4.1 Sistemas de referencia

1. La esfera terrestre

2. El elipsoide

3. El geoide

4. Sistemas referencia

- Sistemas globales
- Sistema europeo (EUREF)
- Sistemas locales y redes geodésicas

5. Métodos

T4.1 Sistemas de referencia

- Son sistemas de referencia establecidos a nivel mundial
 - El sistema de coordenadas geográficas sobre el elipsoide es de este tipo: longitud y latitud geodésica, altitud elipsoídica (ortométrica+ondulación)
- ITRS**
- Sistema Internacional de Referencia Terrestre: sistema rectangular geocéntrico
 - Eje Z de rotación de la Tierra fijado por el IERS
 - Eje X: Intersección entre Ecuador y meridiano origen
 - Eje Y: Ortogonal a los anteriores en sentido dextrógiro
 - Estos sistemas son la base de las observaciones geodésicas con satélite, que permiten obtener coordenadas precisas de puntos de toda la Tierra
 - Las técnicas de observación han evolucionado desde fotografías, telemetría láser y doppler, interferometría (VLBI), sistema DORIS y GPS
 - El uso de estas técnicas permite:
 - Determinar la forma de la Tierra y su campo de gravedad
 - Determinar elipsoides a nivel global y conectar datums
 - Materializar marcos de referencia globales
 - Cada técnica proporciona su propia versión del ITRS, conocida como ITRF (Marcos de Referencia)
 - Las posiciones: función del tiempo (dinámica terrestre), han de recalcularse

T4.1 Sistemas de referencia

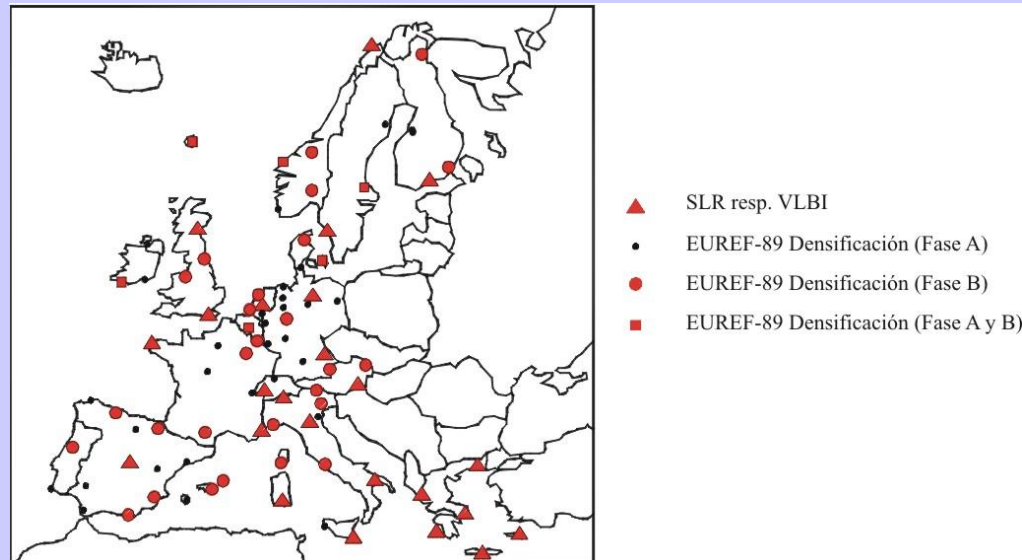
- Sistema WGS (Sistema Geodésico Mundial, USA) base del GPS
- En la actualidad se emplea el sistema WGS-84 (sustituto de los previos WGS-60, 66, 72), bastante coincidente con el ITRF-96
- Ha sido obtenido por observaciones mediante satélites TRANSIT (1591 que permiten definir el origen y ejes del sistema, y el elipsoide)

Sistema Geodésico Mundial de 1984 (WGS- 84)

Sistema geocéntrico, con origen en el centro de masas de la Tierra (geocentro)
El eje OZ paralelo a dirección del polo medio internacional (polo medio de 1903)
El eje OX es la intersección del Ecuador medio con el meridiano de Greenwich.
El eje OY es ecuatorial, de manera que forma con los otros dos un triedro trirrectangular "dextrorsum".
El modelo terrestre es un elipsoide de revolución cuyos parámetros son:
 $a = 6.378.137 \text{ m} \pm 2 \text{ m}$
 $b = 6.356.752,3 \text{ m} \pm 2 \text{ m}$
 $\alpha = 1/298,257223563$
La constante gravitacional, incluyendo la masa atmosférica, es $\mu = GM = 3986005 * 10^8 \text{ m}^3/\text{s}^2$.
La velocidad de rotación es $\omega = 7292115 * 10^{-11} \text{ rad/s} \pm 0,15 * 10^{-11} \text{ rad/s}$.
Coeficiente armónico zonal de segundo grado del geopotencial

T4.1 Sistemas de referencia

- Dentro del ITRF, existen redes que buscan soluciones más precisas a nivel regional
- Un ejemplo: ETRF europeo (EUREF), desarrollado a partir de 1987 y basado en GPS. Objetivos:
 - Ser referencia geodésica para proyectos geodésico/geodinámico sobre placa europea
 - Ser referencia de precisión, próxima al WGS84, para la geodesia y navegación
 - Constituir referencia para las bases de datos cartográficas en Europa
- Sustituyó a la antigua red ED-50, sistema calculado tras la 2ªGM a partir de datos terrestres



T4.1 Sistemas de referencia

Red Iberia-95

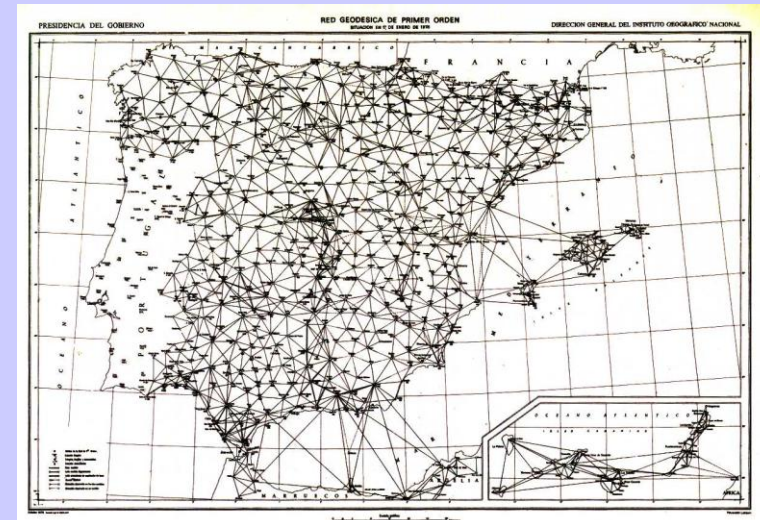
- En España y Portugal, realizada entre el IGN y el IPCC portugués
- Red Geodésica Tridimensional de alta precisión que densifica el marco EUREF-89
- Las observaciones se llevaron a cabo desde 27 estaciones españolas y 12 portuguesas con GPS

Proyecto Regente

- Supone una nueva densificación de las redes anteriores
- Objetivo de enlazar la red regional (EUREF-89) con marcos de referencia locales en los que se basan las cartografías de los distintos países
- La densidad es de una estación por cada 300 km² (1 hoja del MTN50)
- Se utilizaron 1108 vértices de la Red de Orden Inferior y 196 clavos de la Red de Nivelación
- Así se podrá tener una cartografía unificada de toda Europa

T4.1 Sistemas de referencia

- En España, a partir de 1858 se desarrolló red geodésica con 3 órdenes
 - Formada por una serie de triángulos que cubren el territorio nacional (peninsular e insular) y quedan enlazados con resto Europa y Africa
 - Elaborada por triangulación (medida de ángulos y algunas distancias para compensación)
 - Por métodos astronómicos se determinó la posición del punto astronómico fundamental
 - Junto a ella la red de nivelación de precisión, obtenida a lo largo de vías de comunicación
 - Se basa igualmente en un punto, el nivel medio del mar en Alicante
-
- Observada y densificada varias veces
 - En 1950, compensación conjunta con el resto de Europa y adopción del datum europeo (ED-50)
 - Hoy día ha sido reconstruida, formada:
 - 680 vértices de primer orden
 - 11000 vértices de la red de orden inferior



T4.1 Sistemas de referencia

1. La esfera terrestre

2. El elipsoide

3. El geoide

4. Sistemas referencia

5. Métodos

- Método de los arcos
- Método de las áreas
- Métodos gravimétricos
- Geodesia espacial

T4.1 Sistemas de referencia

Método de los arcos

- Basado en la medición de un arco de meridiano, como lo que realizó Eratóstenes en su época
- Posteriormente se ha perfeccionado y lo que se miden son cadenas de triángulos en el sentido del meridiano, que permiten compensar errores
- Es el método que permitió determinar la forma elipsoidal de la Tierra (P.Picard, Cassini, La Hire)
- Posteriormente utiliza por geodestas como Delambre, Mechain ..., para definir elipsoides

Método de las áreas

- Consiste en calcular las coordenadas astronómicas y geodésicas de varios puntos de la Tierra
- Esto equivale a disponer de las verticales y por tanto la desviación relativa de la vertical, con respecto a una serie de elipsoides
- Con ello se podría determinar el elipsoide que mejor se ajustara a esta zona de la Tierra
- Este fue el método que empleó Hayford y otros geodestas (Krassovski, etc.) para determinar sus elipsoides

T4.1 Sistemas de referencia

- Se obtienen medidas de la gravedad tanto en zonas continentales como oceánicas
- Se utiliza el péndulo, el gravimétero y el péndulo de Veining-Meissenz para zonas submarinas
- A partir de las medidas se utilizan métodos de cálculo como la fórmula de Stokes, o la transformada rápida de Fourier (FFT)
- Los elipsoides del WGS-84 y el IERS-89 han sido obtenidos con este método

T4.1 Sistemas de referencia

- Basada en la recepción en Tierra de señales electromagnéticas procedentes de cuerpos físicamente no ligados a ella
- La trayectoria de un satélite (definida por sus parámetros orbitales) es perturbada por los campos gravitatorios a los que está sometido
- Si se conoce el campo gravitatorio terrestre se podría conocer la perturbación que ejercería sobre un satélite determinado
- Inversamente conocida la trayectoria del satélite se puede conocer el campo gravitatorio y por lo tanto se puede reconstruir el geoide
- La trayectoria se reconstruye midiendo la posición orbital del satélite en varios instantes, desde estaciones de coordenadas conocidas
- Una vez conocidas las posiciones orbitales se pueden a su vez conocer las coordenadas de puntos de la superficie terrestre

Método de medida

- SLR (Satellite Laser Ranging): Uso de un haz láser
- VLBI (Very Long Baseline Interferometry): Radiotelescopios orientados a un mismo cuásar
- Sistema TRANSIT: Satélites basados en efecto Doppler
- Sistema de Posicionamiento Global (GPS): Para determinar la posición de un punto se necesitan la señal de al menos 3 (ó 4) satélites (o puntos)

