



Last updated October 11, 2021

Geodesia e Sistemi di Riferimento

Lezione 3

G. Bacaro

Sistemi Informativi Geografici (GIS)
CdL in Scienze e Tecnologie per l'Ambiente e la Natura
Il anno, I semestre

Argomenti

1. Forma e dimensioni della Terra
2. Geoide ed ellissoide
3. Sistemi di riferimento
4. Sistemi di riferimento usati in Italia

Geodesia

La parola geodesia deriva dal greco γη ("terra") e δαιζω ("dividere").

La geodesia è la scienza che studia:

- la forma e la dimensione della Terra,
- la definizione di modelli semplificati della Terra (geodesia teorica)
- la determinazione della posizione esatta di punti sulla superficie della terra (geodesia pratica).

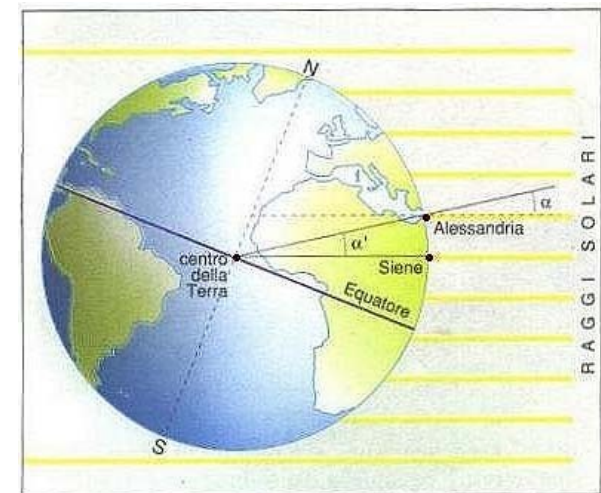
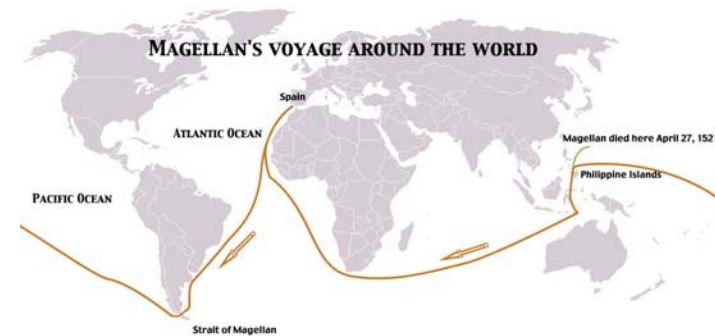
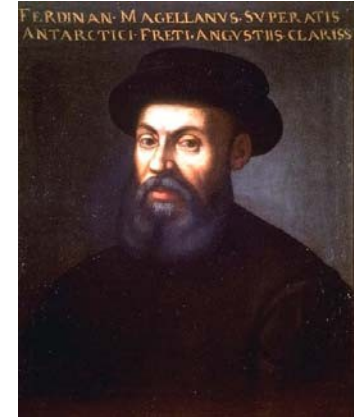
Le dimensioni della Terra

Raggio Equatoriale (a)	Km 6.378,4
Raggio Polare (b)	Km 6.356,9
Differenza (a - b)	Km 21.5
Schiacciamento ($a = [a - b]/a$)	1/297
Circonferenza equatoriale	Km 40.076,6
Lunghezza del Meridiano	Km 40.008,9
Superficie	Km ² 509.950,414
Volume	Km ³ 1.083.000.000
Monte Everest	m 8.882
Fossa di Emden	m -10.793



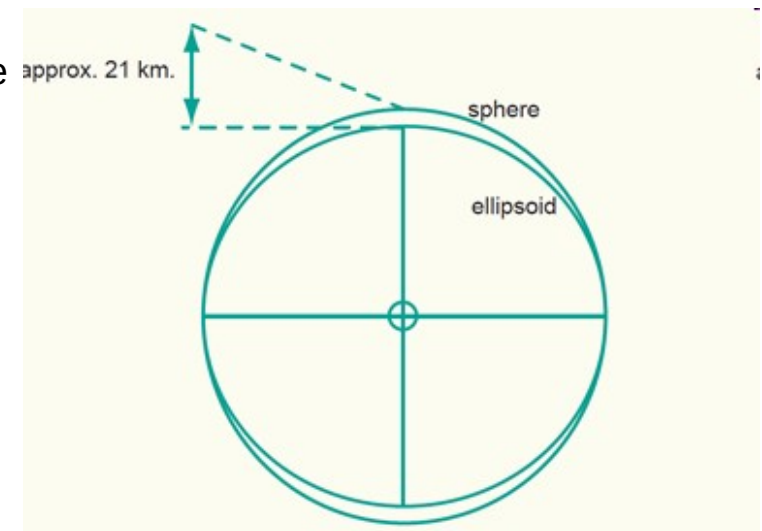
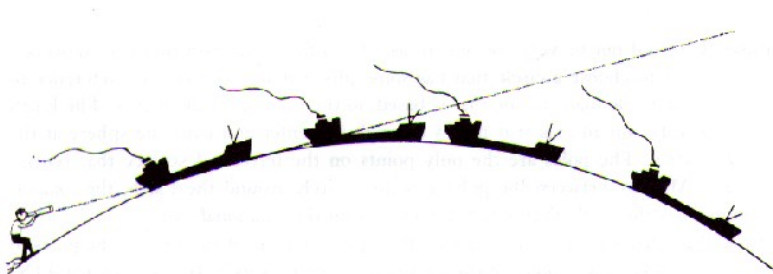
La forma della Terra

- La forma della Terra è in prima approssimazione sferica.
- La dimostrazione definitiva risale al XVI secolo quando i grandi viaggi oceanici portarono alla prima circumnavigazione del globo terrestre (Magellano, Pigafetta).
- In realtà, già nell'antichità alcuni scienziati – tra cui Eratostene di Cirene (III sec. a.C.) – avevano sostenuto la sfericità della Terra, arrivando a determinarne le dimensioni con notevole precisione tramite procedimenti geometrici e astronomici.

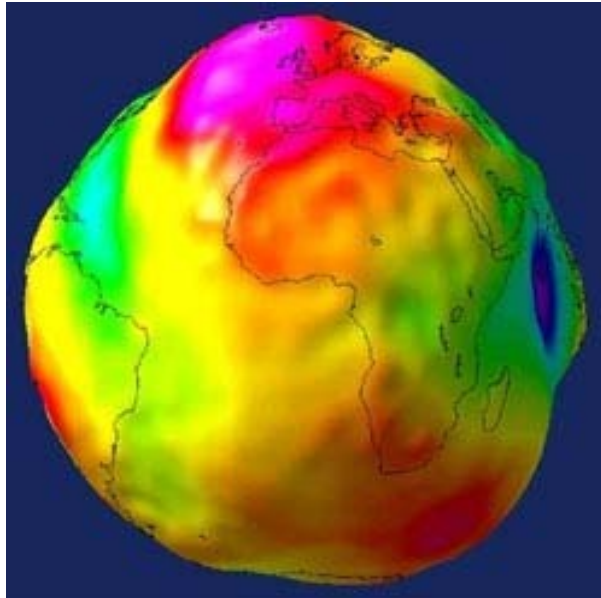


La forma della Terra

- A sostegno della tesi sulla sfericità della Terra, prima dell'osservazione del pianeta dallo spazio, furono addotte come prove:
 - la scomparsa/comparsa progressiva delle navi sull'orizzonte
 - l'ombra circolare proiettata dalla Terra durante le eclissi di Luna
- In realtà, la Terra non è un sfera perfetta, ma è leggermente schiacciata in corrispondenza dei poli e rigonfia all'Equatore, a causa dell'effetto centrifugo indotto sulla sua massa dalla forza di rotazione. Il solido geometrico che meglio approssima la forma della Terra è quindi un ellissoide con il diametro equatoriale maggiore del diametro polare. Il rapporto tra la differenza tra i due diametri e il diametro equatoriale è detto indice di eccentricità o schiacciamento (flattening).



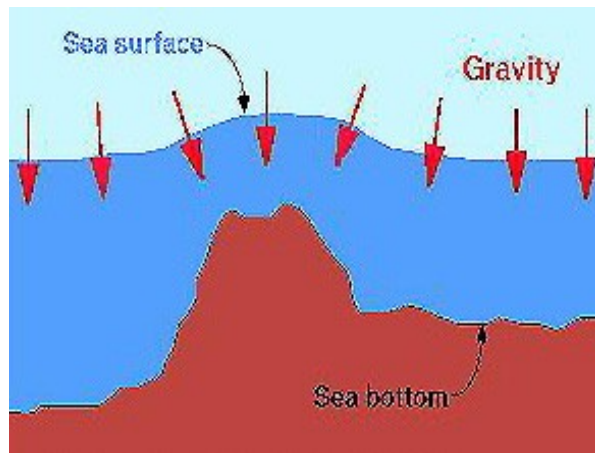
La forma della Terra: il geoide



La forma della Terra deriva da molteplici forze (di attrazione gravitazionale, legate ai movimenti di rotazione e traslazione, ecc.) che agiscono sulle sue masse (in parte solide ed in parte fluide) ed ha quindi una **forma irregolare**.

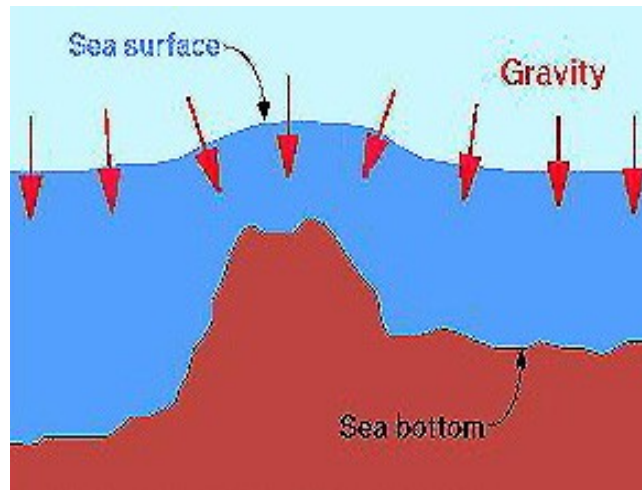
Il solido che descrive più fedelmente la forma della Terra è il **geoide**.

Il geoide non ha forma descrivibile in termini geometrici ed è generalmente definito come **superficie equipotenziale del campo gravitazionale terrestre**, coincidente con il pelo libero delle acque, se i mari e gli oceani potessero passare attraverso le terre emerse.



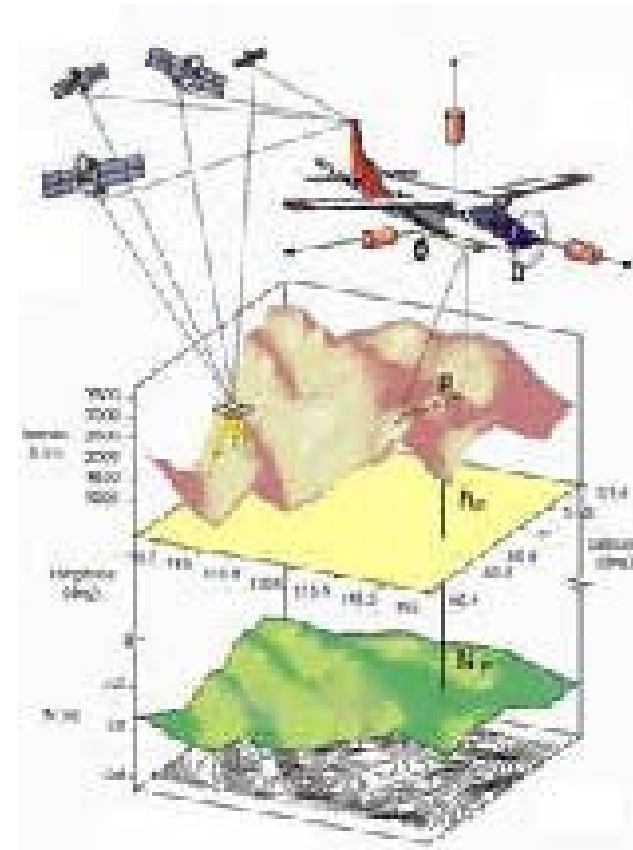
La superficie geodica è in ogni punto perpendicolare alla direzione della forza di gravità.

La forma della Terra: il geoid



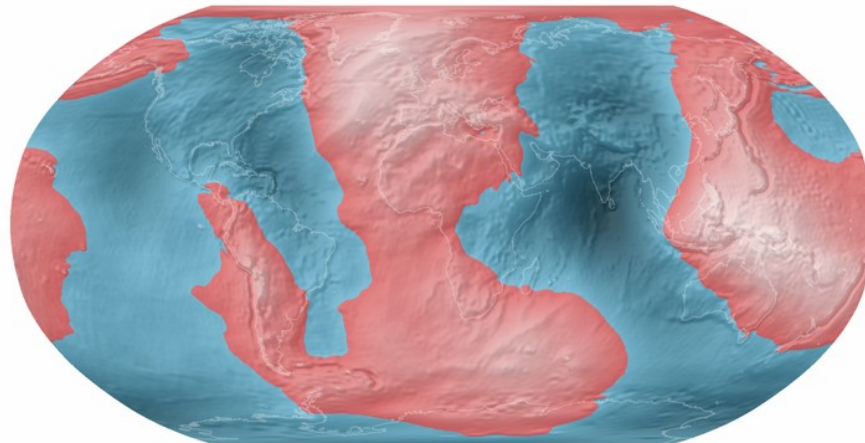
L'andamento della superficie geoidica risente della distribuzione delle masse, e reagisce alla presenza/mancanza di massa ("montagne" attraggono verso l'alto la superficie, "fosse" producono avvallamenti nella superficie).

Misure geofisiche e gravimetriche consentono di rilevare variazioni dell'attrazione gravitazionale e di definire la forma della superficie geoidica.



La forma della Terra: il geoide

Deviation of the Geoid from the idealized figure of the Earth
(difference between the EGM96 geoid and the WGS84 reference ellipsoid)



Red areas are above the idealized ellipsoid; blue areas are below.

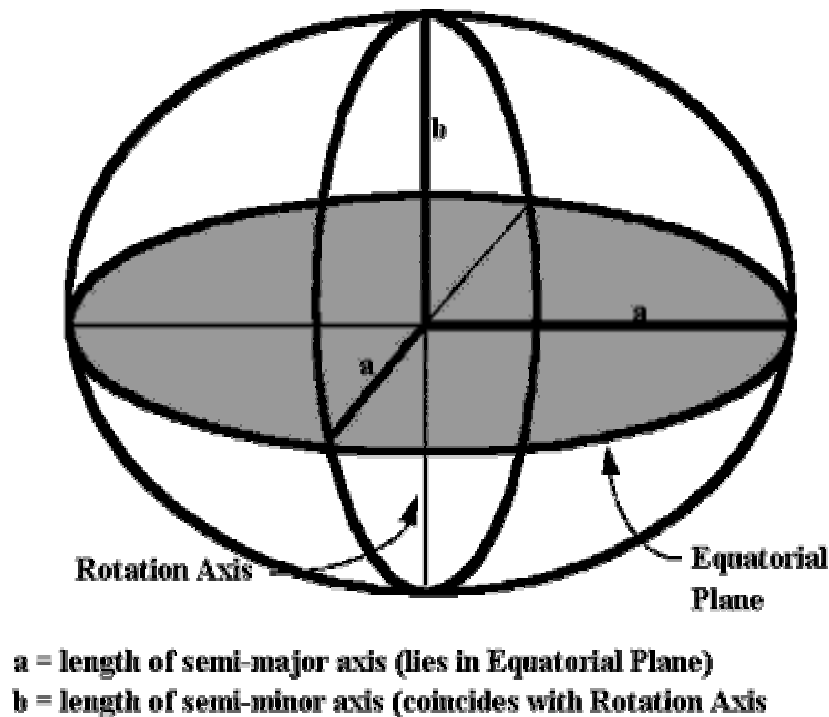


E' possibile studiare il geoide misurandone gli scarti (ondulazioni) rispetto alla superficie che meglio approssima la superficie geoidica:

l'ellissoide di rotazione con semiasse polare minore di quello equatoriale.

Tramite le misure geofisiche e gravimetriche cui si accennato si arriva alla determinazione di modelli del geoide (EGM96, nel caso della figura; ITALGEOanno per l'Italia) in base ai quali vengono misurate le ondulazioni rispetto alla superficie ellissoidica di riferimento.

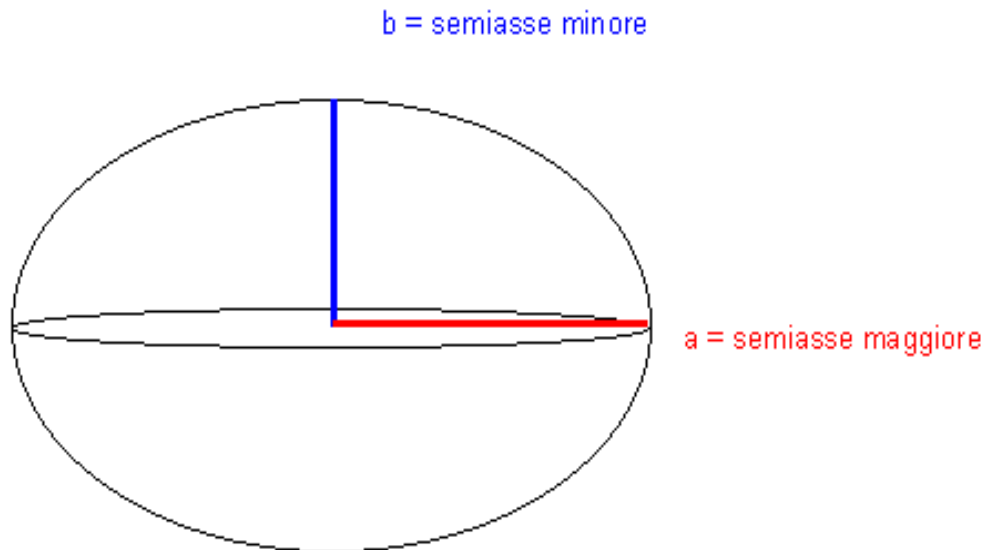
Ellissoide I



L'ellissoide di rotazione è il solido descrivibile in termini geometrici e matematici che meglio approssima la forma reale della Terra e per questo viene a costituire la superficie di base per le rappresentazioni cartografiche (**superficie di riferimento**).

L'ellissoide di riferimento è un ellissoide di rotazione con semiasse polare minore di quello equatoriale (schiacciamento polare).

Ellissoide II



L'ellissoide è definito nella forma e nelle dimensioni quando si conoscano la lunghezza del semiasse maggiore (a) e lo schiacciamento (flattening), cioè il rapporto tra la differenza tra i due semiasse e il semiasse maggiore.

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

- a** semiasse maggiore = raggio equatoriale
- b** semiasse minore = raggio polare

Ellissoide III

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$$

Equazione dell'ellissoide avente semiasse maggiore **a** e semiasse minore **b**

Raggio del parallelo di latitudine ϕ

$$r = \frac{a \cos \phi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}}$$

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

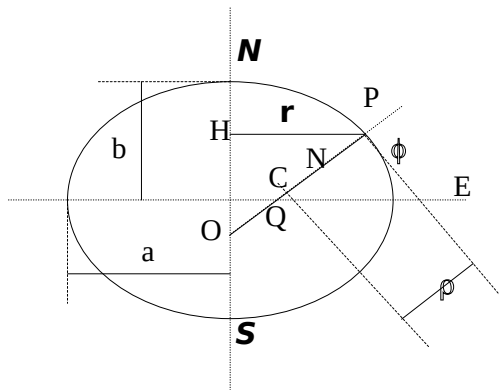
Schiacciamento

$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}}$$

Eccentricità

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

Raggio di curvatura del meridiano, o raggio di curvatura minore (intersezione dell'ellissoide con il piano contenente il meridiano).



Gran Normale, o raggio di curvatura maggiore (intersezione dell'ellissoide con il piano contenente la verticale al punto **P** e ortogonale al piano contenente il meridiano)

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}}$$

Ellissoidi principali

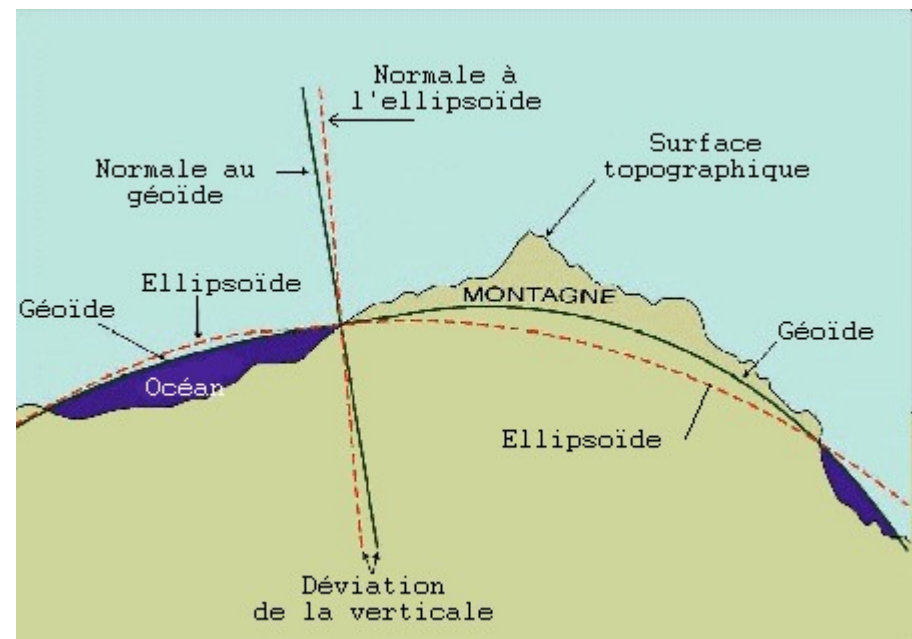
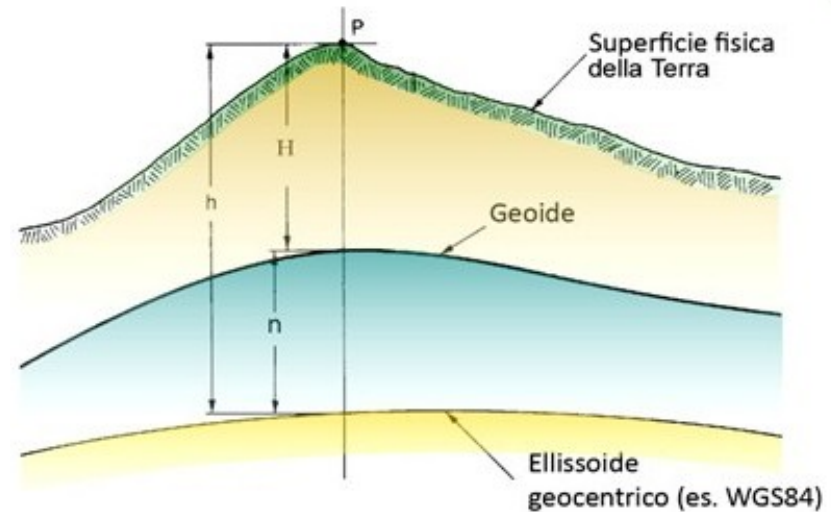
Storicamente, con il progredire delle scienze e della tecnica, sono stati definiti diversi tipi di ellissoide, poco differenziati gli uni dagli altri.

Ellissoide	Semiassa maggiore a	Schiacciamento a
EVEREST (1830)	6.377.276 m	1/300.8
BESSEL (1841)	6.377.397 m	1/299.2
CLARKE (1866)	6.378.206 m	1/294.9
CLARKE (1880)	6.378.301 m	1/293.5
HELMERT (1906)	6.378.140 m	1/298.3
HAYFORD (1909)	6.378.388 m	1/297.0
KRASSOVSKY (1942)	6.378.245 m	1/298.3
FISCHER (1960)	6.378.160 m	1/298.3
WGS84 (1987)	6.378.137 m	1/298.3

L'ellissoide di Hayford fu adottato nel 1924 dall'Unione Geodetica e Geofisica Internazionale con la denominazione di **ellissoide internazionale**.

Superfici topografica, geoidica ed ellissoidica

- La **superficie geoidica** è quella che “percepriamo” studiando l’attrazione gravitazionale.
- La **superficie ellissoidica** è una astrazione matematica, una semplificazione che noi adottiamo per sostituire la vera Terra con un modello che siamo in grado di descrivere analiticamente.
- La **superficie topografica** è quella che noi vediamo.



Posizionamento

Per localizzare in modo esatto un punto sulla superficie terrestre – o meglio la sua proiezione sull'ellissoide di riferimento – è necessario utilizzare un **sistema di coordinate**.

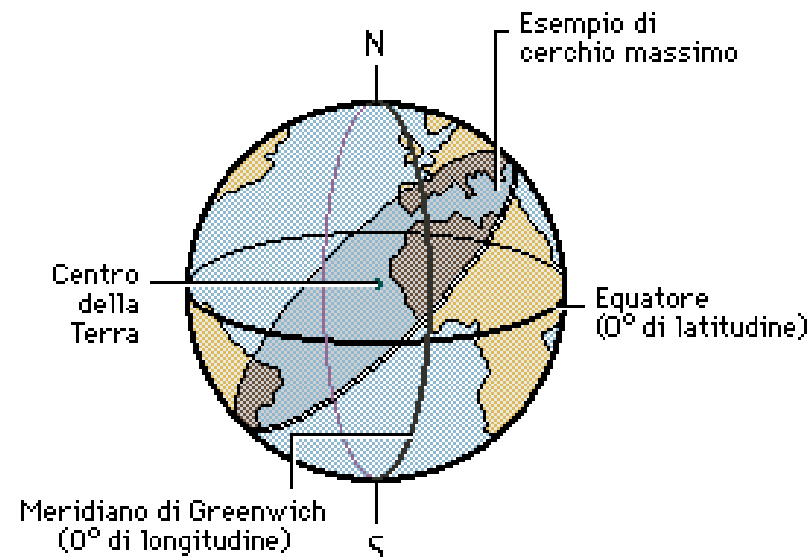
In base ai sistemi di coordinate può essere stabilita una **corrispondenza biunivoca** tra i punti della superficie terrestre e i punti rappresentati sulla carta.

Il più semplice (e intuitivo) sistema è basato sulle coordinate angolari riferite alla Terra nel suo complesso e si basa sulle proprietà geometriche della sfera.

Considerando la Terra come una sfera perfetta, ogni piano passante per il suo centro individua una superficie detta **cerchio massimo**. I cerchi massimi:

- sono le più grandi circonferenze tracciabili sulla sfera terrestre;
- sono in numero infinito.

Gli archi di cerchio massimo passante per due punti della superficie terrestre individua la distanza più breve tra i due punti.

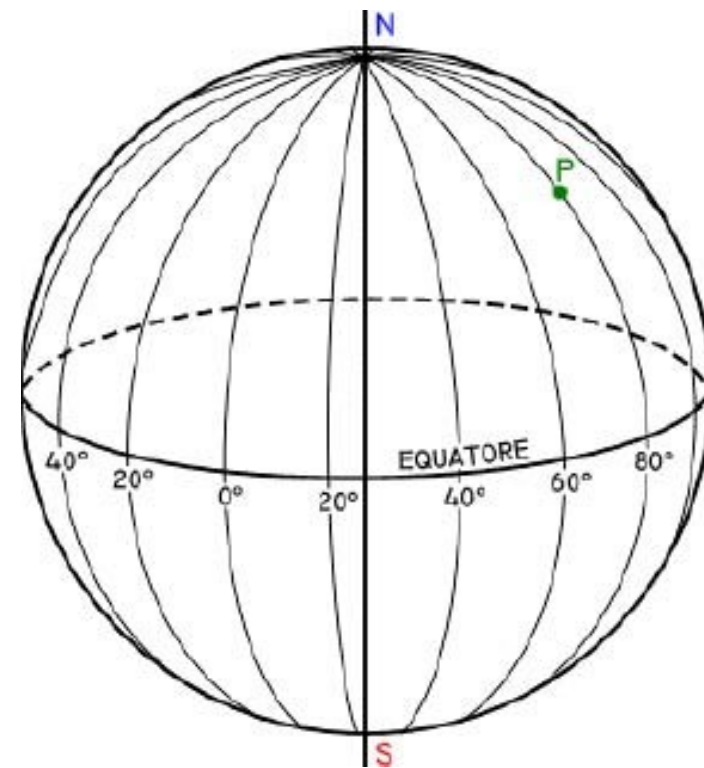


Posizionamento: meridiani e paralleli

I **poli** sono definiti come punti di intersezione tra l'asse di rotazione terrestre e la superficie della sfera.

I **meridiani** sono le (infinite) semicirconferenze massime, passanti per entrambi i poli.

Riferendosi ad un punto qualsiasi della superficie, chiamiamo meridiano la semicirconferenza che passa per tale punto e per i due poli. Il meridiano opposto è detto antimeridiano.

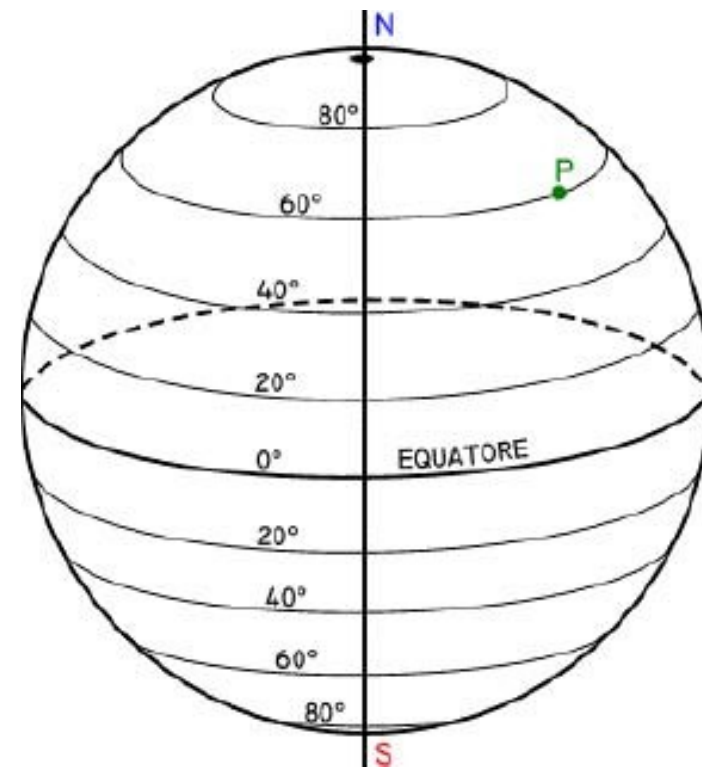


Posizionamento: meridiani e paralleli

I **paralleli** sono cerchi individuati sulla superficie sulla superficie terrestre da piani perpendicolari all'asse terrestre e appunto per questo sono tutti paralleli fra di loro.

Il parallelo massimo è l'**Equatore**, l'unico parallelo che sia un cerchio massimo. E' equidistante dai poli dividendo la Terra nei due emisferi boreale e australe.

I paralleli tagliano perpendicolarmente i meridiani e sono di lunghezza progressivamente minore allontanandosi dall'Equatore in direzione dei poli.

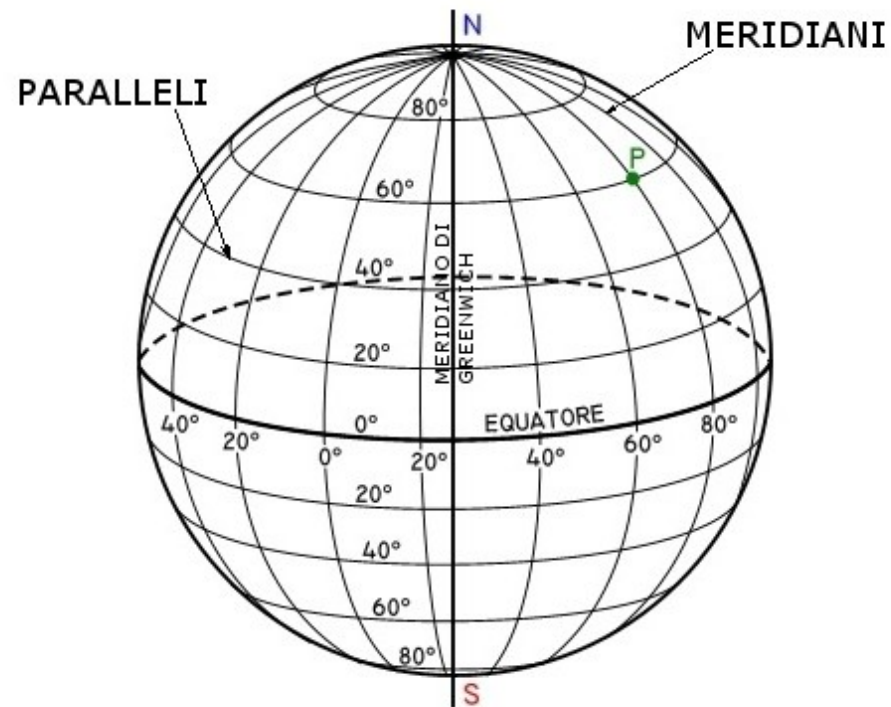


Posizionamento: reticolato geografico

I meridiani e i paralleli si intersecano ad angolo retto e definiscono una griglia detta **reticolato geografico**.

La posizione di un punto sulla superficie terrestre si può essere definita mediante due valori angolari detti **coordinate geografiche**: la latitudine e la longitudine.

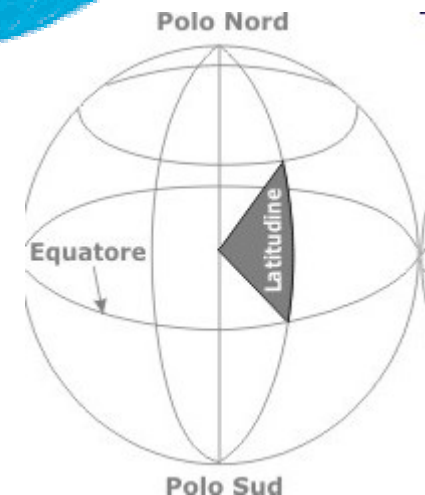
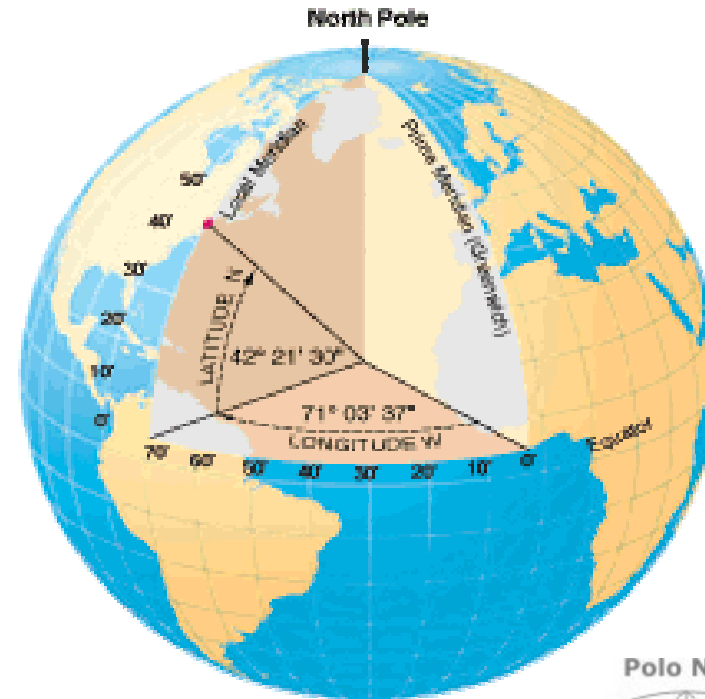
Tali valori consentono di stabilire una corrispondenza biunivoca tra i punti della superficie terrestre e i corrispondenti punti rappresentati sulla carta.



Posizionamento: latitudine

La **latitudine** è il *valore angolare dell'arco di meridiano compreso tra un punto e l'equatore* o, meglio, *il valore dell'angolo che la normale all'ellissoide in punto forma con il piano equatoriale*.

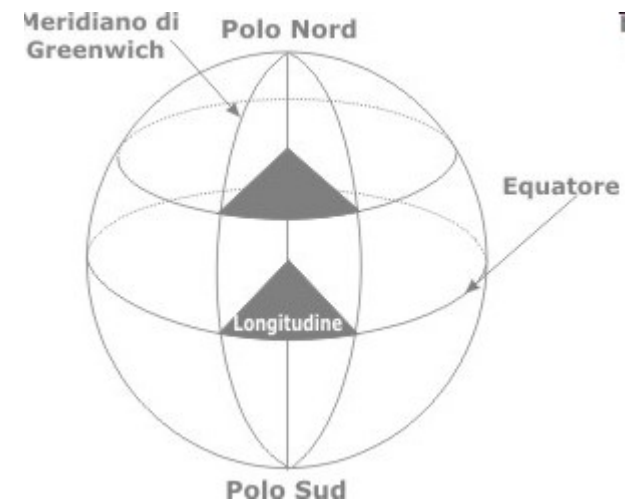
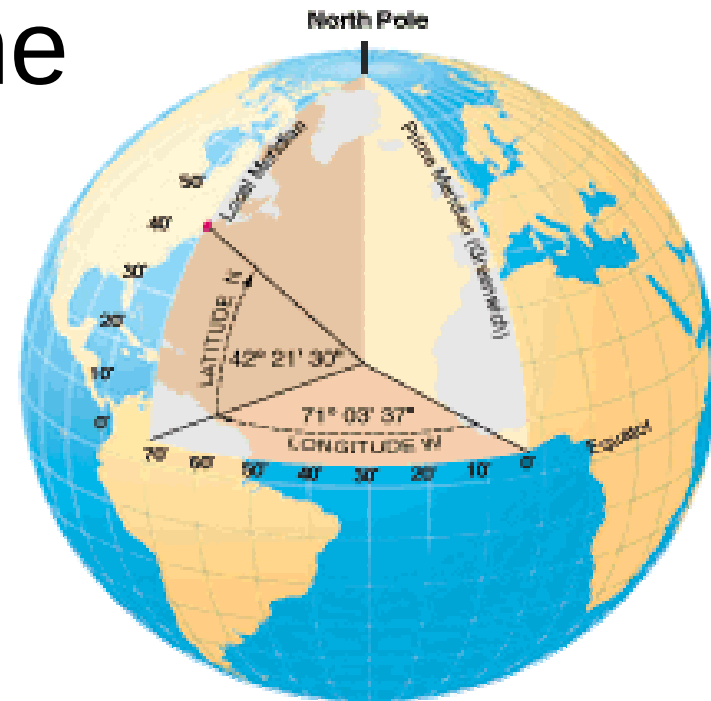
Si indica convenzionalmente con la lettera greca φ (phi) e varia da 0° (equatore) a 90° (polo) nord o sud a seconda che il punto sia rispettivamente nell'emisfero boreale o australe.



Posizionamento: longitudine

La **longitudine** è il valore angolare dell'arco di parallelo compreso tra un punto e il meridiano di riferimento.

Si indica convenzionalmente con la lettera greca λ (lambda) e varia da 0° a 180° est o ovest rispetto al meridiano di riferimento passante per Greenwich (Londra).



Posizionamento: coordinate geografiche

I valori delle coordinate geografiche possono essere espressi con diverse notazioni:

- **Gradi sessagesimali**(°), con sottomultipli espressi nel sistema sessagesimale:

- minuti (′), pari a 1/60 di grado

- secondi (″), pari a 1/60 di minuto

Ad esempio: Latitudine 45° 36′ 50″ N, Longitudine 8° 57′ 40″ E.

- **Gradi decimali**, con sottomultipli espressi nel sistema decimale

Ad esempio: Latitudine 45.61395° N, Longitudine 8.96118° E

Sistema di riferimento I

I valori delle coordinate che individuano la posizione di un punto sulla superficie terrestre non sono universalmente validi, ma dipendono da determinati parametri (tipo di ellissoide scelto come superficie di riferimento, posizionamento dell'ellissoide rispetto alla superficie geoidica).

E' pertanto necessario definire un **sistema di riferimento** planimetrico o **datum**, cioè un insieme di misure e regole che consentono di determinare in maniera univoca la posizione di un punto sulla superficie terrestre.

Un datum, è un modello semplificato e noto della Terra, adeguato per le esigenze di produzione cartografica.

Sistema di riferimento II

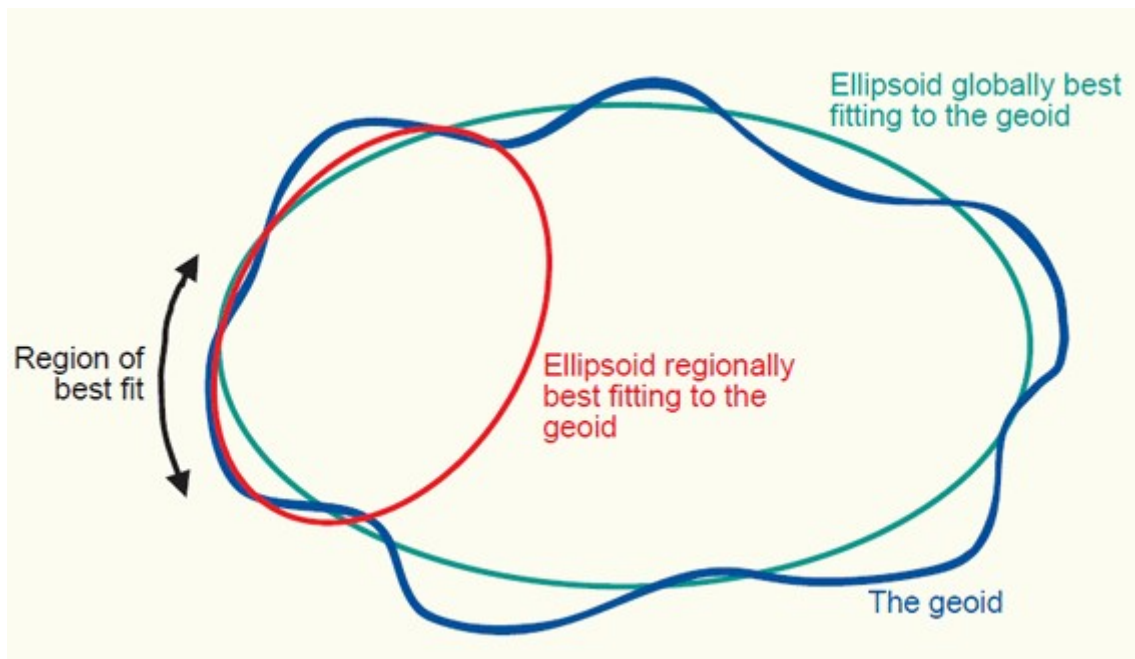
Un Datum è definito da:

- **ellissoide**, definito univocamente dai suoi semiassi maggiore e minore, o da uno di essi e dallo schiacciamento,
- definizione del **posizionamento** e dell'**orientamento** dell'ellissoide rispetto al geoide,
- **rete compensata di punti**, estesa sull'area di interesse (rete geodetica).

Sistema di riferimento III

A seconda della posizione (orientamento) dell'ellissoide rispetto al geode si distinguono:

- **sistemi di riferimento globale**, validi universalmente per tutta la superficie terrestre;
- **sistemi di riferimento locale**, validi per porzioni limitate (più o meno ristrette) della superficie terrestre.

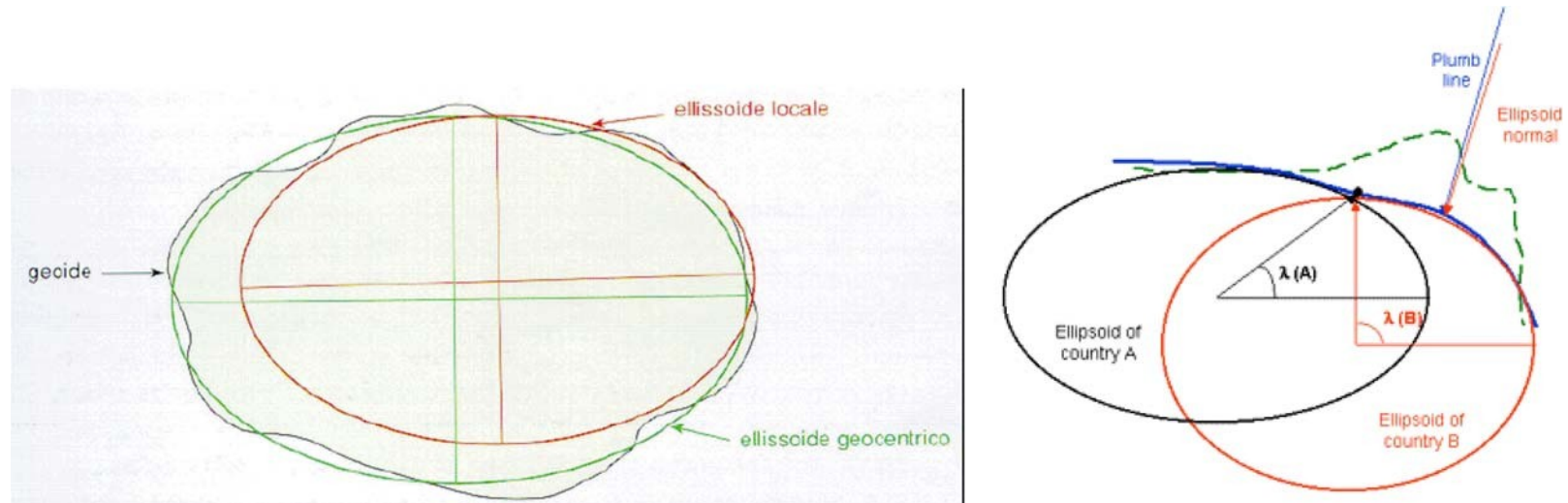


In azzurro superficie geoidica.

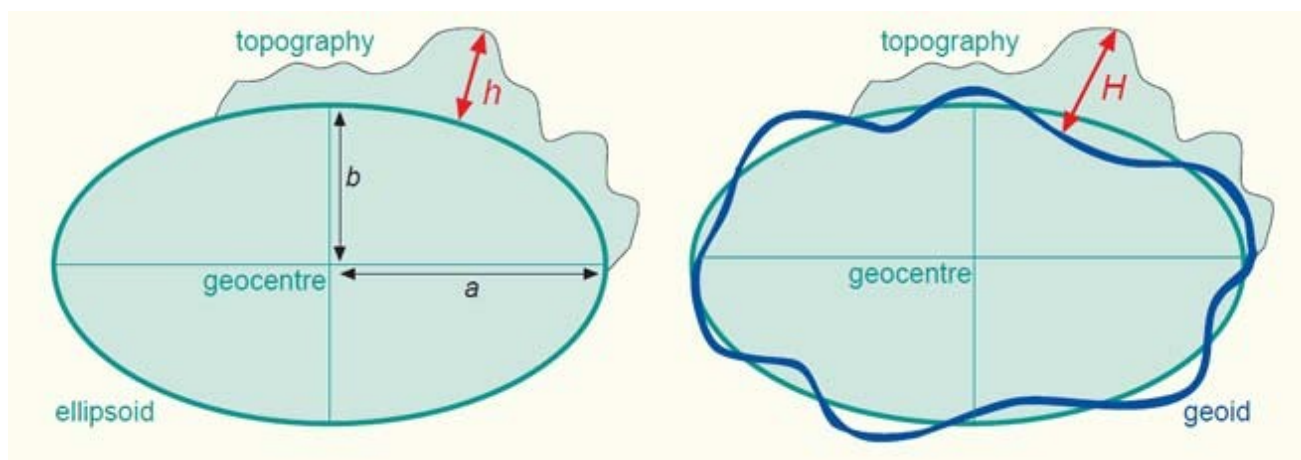
In rosso ellissoide orientato localmente.

In verde ellissoide geocentrico.

Sistema di riferimento IV



Nelle immagini è illustrata la differenza tra ellissoide locale ed ellissoide geocentrico (a sinistra) e tra due ellipsoidi locali (a destra).

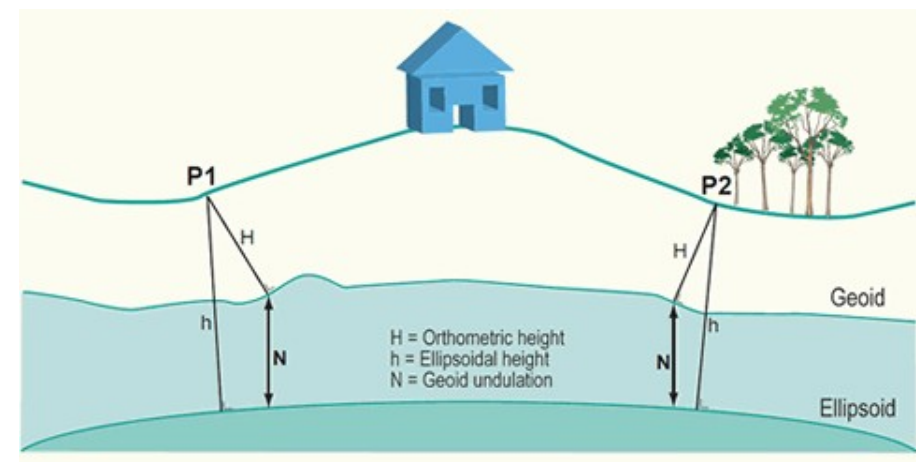
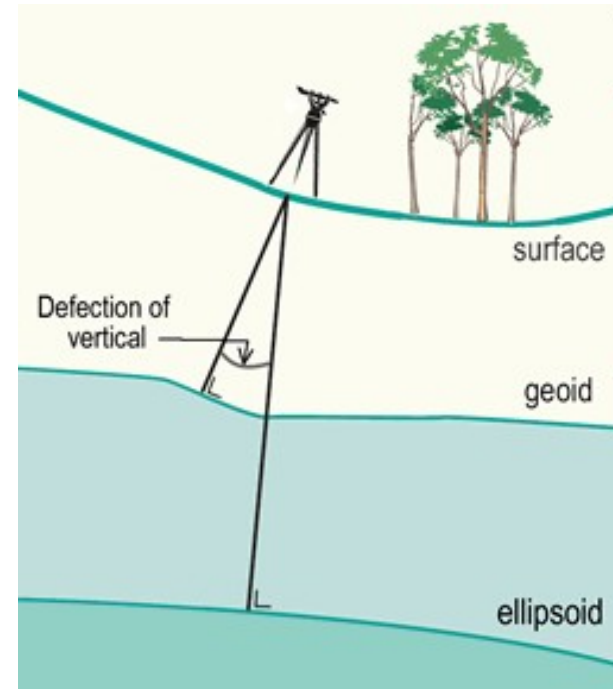


La differenza tra il valore h riferito all'ellissoide (altezza ellissoidica) e il valore H relativo al geode (altezza geoidica) descrive le ondulazioni geoidiche.

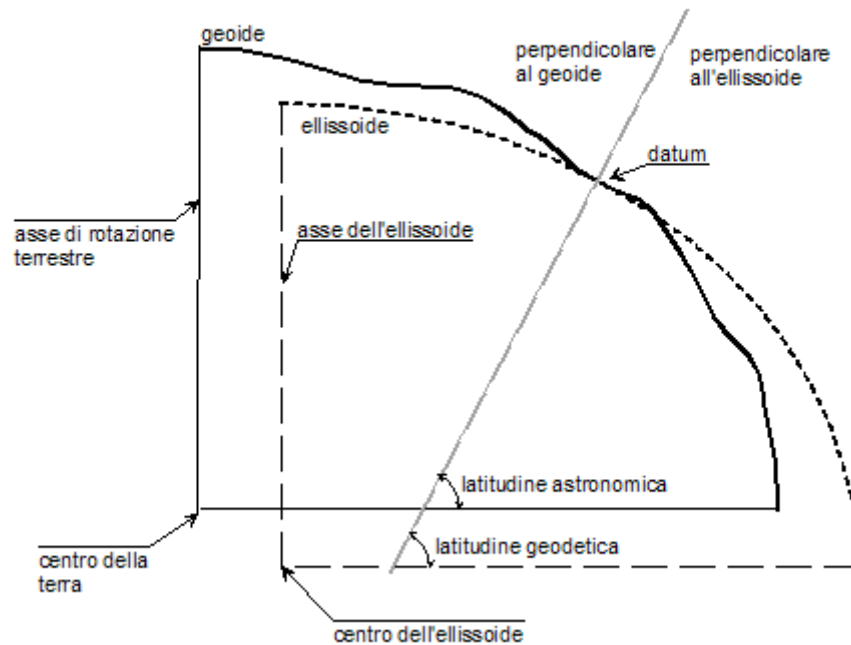
Sistema di riferimento V

La verticale al geoido, coincidente con la direzione del filo a piombo, non necessariamente coincide con la verticale geometrica all'ellissoide.

L'angolo tra le due verticali si chiama **deflessione (o deviazione) della verticale**. Tali deviazioni sono prodotte dalle ondulazioni geoidiche e hanno valori compresi tra 10" (aree pianeggianti) or 20-50" (aree montane).



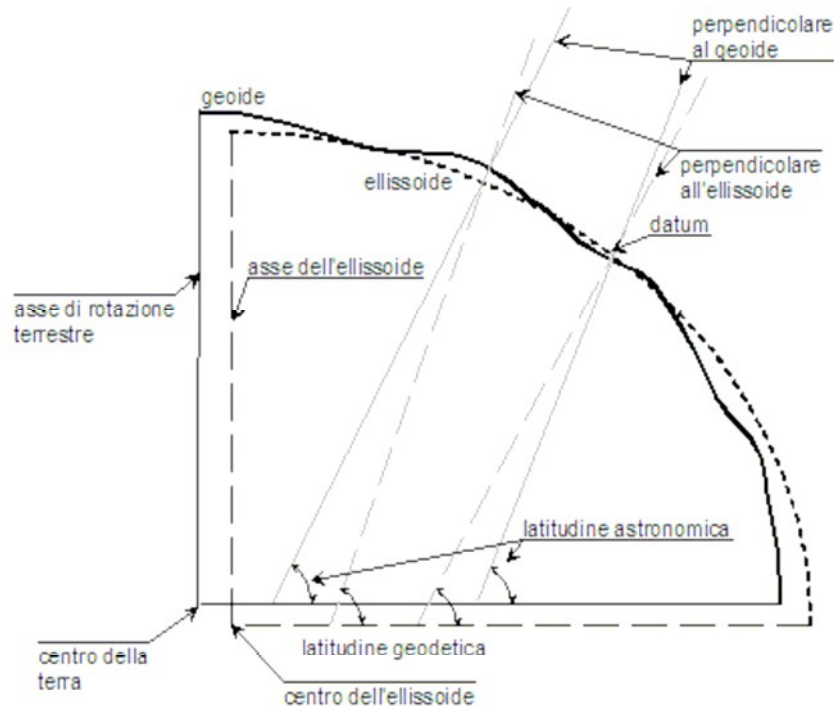
Orientamento ellissoide locale I



L'ellissoide può essere orientato rispetto al geoide in modo che in un certo punto sia garantita la tangenza tra le due superfici e la coincidenza tra la verticale geoidica e la verticale ellissoidica (**orientamento forte**).

La cartografia prodotta proiettando sul piano tale superficie ellissoidica risulta particolarmente affidabile per tutto il territorio circostante il punto di tangenza, ma per contro ha validità solo per porzioni limitate della superficie terrestre.

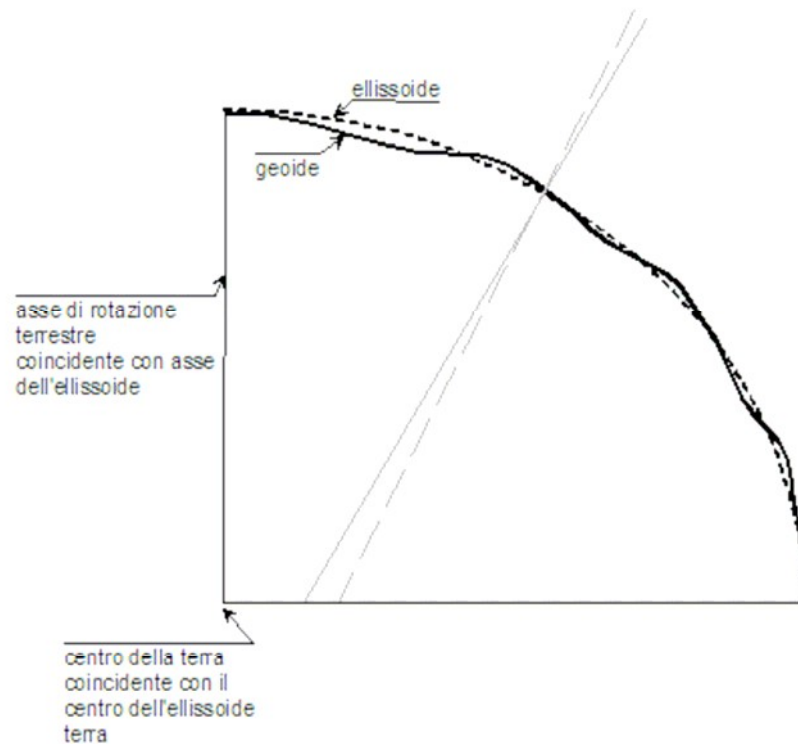
Orientamento ellissoide locale II



L'ellissoide può essere orientato rispetto al geode in modo che non vi sia un punto in cui è garantita la tangenza tra le due superfici, e in cui si abbia la coincidenza tra la verticale geoidica e la verticale ellissoidica, ma si abbia piuttosto una posizionamento reciproca per cui gli scarti tra le due superfici risultino minimi per una vasta estensione di territorio (**orientamento debole o medio**).

La cartografia prodotta proiettando sul piano tale superficie ellissoidica risulterà sufficientemente affidabile per un vasto territorio circostante il punto di contatto, pur non avendo le caratteristiche di precisione tipiche di un sistema geodetico locale con orientamento forte.

Ellissoide geocentrico



L'ellissoide può essere orientato rispetto al geode in modo che vi sia coincidenza tra il centro dell'ellissoide ed il centro di massa del geode, e quindi non sia garantita la tangenza tra le due superfici e non si abbia alcun punto in cui sia imposta la coincidenza tra la verticale geodica e la verticale ellissoidica.

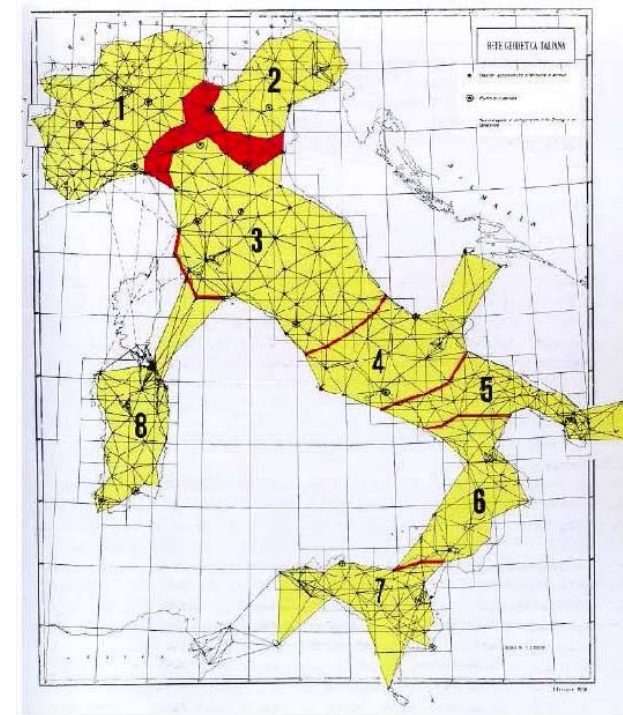
L'**ellissoide geocentrico** risulta il miglior sistema di riferimento per l'intero pianeta (orientamento geocentrico o globale). La cartografia prodotta proiettando sul piano tale superficie ellissoidica, a causa dei maggiori scarti esistenti tra la superficie ellissoidica e quella geodica, risulta relativamente meno precisa, ma è basata su un unico sistema di riferimento per l'intero pianeta. Per la determinazione delle quote è indispensabile studiare gli scarti tra ellissoide e geode (ondulazioni).

Sistemi di riferimento utilizzati in Italia

- Sistema “Roma ante 1940” e catastale
(ellissoide di Bessel, orientamento Genova, Roma, Castanea delle Furie)
- Sistema nazionale Roma 1940
(ellissoide internazionale, orientamento forte Monte Mario)
- Sistema europeo European Datum 1950
(ellissoide internazionale, orientamento debole Potsdam)
- Sistema globale World Geodetic System 1984
(ellissoide geocentrico)
- Sistemi dinamici ITRS e ETRS
(ellissoide geocentrico, realizzazione basata su stazioni permanenti con coordinate variabili nel tempo)

Sistema di riferimento “Roma ante 40” Sistema catastale

- Ellissoide di Bessel
- Orientamento locale in tre punti diversi:
 - Genova
 - Roma
 - Castanea delle Furie (ME)
- Rete di triangolazione compensata 1908-1919
- Proiezione associata: Sanson-Flamsteed policentrica
- Da questo datum utilizzato in Italia tra la fine dell’800 e gli anni Quaranta del ‘900, deriva anche il sistema di riferimento catastale (orientamento a Genova, Istituto idrografico della Marina, def. 1902).



Sistema di riferimento nazionale Roma40

- Ellissoide Internazionale di Hayford (Hayford 1909 / Internazionale 1924)
- Orientamento in corrispondenza dell'Osservatorio Astronomico di Roma Monte Mario
- Rete geodetica basata sulla compensazione 1908-1919 e successivamente trasformata
- Proiezione associata: Gauss-Boaga (Mercatore trasversa in due fusi)



- ellissoide tangente al geoide in corrispondenza dell'osservatorio, ed attribuzione a tale punto delle coordinate geografiche ricavate da misure astronomiche;
- coincidenza nel punto di tangenza, o punto di emanazione, tra la verticale geoidica e la verticale ellissoidica, e conseguente minimizzazione tra le deviazioni della verticale e gli scarti tra superficie geoidica ed ellissoidica su tutto il territorio interessato.

Sistema di riferimento europeo

European Datum 1950 (ED50)

- Ellissoide Internazionale di Hayford (Hayford 1909 / Internazionale 1924)

- Orientamento in corrispondenza dell'Osservatorio Astronomico di Potsdam (Berlino)

- Proiezione associata: Universal Transverse Mercator (Mercatore traversa in 60 fusi)

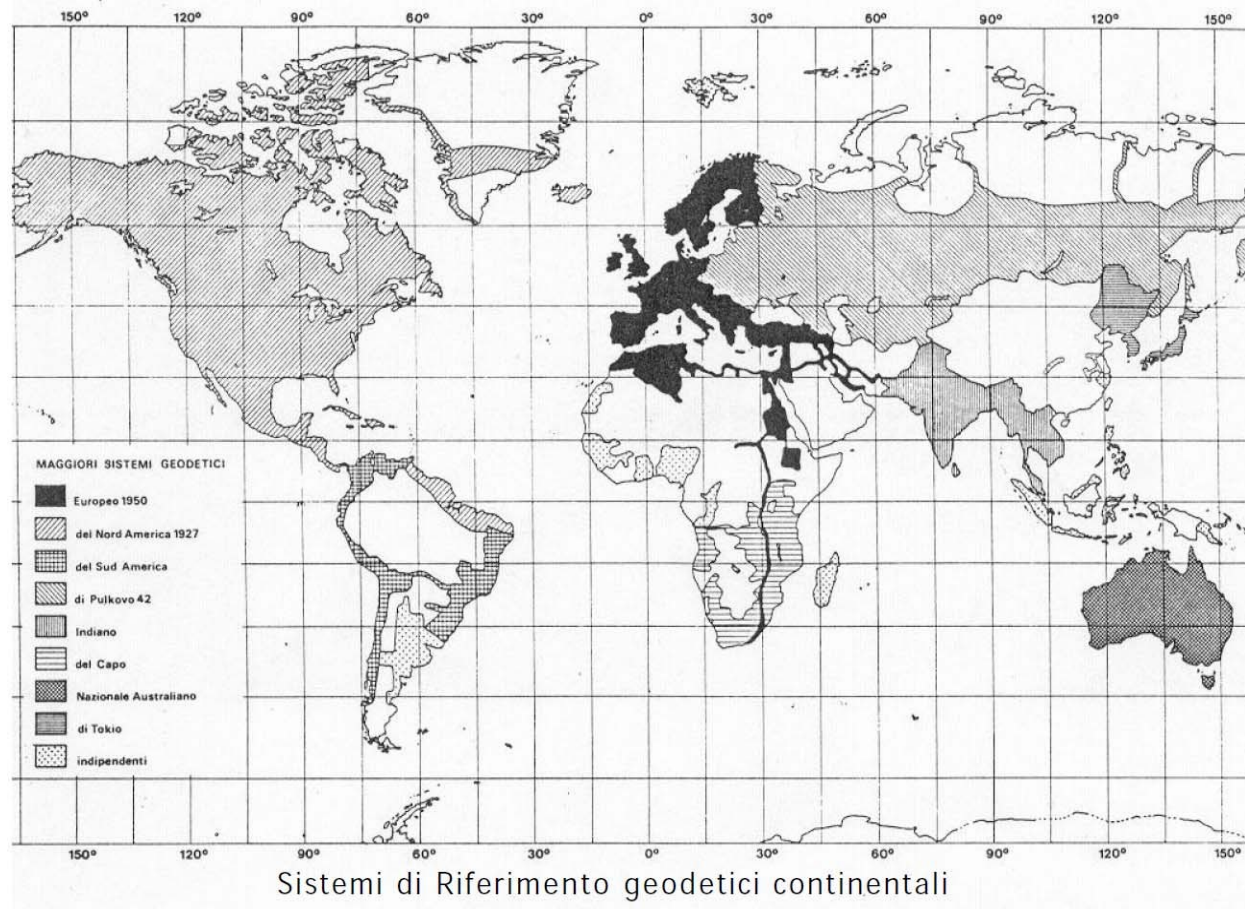


- ellissoide “legato” al geoide in corrispondenza dell'osservatorio, ed attribuzione a tale punto delle coordinate geografiche ricavate da misure astronomiche;
- deviazione della verticale, ovvero scarto tra la verticale geoidica e la verticale ellissoidica, media per tutto il territorio europeo.

Sistema di riferimento continentali

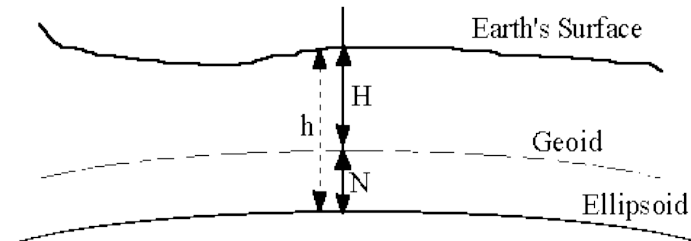
Oggi si sta generalizzando l'impiego di sistemi di riferimento globali, anche per l'utilizzo di sistemi di posizionamento satellitare.

I sistemi di riferimento locale con validità nazionale o continentale sono comunque ancora in uso in molti Paesi. Ne sono stati censiti circa 150 diversi.



Sistema di riferimento globale World Geodetic System (WGS84)

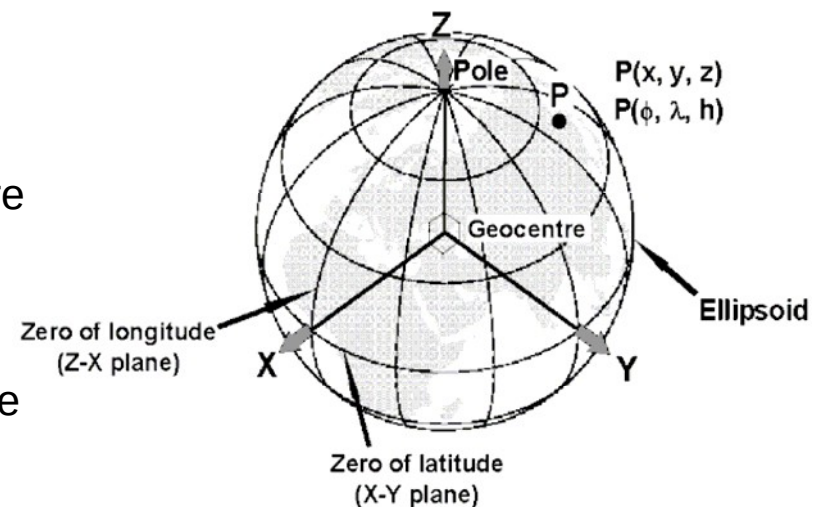
- Ellissoide WGS84
- Geocentrico
- Proiezione associata: Universal Transverse Mercator (Mercatore traversa in 60 fusi)
- Discordanza tra quote geoidiche e quote ellissoidiche e relativa necessità di stimare gli scarti esistenti (ondulazioni)
- Le misure GPS sono riferite al sistema WGS84.



Il sistema WGS 84 si basa su una terna cartesiana di coordinate XYZ:

- origine coincidente con il centro di massa della Terra,
- asse Z coincidente con l'asse di rotazione terrestre
- asse X orientato sul meridiano di Greenwich

La posizione di un punto sulla superficie dell'ellissoide può essere espressa sia in coordinate cartesiane (x,y,z) che in coordinate geografiche (ϕ,λ,h) .



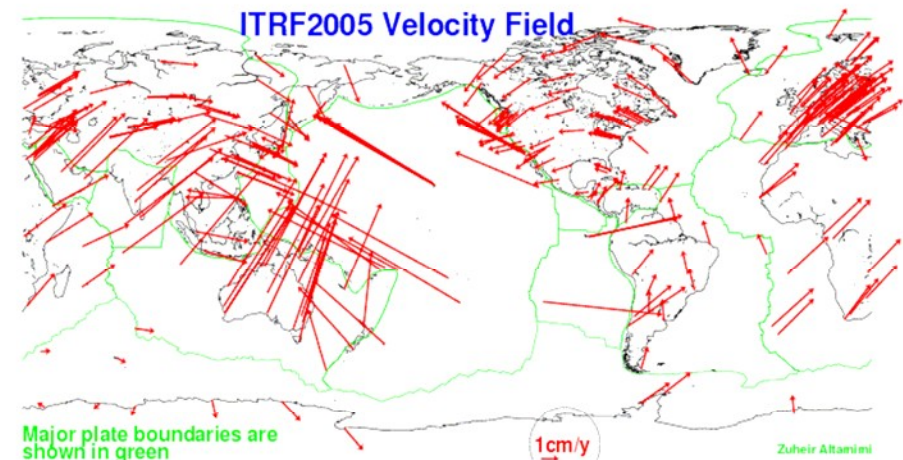
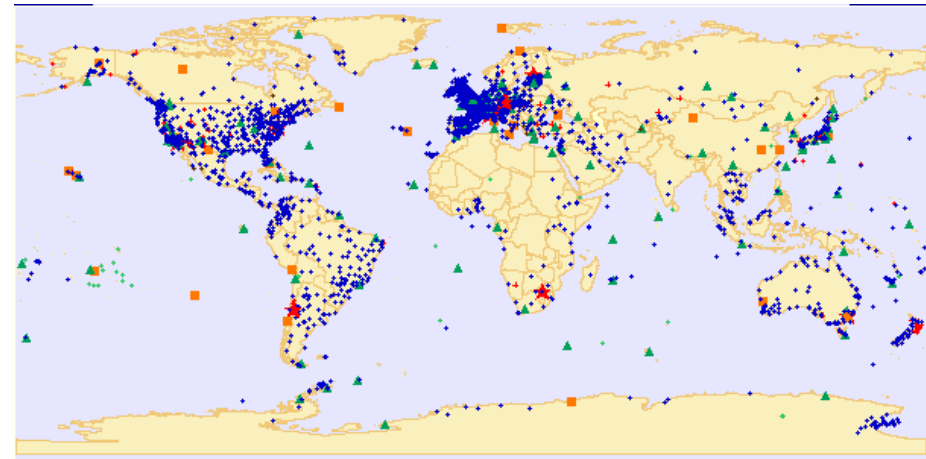
Sistema di riferimento globale

International Terrestrial Reference System (ITRS)

Il sistema WGS84 è costantemente allineato all' International Terrestrial Reference System (ITRS), o meglio ad una sua realizzazione (frame), con scarti di ordine decimetrico.

L'International Terrestrial Reference System (ITRS) è un sistema di riferimento **dinamico**, che prende i movimenti legati alla deriva dei continenti ed è determinato sulla base di una rete mondiale di stazioni permanenti (reti GNSS, VLBI, SLR, e DORIS).

Ogni realizzazione (frame), denominata International Terrestrial Reference Frame *anno* (ITRF $_{anno}$; es. ITRF89), costituisce una soluzione del sistema riferita ad un'epoca determinata.



Sistema di riferimento

European Terrestrial Reference System (ETRS)

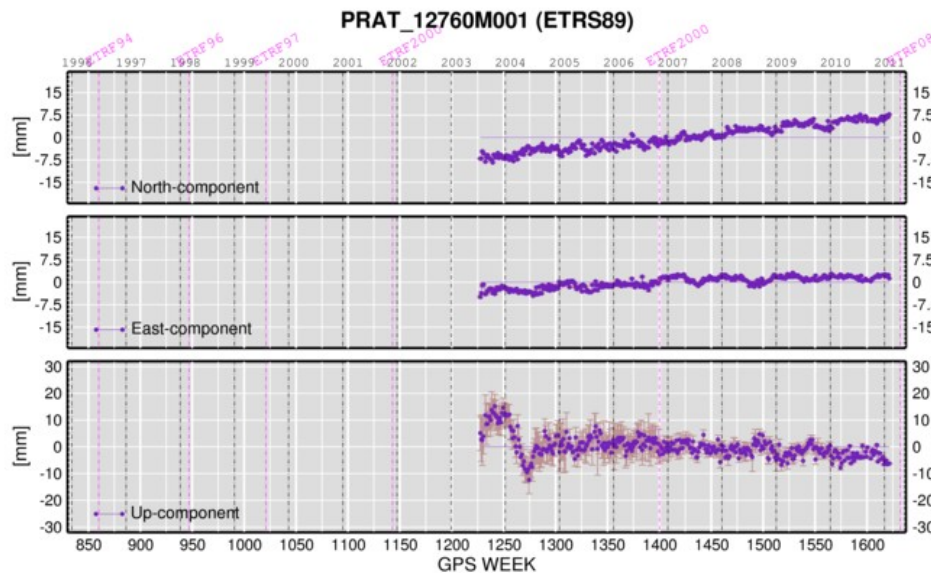
Per il continente europeo, in modo analogo all'ITRS che ha validità quasi esclusivamente scientifica, è stato definito il sistema European Terrestrial Reference System (ETRS).

Si tratta di un datum dinamico, riferito alla realizzazione ITRF89 dell'ITRS, ed è solidale alla piattaforma continentale europea (della quale segue il movimento di deriva).

Le coordinate delle stazioni ETRS sono pertanto molto più stabili nel tempo in quanto sono considerati soltanto i movimenti relativi tra un punto e l'altro all'interno del continente europeo

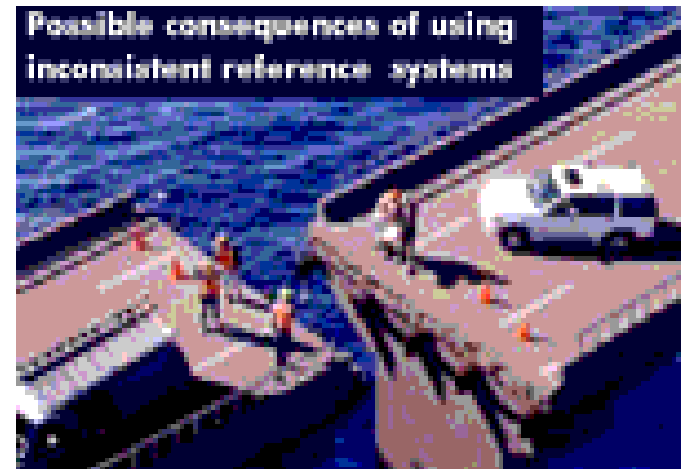
Ogni realizzazione (frame), denominata ETRFanno (es. ETRF89), costituisce una soluzione del sistema riferita ad un'epoca determinata; le più importanti sono ETRF89 e ETRF2000.

La realizzazione italiana dell'ETRS è costituita dalla rete IGM95, che basata sull'ETRF89.



Importanza del datum

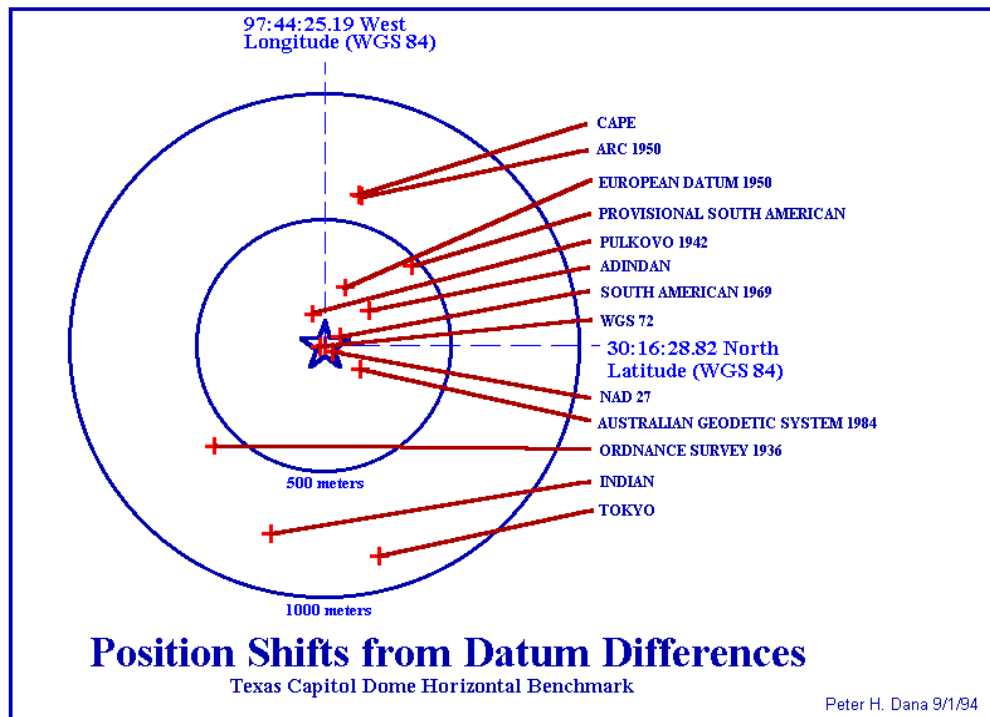
- Punti con le stesse coordinate in datum diversi non necessariamente coincidono
- Lo stesso punto può avere coordinate diverse in datum diversi.



L'esigenza di adottare per tutto il pianeta un unico sistema di riferimento ha spinto l'esercito americano a definire il WGS84 e a costituire la rete di satelliti che lo implementa (GPS – Global Positioning System).

Importanza del datum II

Differenti datum implicano coordinate diverse:



Coordinate di Roma Monte Mario

$$\text{Sistema Nazionale (Roma40)} : \left[\begin{array}{l} \lambda_{\text{Roma M Mario}} = 00^{\circ}00'00'',0 \\ \lambda_{\text{Chocomaib}} = 12^{\circ}27'08'',400 \\ \varphi_{\text{Equatoric}} = 41^{\circ}55'25'',510 \\ E_{\text{OB-F O}} = 1786287.02 \\ N_{\text{OB-F O}} = 4647159.21 \end{array} \right]$$

$$\text{Sistema Europeo (ED50)} : \left[\begin{array}{l} \lambda_{\text{Chocomaib}} = 12^{\circ}27'10'',933 \\ \varphi_{\text{Equatoric}} = 41^{\circ}55'31'',487 \\ E_{\text{OB-F O}} = 1786287.56 \\ N_{\text{OB-F O}} = 4647160.04 \end{array} \right]$$

$$\text{Sistema Mondiale (WGS84)} : \left[\begin{array}{l} \lambda_{\text{Chocomaib}} = 12^{\circ}27'07'',658 \\ \varphi_{\text{Equatoric}} = 41^{\circ}55'28'',051 \\ E_{\text{OB-F O}} = 1786287.92 \\ N_{\text{OB-F O}} = 4647165.35 \end{array} \right]$$

Distanza apparente tra Roma M.M.(WGS84) e Roma M.M.(Roma40): 6.20 m

Distanza apparente tra Roma M.M.(ED50) e Roma M.M.(Roma40): 0.99 m

Distanza apparente tra Roma M.M.(ED50) e Roma M.M.(WGS84): 5.32 m

Rete geodetica



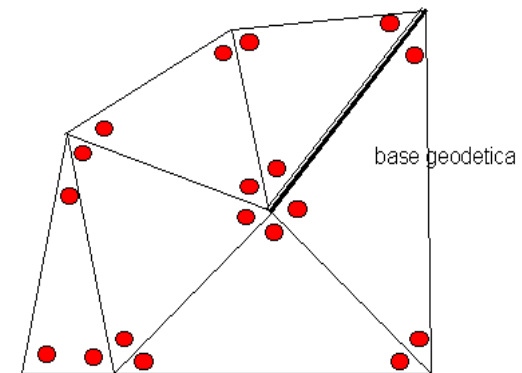
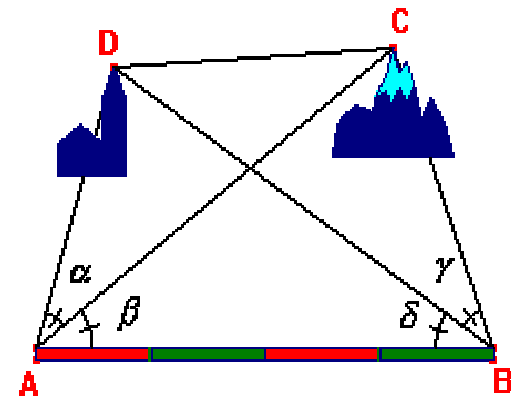
Per le esigenze cartografiche è necessario definire sulla superficie terrestre la posizione spaziale di un notevole numero di punti facilmente individuabili (**punti geodetici**).

L'insieme dei punti geodetici, individuati attraverso il metodo della **triangolazione**, costituisce la **rete geodetica** su cui si basa il disegno topografico.

Rete geodetica II

Per **triangolazione** si intende la procedura geometrica che consiste nella determinazione della posizione di punti prescelti attraverso la misurazione degli angoli formati dalle linee che collegano ciascun punto a quelli circostanti e di alcuni dei lati della serie di triangoli che si viene così a costituire (**basi geodetiche**).

La determinazione della lunghezza delle basi deve essere estremamente precisa perché da esse, per via trigonometrica, vengono calcolate tutte le altre distanze.



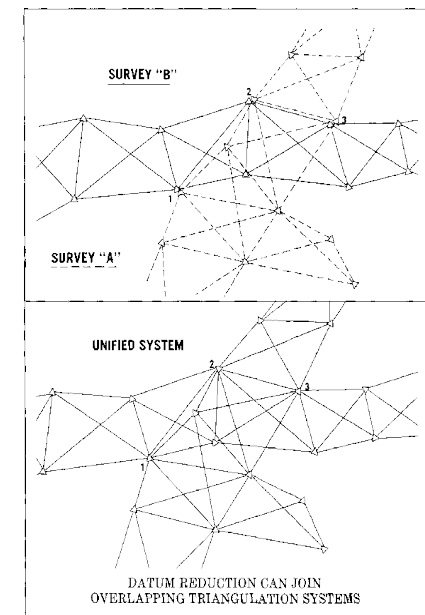
● misura di angolo azimutale
— misura di distanza

Rete geodetica III

L'insieme di punti geodetici misurati con il più alto livello di precisione a partire dalle basi geodetiche costituisce la **rete geodetica di I ordine o fondamentale**.

A causa di errori e tolleranze nelle misurazioni effettuate, le coordinate calcolate per gli stessi punti a partire dalle diverse basi vengono ad avere coordinate differenti (sconnessione tra i triangoli che compongono la rete).

Per ovviare a tale problema è necessario operare una **compensazione** delle misure, in modo da ripartire tra tutti i punti gli errori e le tolleranze di misura, e ottenere per ciascun punto delle coordinate che risultino quelle "statisticamente" più probabili



Rete geodetica IV

A partire dai punti della rete geodetica di primo ordine vengono rilevati con precisioni via via minori altri punti che compongono le reti di II, III e IV ordine.

Errori punti geodetici

I ordine $e = \pm 0",6$

II ordine $e = \pm 1",2$

III ordine $e = \pm 2",0$

In Italia i punti geodetici misurati dall'Istituto Geografico Militare e dagli altri enti che occupano di cartografia (regioni, Istituto Idrografico della Marina) sono oggi circa 20.000 (catalogo <http://www.igmi.org/geodetica/>).

Con l'introduzione del sistema di riferimento WGS84, l'IGM ha costituito una nuova rete geodetica di punti le cui coordinate sono calcolate con il sistema GPS (IGM95).



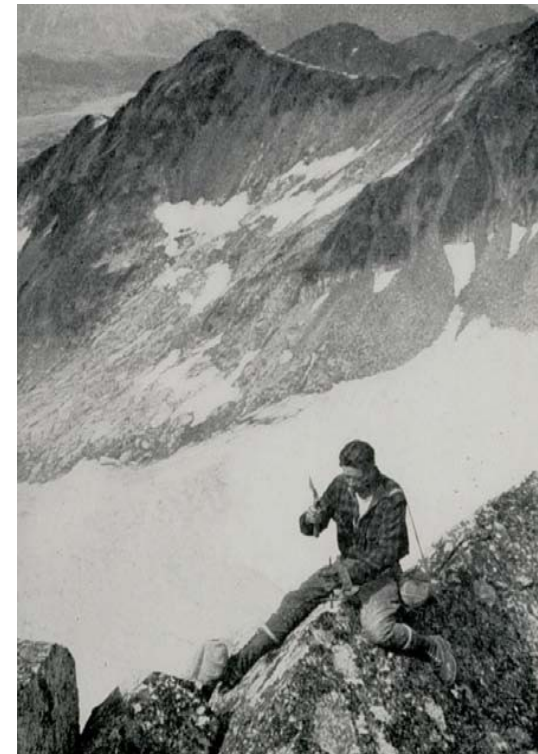
Punti geodetici

- I **punti geodetici**, le cui coordinate sono note con estrema precisione, costituiscono la base dei rilievi topografici attraverso i quali viene costruita la cartografia.
- Per ciascun punto appartenente alle reti trigonometriche è disponibile una **monografia** che contiene, oltre alle sue coordinate e alla sua quota, tutti i riferimenti per una chiara individuazione del punto.

FFFNNN	Comando Regione Militare XXXXXXXX		
	Staz. CC. XXXXXXXX		
	Comune XXXXXXXX	Prov. XXXXXXXX	
	Proprietario XXXXXXXX		
N°	FFFNNN		
	MONOGRAFIA		
	(1954) Belvedere della cascina Asse geometrico del belvedere		
N°	FFFNNN		
	Coordinate geografiche		
	φ	ω	
	43°22'12",563	1°12'43",932	
N°	FFFNNN		
	Coordinate Gauss-Boaga		
	N	E	
	4812585.28	1877949.99	
	4802874.39	2411798.72	
N°	FFFNNN		
	Quota al PP H = 228.43		
N°	FFFNNN		
	PP = Gronda tetto belvedere		
	TRIG. Nome	Ord.	F° N°
	CASCINA BELLINA	IV	FFF ● NNN

Punti geodetici II

- I punti geodetici sono individuati sul terreno mediante **centrini** metallici e spesso protetti mediante appositi manufatti (**pilastrini**).
- I punti geodetici sono ubicati sul terreno, quando possibile, in corrispondenza di punti evidenti (“visibilità” reciproca) e che diano garanzia di stabilità e durata nel tempo (cime di rilievi, campanili, torri, edifici elevati).
- Oltre all’IGM, anche il Catasto e le Regioni gestiscono e effettuano la manutenzione delle reti di vertici geodetici necessari per le proprie esigenze di produzione cartografica.

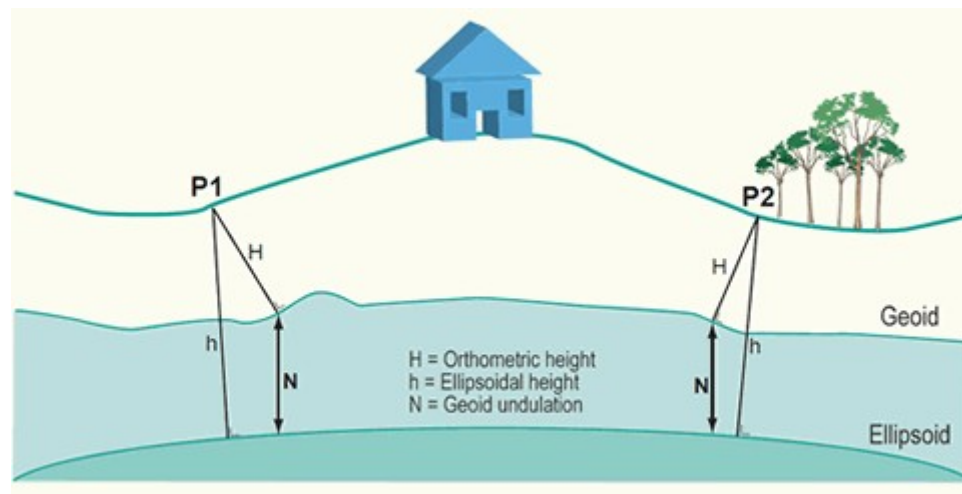


Sistema di riferimento altimetrico I

Analogamente a quanto avviene per la corretta determinazione della posizione planimetrica dei punti è necessario definire una **sistema di riferimento altimetrico (datum verticale)** per la corretta determinazione delle quote.

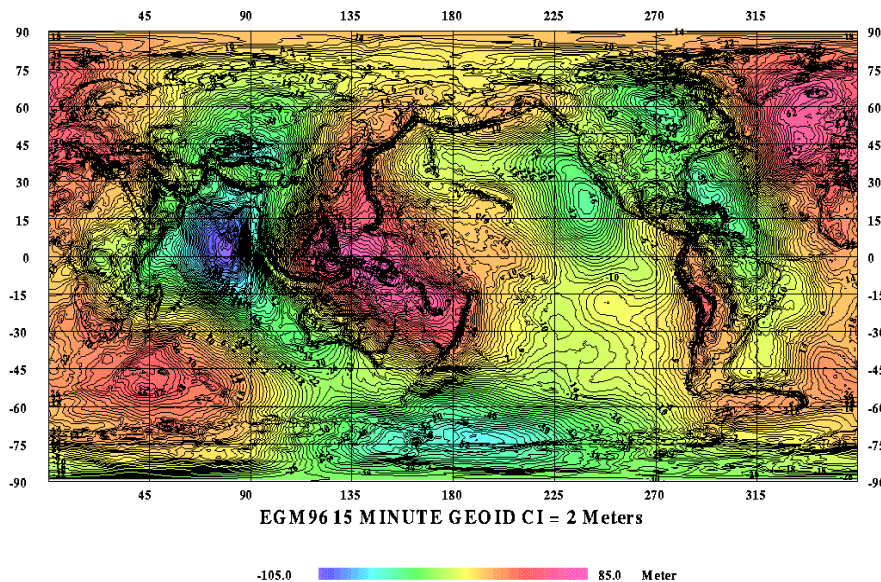
Elemento fondamentale è la determinazione della **quota di base** di riferimento che viene individuata nel livello medio del mare (in assenza di maree) misurato in un determinato punto (**quote ortometriche**).

Nel sistema WGS84 le quote vengono definite come scarti rispetto alla superficie dell'ellissoide geocentrico (**quote ellissoidiche**).



Sistema di riferimento altimetrico II

A partire dalla quota di riferimento viene costruita la **rete di appoggio altimetrica** o **rete di livellazione**.
In Italia la determinazione della quota di base è definita dalle misurazioni effettuate presso l'Istituto Idrografico di Genova.



E' possibile passare dalle quote ellissoidiche a quelle ortometriche (geoidiche) misurando, tramite complesse misure gravimetriche, gli scarti esistenti tra la superficie dell'ellissoide rispetto al geoido.

Bibliografia

J. Campbell, *Introduzione alla cartografia*, Bologna, Zanichelli, 1989 (trad. it. di *Introductory Cartography*, Englewood Cliffs (N.J.), Prentice Hall, 1984), pp. 1-15, 61-77.

S. Perego, *Appunti di cartografia ad uso degli Studenti di Scienze Geologiche e Scienze Naturali*, Parma, Santa Croce, 1999, pp. 6-10, 34-37, 45-46.

L. Surace, *La georeferenziazione delle informazioni territoriali, in L'evoluzione della geografia dalla carta geografica al digitale in nove passi descritti dai maggiori esperti del settore*, Roma, MondoGIS, 2004, pp. 15-46.

M. Trevisani, *Appunti per il corso di Cartografia e Cartografia Numerica*, 2005, <http://sira.arp.at.toscana.it/sira/documenti/Dispensa_Cartografia.pdf> (23/03/2011), pp. 13-34.

P. Zatelli, *Cartografia numerica e GIS, lucidi delle lezioni*, Università di Trento, 2009, <http://www.ing.unitn.it/~zatelli/cartografia_numerica.html> (23/03/2011).

F. Zaffagnini (a cura), *Modulo di geologia. Dispensa del laboratorio di archeologia dell'architettura*, Università di Bologna, <http://www3.unibo.it/archeologia/ArcMed/Forum_testi/Geologia.pdf> (23/03/2011).