



Introduzione alle trasformazioni tra Sistemi di Riferimento

Domenico Sguerso

domenico.sguerso@unige.it

**Laboratorio di Geodesia, Geomatica e GIS
DICAT**

Università degli Studi di Genova

SERVIZIO REGIONALE DI POSIZIONAMENTO GNSS

Sintesi di:

Sistemi di coordinate

Sistemi di riferimento

Principali reti GNSS

Alcune realizzazioni di SR

Trasformazioni tra SR

Obiettivi

si vuole determinare la posizione di punti sulla superficie terrestre

Eseguendo misure sulla superficie terrestre si vuole ricavare la posizione dei punti oggetto di rilievo.

Il problema non è banale sia per:

- dimensioni della Terra;
- la Terra non è un corpo rigido;
- misure eseguite da persone diverse, in tempi diversi e in punti diversi della superficie terrestre.

Qualsiasi tipo di misura che si può effettuare permette di ottenere solo ed unicamente *posizioni relative di punti*

Si devono quindi valutare i gradi di libertà del sistema considerato e bloccare alcune direzioni in modo tale da ottenere **le posizioni assolute** (attraverso etichette o coordinate che identifichino univocamente il punto)

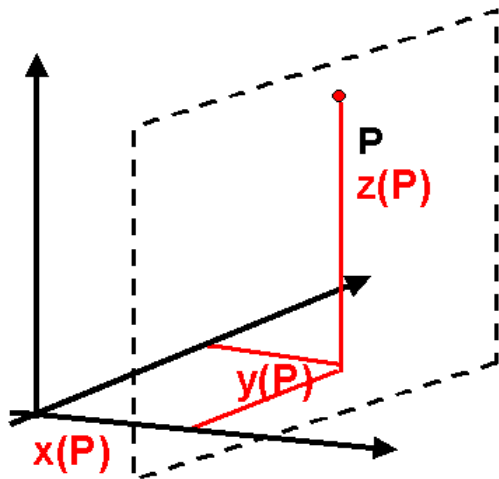
Si affronteranno:

- ➔ - coordinate cartesiane, ellissoidiche, altimetriche e temporali e trasformazioni tra sistemi di coordinate (cenni)
- definizione e "realizzazione" dei sistemi di riferimento
- principali reti GNSS
- principali Sistemi di Riferimento
- cenno alle trasformazioni tra sistemi di riferimento



Sistemi di coordinate

Esempio 1



se fisso 3 assi X, Y, Z

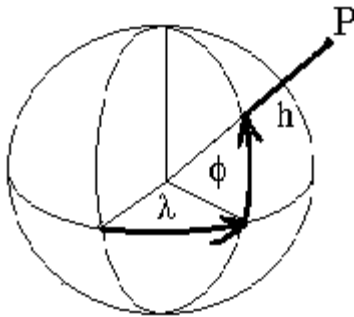
se ho una regola per la rappresentazione delle proiezioni ortogonali



definisco un sistema di *coordinate cartesiane*

regolari in tutto lo spazio,
prive di singolarità

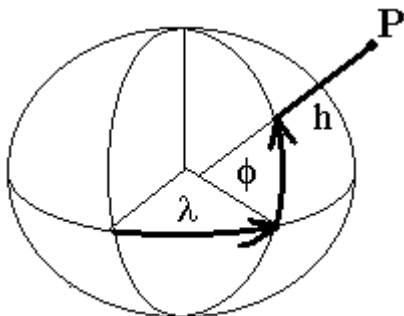
Esempio 2



- se fisso una sfera di raggio dato, un piano passante per il centro (piano equatoriale) e un punto γ sull'equatore
- se ho un modo di rappresentare la normale alla superficie sferica a partire dal punto P

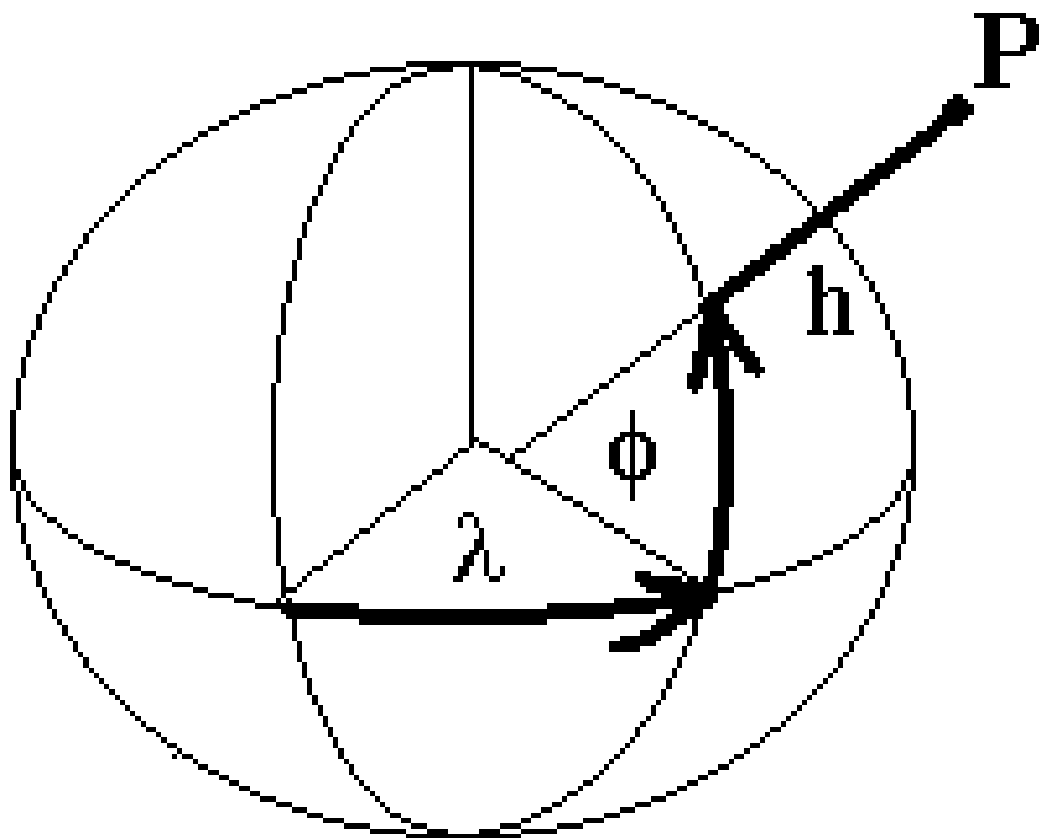
definisco un sistema di *coordinate sferiche*

Esempio 3



se fisso un ellissoide di rotazione di forma data e un punto γ sull'equatore
se ho un modo di rappresentare la normale all'ellissoide

definisco un sistema di *coordinate ellissoidiche* (φ, λ, h)



Linee notevoli:

meridiani $\lambda = \text{cost.}$

paralleli $\phi = \text{cost.}$

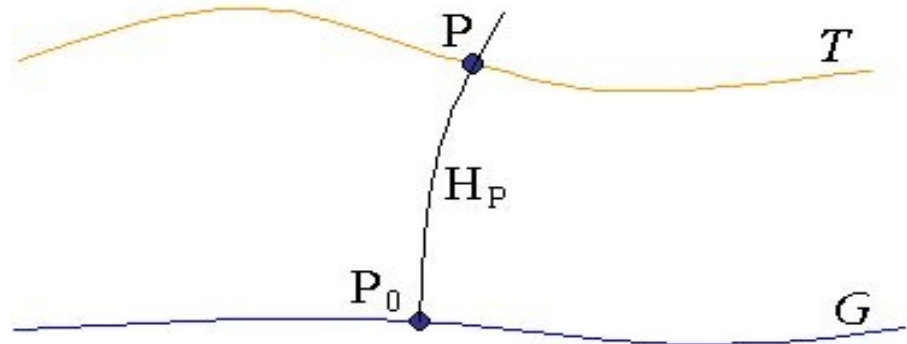
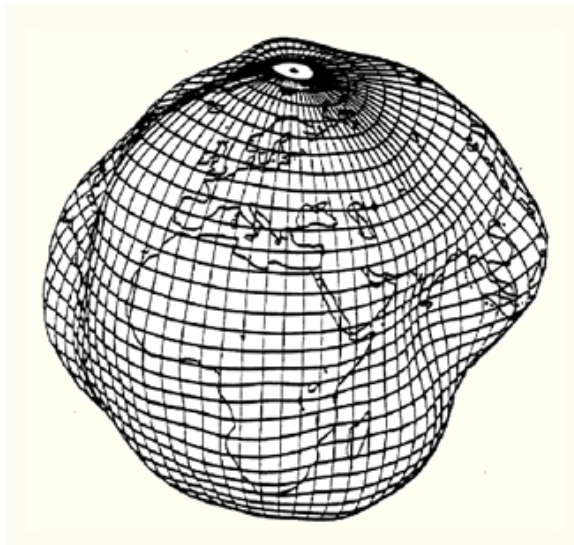
geodetiche: linee di minimo percorso tra 2 p.ti sull'ellissoide

di non semplice descrizione (generalmente linee gobbe, ossia che non appartengono ad un piano)

La coordinata di altezza comunemente impiegata è la cosiddetta **quota ortometrica H** , definita come la "distanza" del punto P dal **geoide** (superficie di potenziale W_0 costante passante per il livello medio del mare), misurata lungo la direzione della forza di gravità \underline{v} .

$H = \text{arco}(P_0P)$

lungo la verticale fino a G



Scale temporali

La stabilità della scala temporale legata al moto della Terra è ormai insufficiente per molte applicazioni, per cui:

Tempo Atomico Internazionale (IAT)

→ definito da un insieme di orologi atomici con origine convenzionale

GPS Time (GPST = IAT – 19 sec)

→ realizzazione dello IAT (origine = ore 0 del 6 gennaio 1980)

Differenza convenzionale tra fusi orari:

Tempo "solare" medio locale ITALIA =

tempo solare medio locale Greenwich (Greenwich Meridian Time)

+ 1 h (→ GPS)

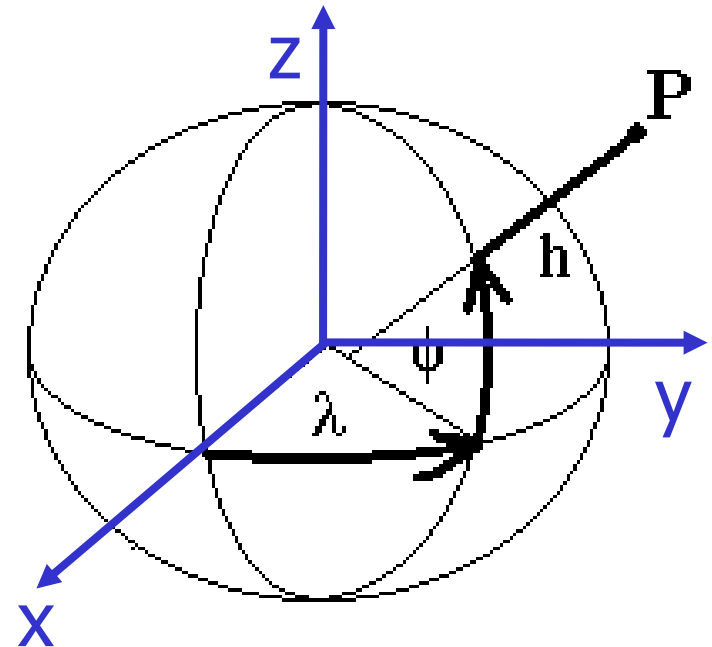
tempo "legale" ITALIA = GMT + 2 h (→ GPS)

Giorno solare medio più lungo del giorno siderale di 3m 55.91s

Trasformazioni tra sistemi di coordinate

Ritornando agli esempi 1 e 3 -coordinate cartesiane ed ellissoidiche-, sarà comodo posizionare un punto attraverso le une o le altre, a seconda dei casi.

Poiché è possibile definire le trasformazioni tra i differenti sistemi di coordinate, dal punto di vista concettuale la scelta di uno o di un altro è principalmente legata a privilegiare quel sistema che garantisca una maggiore semplicità di calcolo.



$$(\phi, \lambda), h \longleftrightarrow (x, y, z)$$

Cambio di S.C.

Ovviamente le quantità legate in modo semplice a quelle cartesiane permettono una maggior facilità di calcolo geometrico, come ad es.:

determinare la distanza (3D) tra 2 punti

$$\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$$

mentre sono meno adatte per la descrizione delle grandezze dipendenti dal campo gravitazionale, come ad es.:

determinare la distanza planimetrica tra 2 punti

Situazione opposta si ha per le coordinate intrinseche.

Si affronteranno:

- coordinate cartesiane, ellissoidiche, altimetriche e temporali e trasformazioni tra sistemi di coordinate (cenni)

➔ - definizione e “realizzazione” dei sistemi di riferimento

- principali reti GNSS

- principali Sistemi di Riferimento

- cenno alle trasformazioni tra sistemi di riferimento



Ogni sistema di coordinate può essere legato alla realtà solo se si eseguono osservazioni che leghino fisicamente gli elementi caratteristici del sistema di coordinate con i punti oggetto di rilievo.

Ma quante sono le informazioni
strettamente necessarie
per fare ciò?

Argomento articolato e complesso da un punto di vista teorico

→ importanza dei concetti

→ applicazioni e procedure pratiche in casi semplici:

2D (manualmente)

3D (ausilio di sw)

Le informazioni strettamente necessarie per "legare" gli elementi caratteristici del sistema di coordinate adottato, ossia per poter attribuire i valori delle coordinate ai punti considerati, dipendono dalle misure effettuate tra i punti stessi della cosiddetta rete topografica o geodetica.

"Rete topografica/geodetica" insieme di punti connessi tramite misure

Gradi di libertà [g.l.] intesi dal punto di vista della Meccanica analitica:
un corpo nello spazio ha 6 g.l.

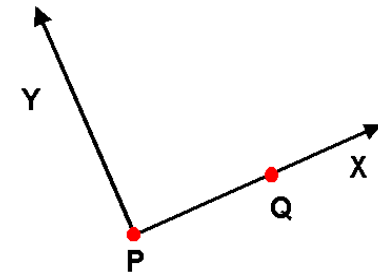
Esempi di vincoli "opportuni":

- Rete altimetrica 1 g.d.l. bloccare 1 solo "parametro opportuno"
→ quota di un punto o baricentro = cost
- Rete planimetrica 3 g.d.l. bloccare 3 "parametri opportuni"
→ es. 2 coordinate di un punto ed
1 di un secondo p.to
- Rete spaziale 6 g.d.l. bloccare 6 "parametri opportuni"
→ es. 3 coordinate di due punti e
la quota di un terzo p.to

Le regole attraverso le quali si sono dettate le condizioni per localizzare un sistema di coordinate nello spazio, forniscono la:

“definizione” del Sistema di Riferimento

La “definizione” (a tavolino) di un S.R. occorre sia concretizzata.



Come?

Similmente all'esempio 2D nel quale il S.C. poteva essere localizzato attraverso l'imposizione di alcune coordinate, così è possibile anche nel caso 3D concretizzare il Sistema di Riferimento fissando le coordinate di alcuni punti opportuni.

Si ottiene così la:

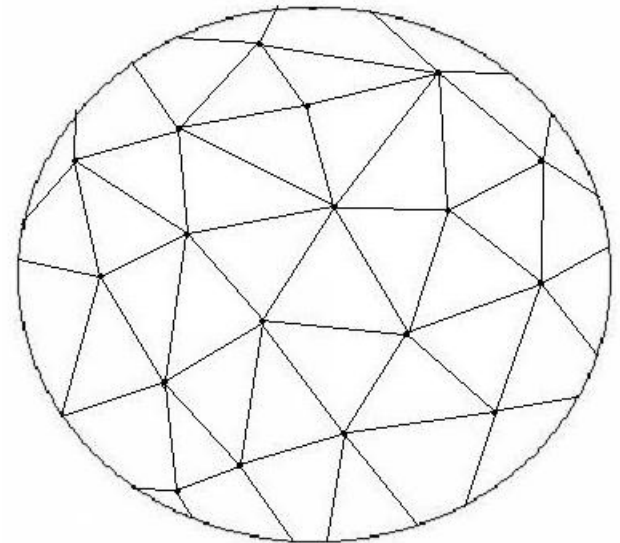
“realizzazione” del Sistema di Riferimento

Grazie alla scelta di alcuni punti fisicamente identificati, alle loro coordinate e ad un numero minimo di osservazioni, è possibile determinare gli elementi caratterizzanti il S.R., ottenendone così il cosiddetto "orientamento".

La realizzazione dell'orientamento avviene in realtà introducendo un numero largamente ridondante di punti e di osservazioni geodetiche di vario tipo a livello sovra-continentale, distribuite sulla terra.

Le "regole" inizialmente adottate per la "definizione" del sistema di riferimento, sono state quindi attuate attraverso campagne di misura tra punti che lo concretizzano; si parla pertanto di "realizzazione" del sistema di riferimento.

Per questo motivo il termine "datum", rappresentante l'insieme di osservazioni o misure utili a realizzare un Sistema di Riferimento, è spesso utilizzato come sinonimo di una realizzazione di S.R.

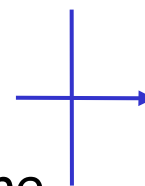


Realizzazioni differenti S.R. (che implicitamente lo definiscono):

osservazioni con differenti → reti

→ strumentazioni

→ periodi d'osservazione



≠ S.R. per

≠ campagne oss.

L'unità di misura delle lunghezze, si blocca attraverso:

→ *un campione di unità di lunghezza*

oppure attraverso

→ *la misura di una "base" tra due punti*

Esempio: la cartografia nazionale "nasce" con 8 sotto-reti geodetiche dimensionate ciascuna a partire da una "base" misurata; ogni sotto rete definisce quindi un diverso S.R.

→ differenti S.R. per differenti campagne d'osservazione

La Terra non è un corpo rigido, per cui le coordinate delle stazioni "permanenti" variano nel tempo:



ogni S.R. deve essere periodicamente "aggiornato"

Per applicazioni di elevata precisione alle "etichette" delle coordinate vanno affiancate le velocità di spostamento del punto

Es.: movimenti delle placche tettoniche fino a 7cm/anno !

Generalmente le sigle dei sistemi di riferimento riportano l'etichetta relativa all'anno delle osservazioni

Riassumendo

Scelta di un S.C.

- arbitrario
- convenzionale
- che abbia anche significato fisico (non solo geometrico)

Come riferire il S.C. alla Terra?

→ **Definizione di S.R.**

attraverso regole utili a definire univocamente la posizione di un punto nello spazio 3D (3 numeri) [semplice]

→ **Realizzazione del S.R.**

difficile applicazione di tali regole a causa delle dimensioni della Terra, quindi:

scelta di punti / materializzazione / etichette di coord.

osservazioni geodetiche tra i punti per

ricavare a posteriore i parametri del S.R.

quali origine e orientamenti



realizzazione (che implicitamente definisce) il S.R.

Si affronteranno:

- coordinate cartesiane, ellissoidiche, altimetriche e temporali e trasformazioni tra sistemi di coordinate (cenni)
- definizione e "realizzazione" dei sistemi di riferimento
- ➔ - principali reti GNSS
- principali Sistemi di Riferimento
- cenno alle trasformazioni tra sistemi di riferimento



**Le reti sono il punto di “contatto” tra il S.R. e l’utente
permettendo la “realizzazione” del S.R.**

Si passa da punti fisici (marker)
a punti “elettronici” (centri di fase delle antenne GPS)

Reti GNSS

L'avvento della tecnologia satellitare permette la connessione di punti tra loro non intervisibili, anche notevolmente distanti.

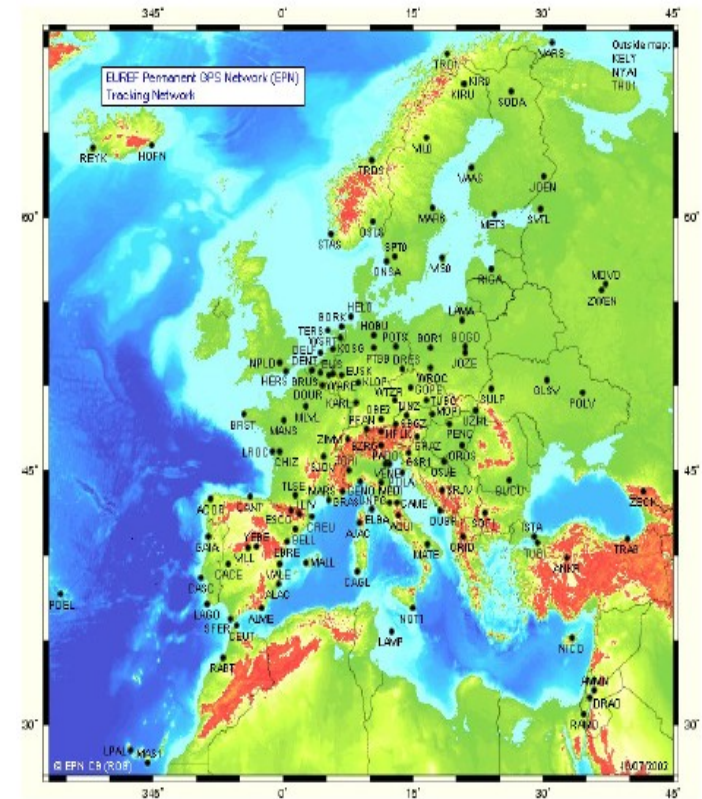
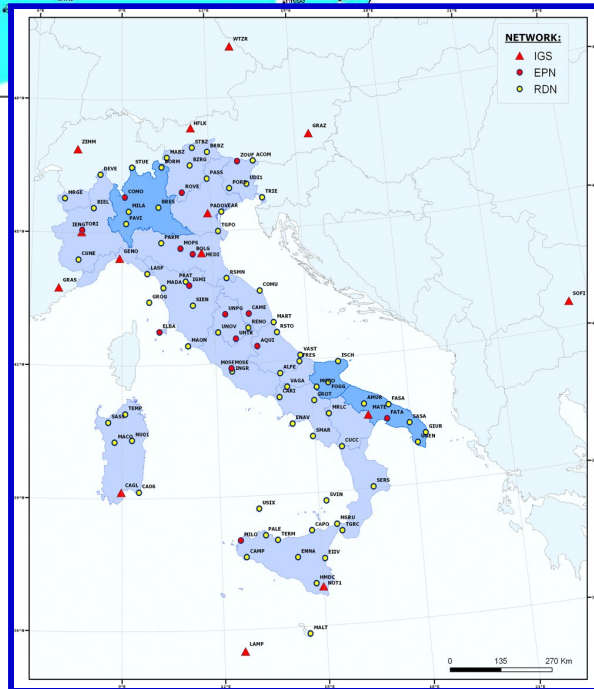
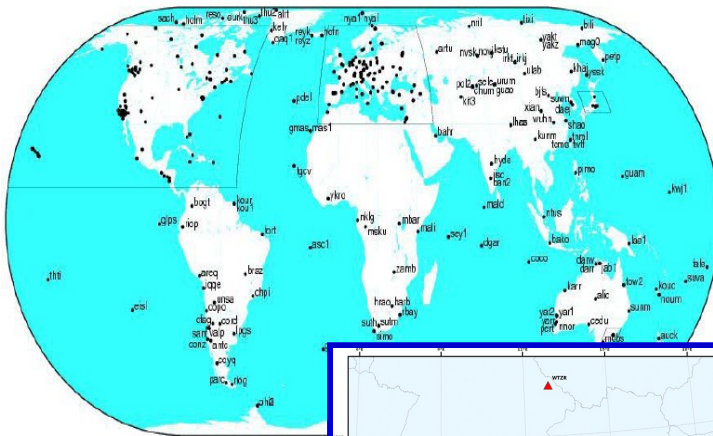
I vertici delle reti possono pertanto essere materializzati nei siti di maggiore interesse, rilevati attraverso campagne di misura con precisioni centimetriche.

Le reti GNSS sono la realizzazione 3D (plano-altimetrica) del S.R. in riferimento all'ellissoide di rotazione adottato.

N.B.: la realizzazione altimetrica è slegata dal campo di gravità.

Reti su scala globale (IGS), continentale (EUREF), nazionale (RDN) necessarie per:

- il mantenimento del sistema di riferimento
- lo studio della geodinamica
- la definizione di standard per la realizzazione di reti di SP



offrono servizi globali e non locali

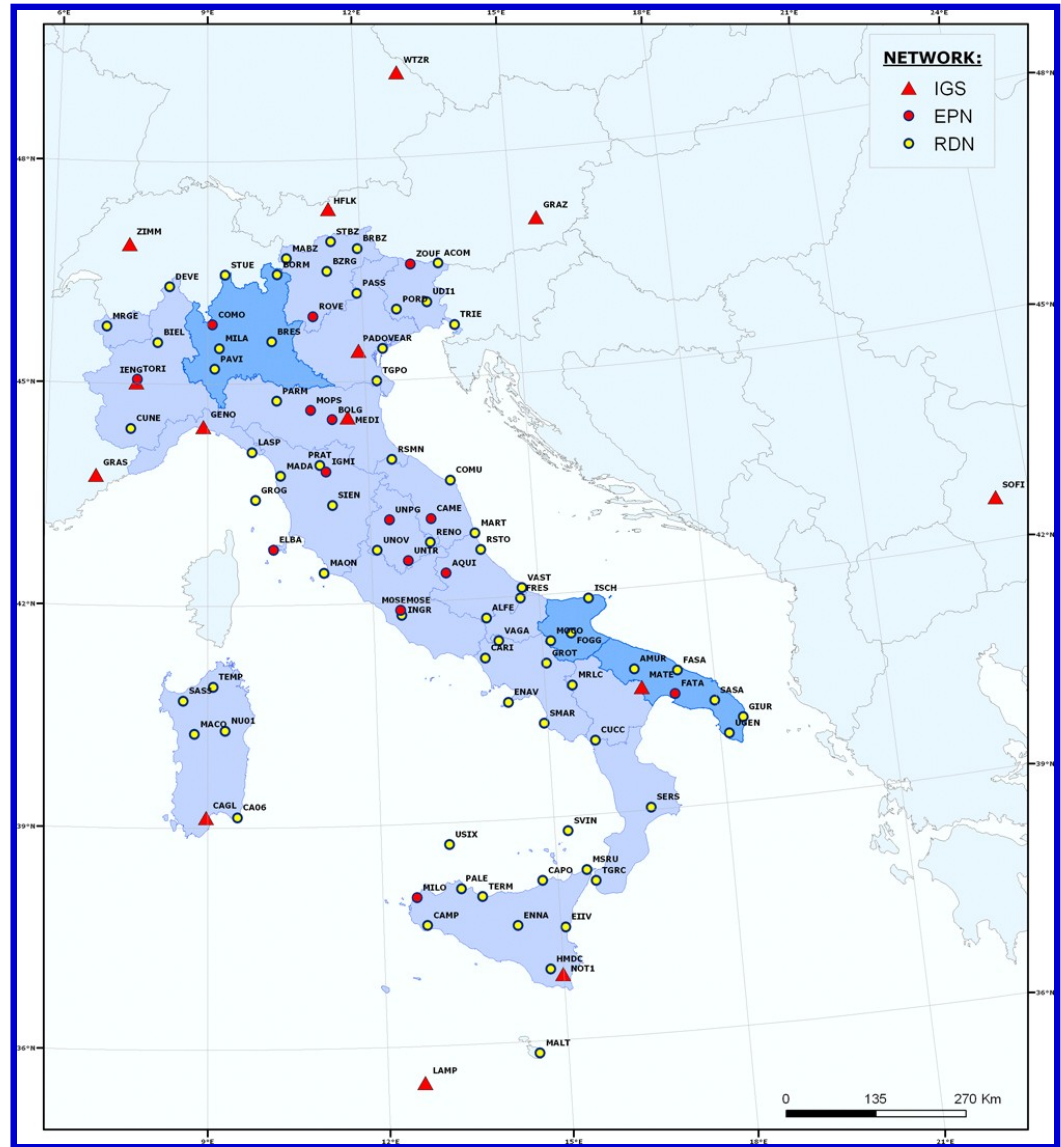
La nuova rete IGM: RDN (Rete Dinamica Nazionale)

99 stazioni
di cui 13 stazioni IGS

monumentate
permanentemente,

ma non connesse
permanentemente;

Rete permanente nazionale
di ordine 0
a partire dal 1 gennaio 2009



Si affronteranno:

- coordinate cartesiane, ellissoidiche, altimetriche e temporali e trasformazioni tra sistemi di coordinate (cenni)
- definizione e "realizzazione" dei sistemi di riferimento
- principali reti GNSS
- ➔ - principali Sistemi di Riferimento
- cenno alle trasformazioni tra sistemi di riferimento



World Geodetic System 84 (WGS84)

Ellissoide (WGS84)

parametri geometrici:

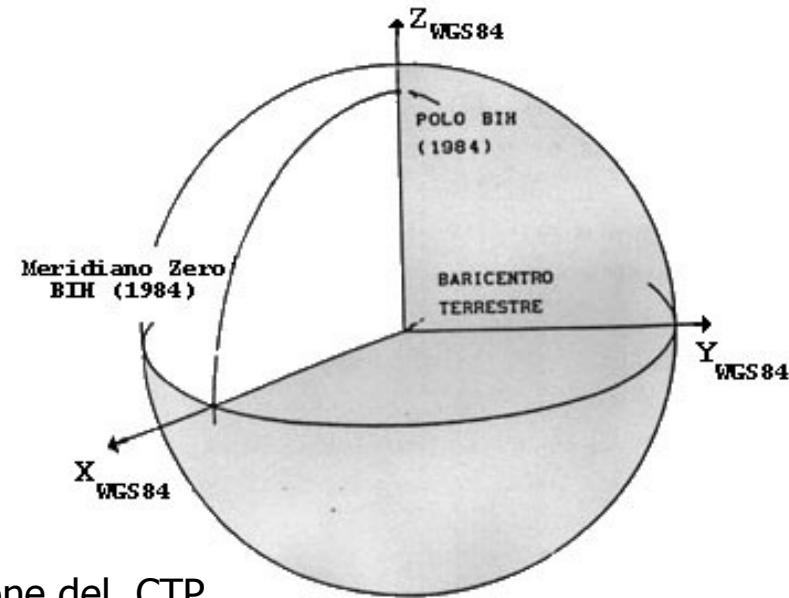
- semiasse equatoriale
 $a = 6\,378\,137 \pm 2 \text{ m}$
- flattening = $(a - b) / a$
 $f = 1 / 298.257\,223\,563$
(b semiasse polare)
[$e^2 = 1 - (1 - f^2)$]

Orientamento geocentrico:

Asse Z per il baricentro terrestre e parallelo alla direzione del CTP definito dal BIH per l'epoca 1984

Asse X intersezione del piano meridiano di riferimento, definito dal BIH-1984, e dal piano equatoriale ortogonale a Z

Asse Y completa una terna ortogonale destrorsa



E' formalmente definito come ITRS,

ma è realizzato mediante una rete di stazioni di controllo del NIMA.

Negli ultimi 40 anni anche le realizzazioni del WGS84 si sono evolute in funzione dei dati e delle informazioni disponibili; attualmente siamo alla realizzazione WGS84(G1150).

Il WGS84 è realizzato con minore precisione dell'ITRF:

la coerenza fra i 2 SR è di alcuni centimetri.

E' comunque un SR fondamentale, perché è il SR in cui vengono calcolate e fornite all'utenza le orbite dei satelliti GPS.

ITRFxx

realizzazione all'anno xx del ITRS

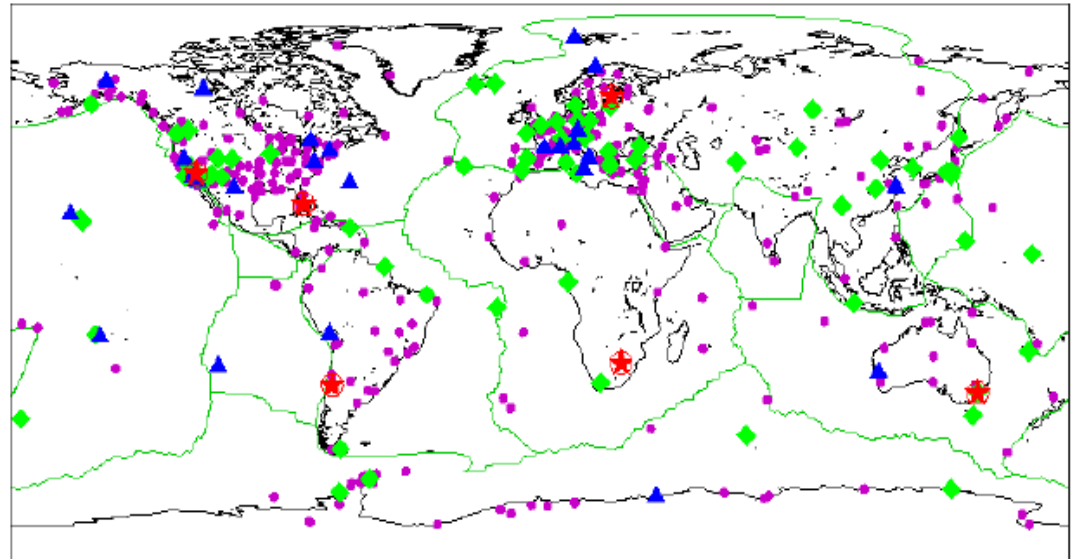
ITRFxx (IERS Terrestrial Reference Frame xx)

È sviluppato dallo IERS (International Earth Rotation Service), tiene conto delle coordinate e delle velocità dei vertici delle reti mondiali VLBI (Very Long Baseline Interferometry), SLR (Satellite Laser Ranging), LLR (Lunar Laser Ranging), DORIS (Doppler orbitography and radiopositioning integrated by satellite) e GPS all'anno xx

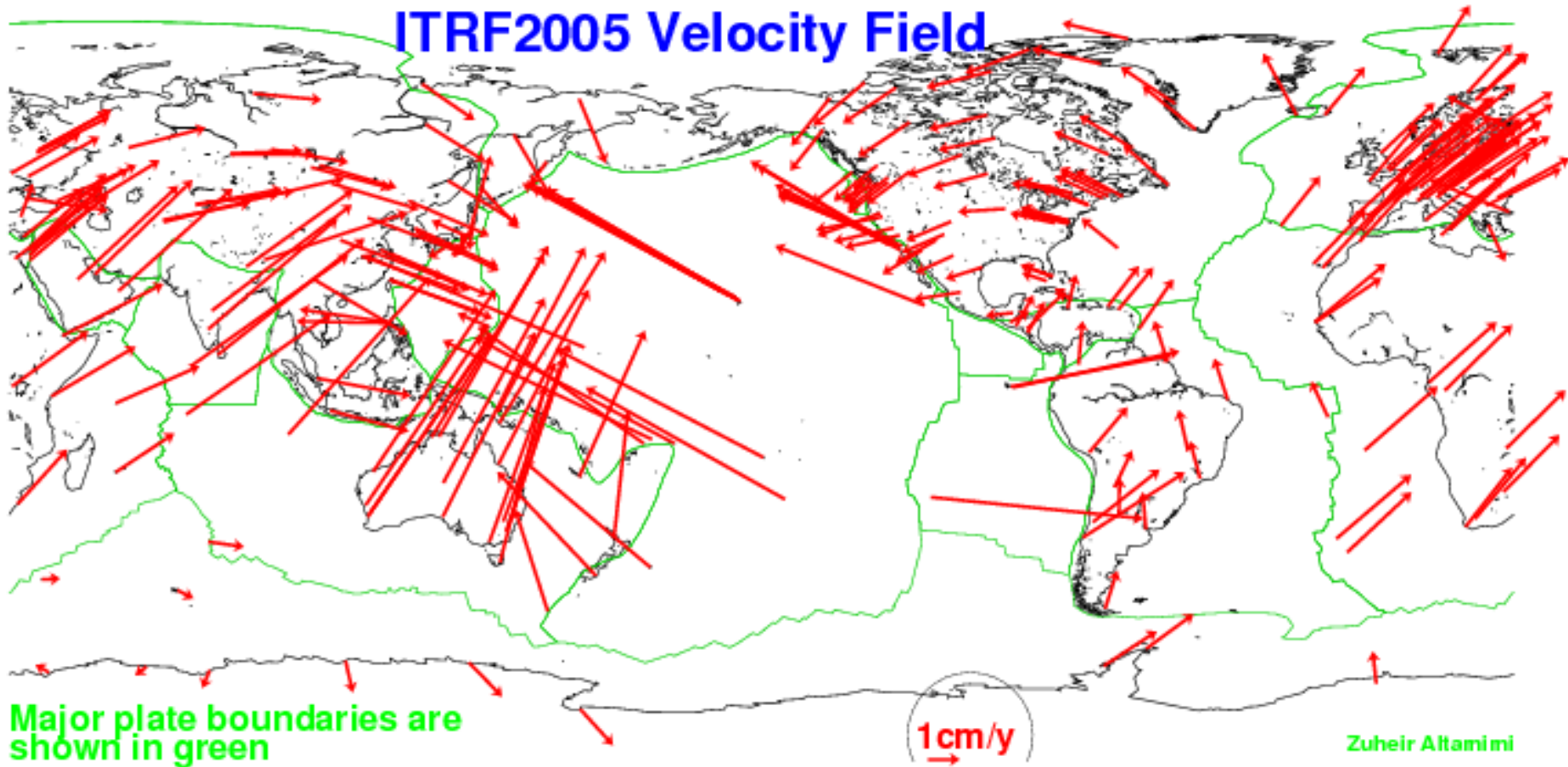
ITRF89, ..., ITRF97, ITRF2000.

Una realizzazione di ITRS (ITRF) consiste nel catalogo delle coordinate delle Stazioni Permanenti che hanno contribuito alla soluzione

Nell'immagine, le SP utilizzate nella soluzione ITRF2000



ITRF2005 Velocity Field



Movimenti delle placche tettoniche fino a 7cm/anno!

IGSxx → IGS05

Realizzazione GPS dell'ITRS, curata da IGS (International GNSS Service, <http://igscb.jpl.nasa.gov>) per migliorare la consistenza interna non garantita da ITRFxx [in quanto integrazione di diverse misure (VLBI, LLR, SLR, GPS e DORIS)]

- di precisione non paragonabile all'ITRF, ma introdotto come supporto alle sole misure GPS, in quanto intrinsecamente più coerente
- si basa su rete di stazioni permanenti GPS "di qualità", selezionate da IGS

ETRF89, ETRF2000, (ETRF2005) **realizzazioni europee dell'ITRF**

Viene così definito il **SR Europeo ETRS89**

di cui esistono diverse realizzazioni:

- la prima è ETRF89

N.B.: ETRF89 è un raffittimento europeo di ITRF89

N.B.: IGM95 è una rete che "materializza" a livello nazionale l'inquadrimento di ETRF89; le coordinate dei vertici IGM95 sono perciò nel Sistema di Riferimento ETRF89

Da ETRF89-IGM95 . . .

Geodinamica media italiana dal 1989 ad oggi:

traslazioni planimetriche di circa 40 cm rispetto a ITRS + cedimenti locali ...

Si è resa necessaria la transizione dalla realizzazione statica ETRF89-IGM95 a una rete continuamente monitorata, ossia a una rete permanente nazionale chiamata di ordine zero.

. . . al sistema di riferimento ufficiale italiano: ETRF2000-2008.0 materializzato dalla RDN

ETRF2000-2008.0 ossia ETRF2000 al 01.01.2008 è il S.R. ufficiale nazionale a partire dal 1 gennaio 2009.

Tutte le coordinate (incluso ad es. vertici IGM95) sono da trasformarsi in tale sistema.

Perché ETRFxx? Perché si lega alle traslazioni della placca, evitando frequentissimi aggiornamenti delle coord. a fini monografici/cartografici

RIEPILOGO dei principali SR geocentrici e loro realizzazioni

ITRFxx: non garantisce massima coerenza con i prodotti IGS utilizzati per la compensazione, fornisce coordinate e velocità riferite all'anno xx e propagate linearmente

IGSxx: garantisce auto-consistenza per l'impiego di elevata precisione GPS con soluzioni a lungo termine o serie settimanali di coordinate

ETRF2000: è una realizzazione statica di ITRF, solidale al moto medio della placca europea (quindi non consistente con prodotti IGS)

La prima realizzazione è stata ETRF89

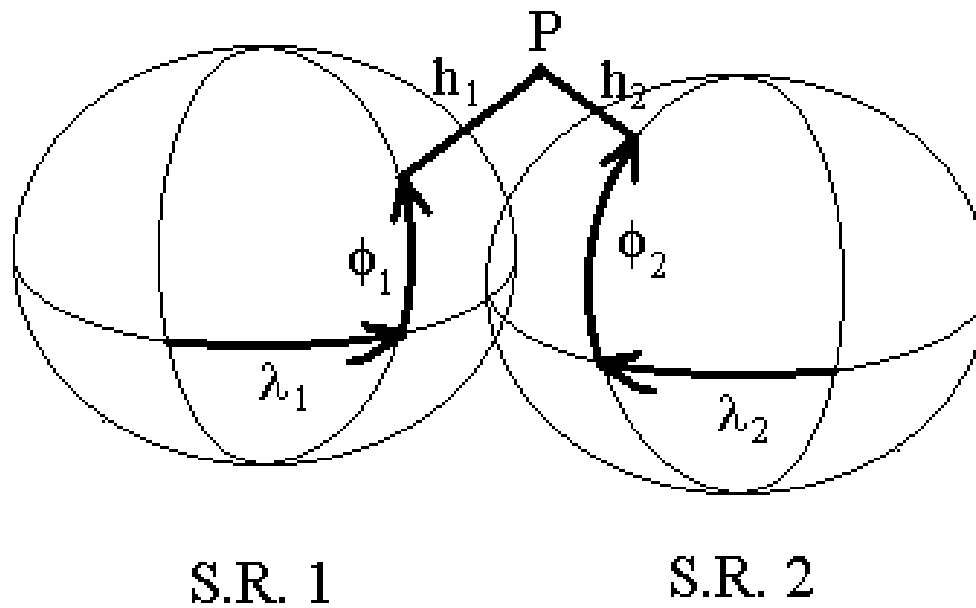
L'Italia dal 01.01.2009 ha S.R. → ETRF2000 epoca 2008.0

Si affronteranno:

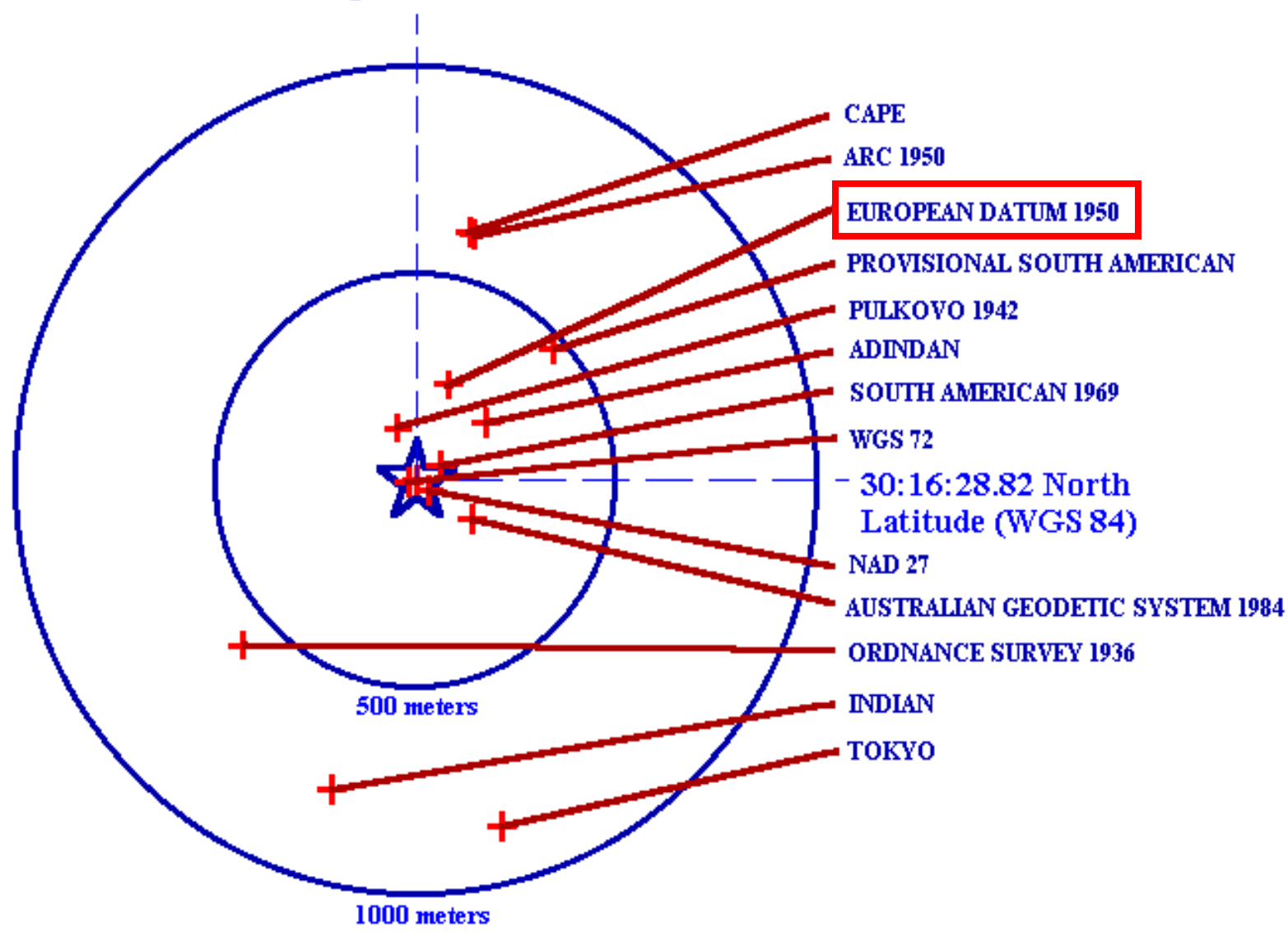
- coordinate cartesiane, ellissoidiche, altimetriche e temporali e trasformazioni tra sistemi di coordinate (cenni)
- definizione e "realizzazione" dei sistemi di riferimento
- principali reti GNSS
- principali Sistemi di Riferimento
- ➔ - cenno alle trasformazioni tra sistemi di riferimento



Un punto P
“posizionato” secondo diversi S.R.
avrà differenti coordinate



97:44:25.19 West
Longitude (WGS 84)



Position Shifts from Datum Differences

Texas Capitol Dome Horizontal Benchmark

Differenze tra S.R.:

- dimensioni ellissoidi di rotazione
- orientamento (localizzazione spaziale)

Trasformazione tra S.R.:

la trasformazione dovrà "accoppiare" le proiezioni dei punti dei 2 differenti S.R.

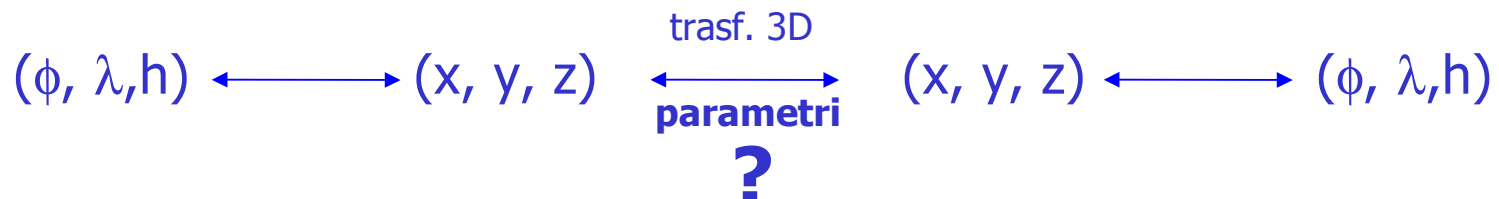
Esempio: → ellissoidi di pari dimensioni

→ realizzazioni "perfette" (prive di distorsioni)

la trasformazione che "mappa" due corpi (rigidi e di pari forma) nello spazio, è descrivibile da una:

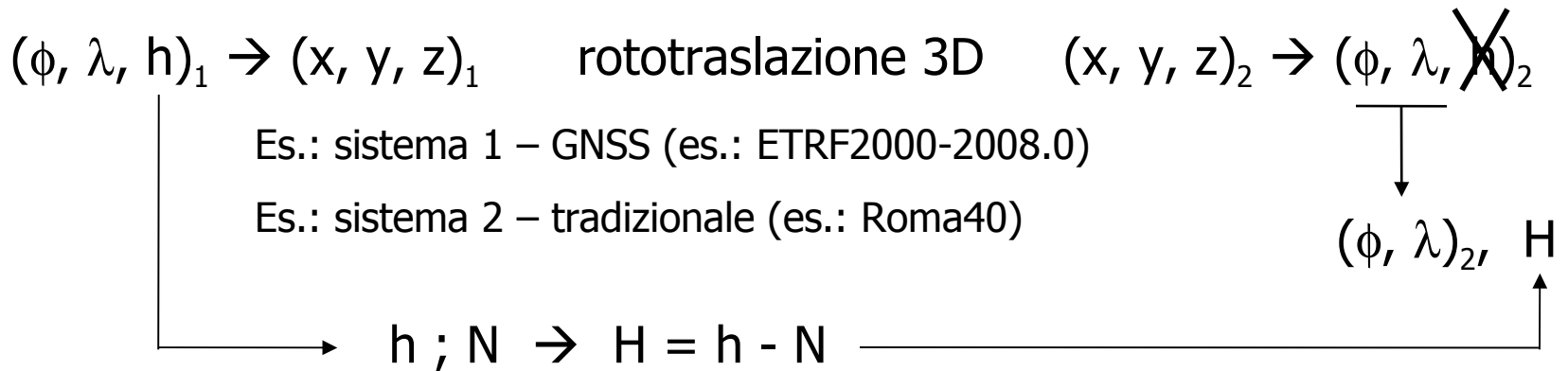
roto-traslazione 3D

La trasformazione è semplice solo in coordinate cartesiane

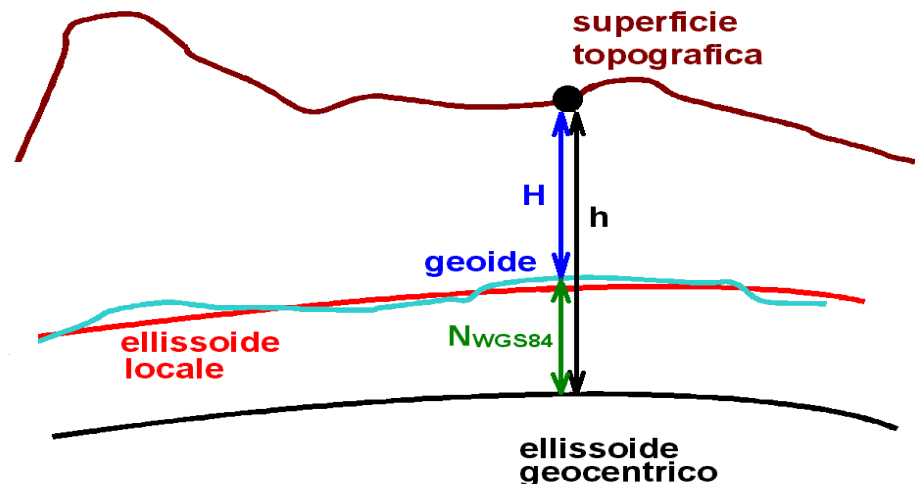


Osservazione:

in generale la trasformazione è 3D ma l'informazione altimetrica finale proviene dalla conoscenza delle ondulazioni del geoide:



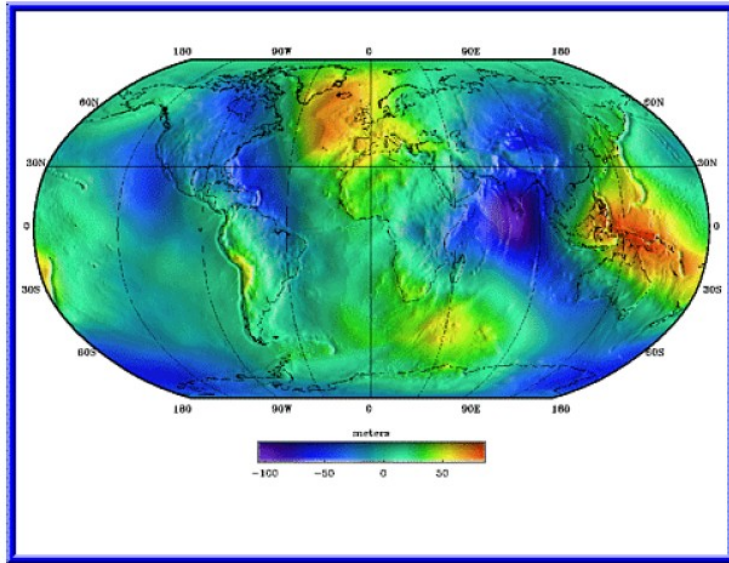
Il GPS ha reso disponibili le osservazioni delle "altezze ellissoidiche" (quantità prettamente geometriche) che, con le ondulazioni del geoide, forniscono H:



[Nitalgeo05 \[IGM \(IGeS\)\]](#)

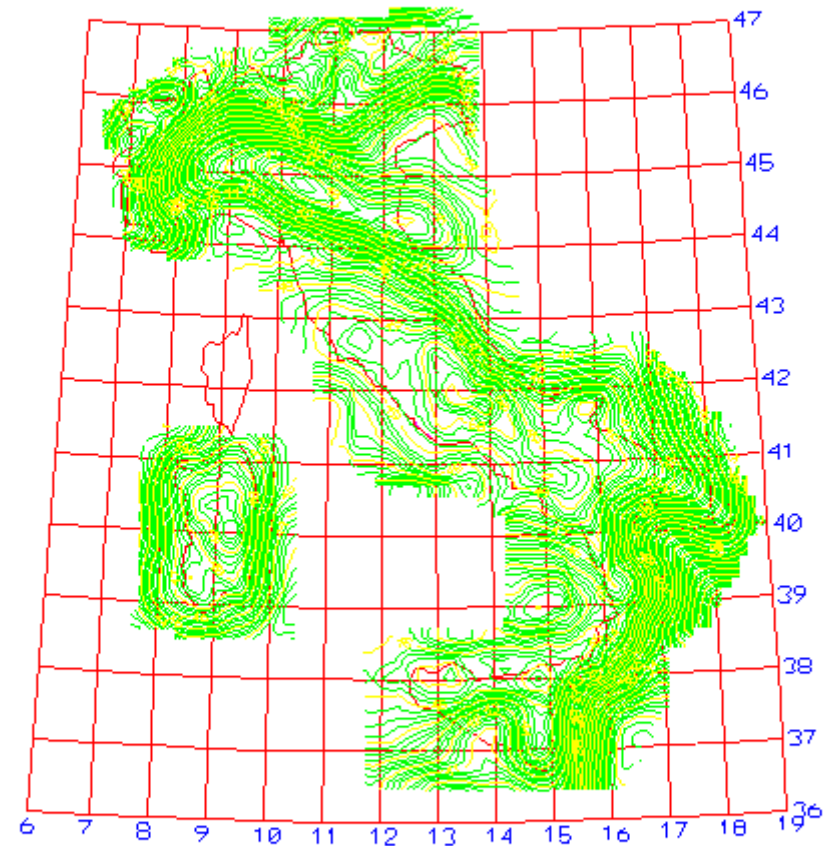
- H → quota ortometrica legata al campo di gravità perché distanza (lungo la verticale-filo a piombo) dal p.to P alla sup. equipotenziale di riferimento (es. th. Bernoulli)
- h → quota ellissoidica che rappresenta la distanza (lungo la normale all'ellissoide) dal p.to P alla sup. ellissoidica (di riferimento)
- N → MAI trascurabile ± 100 m !!!
(es. in Italia assume valori tra +35 m e +55 m con variazioni anche di 60-80 cm in soli 7 km in pianura padana !)
- "ondulazioni del geoide" stimate per punti a partire da campagne di misure di gravità (IGeS → oggi Italgeo05 → IGM)

Modelli di ondulazione del geode



Ondulazione del geode secondo il modello globale EGM96, dal sito:
<http://cddis.gsfc.nasa.gov/926/egm96/egm96.html>

L'ondulazione del Geode in Italia
(unita' in metri)



Proiezione di Gauss
scala media 1:2500000

Verto3k – IGM

www.igmi.org → Servizio Geodetico → Sw Geodetico

Software e relativi set di parametri per le trasformazioni 3D utili a:

- trasf. planimetrica tra ETRFxx, Roma40,ED50
- trasf. altimetrica con "griglie" di ondulazioni geoidi ITALGEO2005 per le trasformazioni del datum altimetrico tra WGS84 e stima del geoidi italiano (± 0.04 m)

Conversioni ufficiali

The screenshot shows the Verto2 software interface, version 1.4, developed by the Istituto Geografico Militare in August 2003. The interface is divided into several sections:

- Header:** Verto2 logo and version information.
- Work Area (Zona di lavoro):** Shows a file explorer with a directory structure (C:\Programmi\Verto2\Dati) and a list of files (228.gr1, 229.gr1, 245.gr1, 246.gr1). Below this, it displays a scale of 1:50,000 and a map showing a rectangular work area with dimensions 1,442 km by 1,476 km. The map also shows approximate limits of the zone (4,920 km and 4,887 km).
- System Parameters:** Two columns labeled "Dal Sistema" and "Al Sistema". Both columns have radio buttons for ROMA40 (Gauss-Boaga), ED50 (UTM), and WGS84 (UTM). A red arrow points from the "Dal Sistema" column to the "Al Sistema" column. Below these columns are buttons for "Da quote geoidiche" and "A quote ellissoidiche", and a "Trasforma le quote" button.
- Input/Output:** Two buttons: "Da tastiera" and "Da file".
- Input/Output da tastiera:** A section for "Input Gauss-Boaga" with radio buttons for "Geografiche" and "Piane". It includes input fields for Northing (N = 4 900 018,440), Easting (E = 1 450 026,668), and Height (H =).
- Output UTM(WGS84):** A section for "Output UTM(WGS84)" with radio buttons for "Geografiche" and "Piane". It includes input fields for Northing (N = 4 900 000,000), Easting (E = 450 000,000), and Height (h =). A "Fuso" (Zone) field is set to 32.
- Buttons:** A red-bordered box on the right contains a red arrow button labeled "ESEGUI" and a button with a green arrow and a red arrow labeled "ESCI".

IGM - Servizio Geodetico - Renzo Maseroli

Conversione Sistemi



Dal Sistema

ETRF89

Coordinate

Geografiche

Proiezione

Al Sistema

ROMA40

Coordinate

Geografiche

Proiezione

Da quote ellissoidiche

A quote geoidiche

Trasforma le quote

Input/Output

Da tastiera

Da file

Input/Output da tastiera

Input ETRF89

$\varphi = 46^{\circ} 00' 00.0000''$

$\lambda = 11^{\circ} 20' 00.0000''$

h = 100.000

Output ROMA40

$\varphi = 45^{\circ} 59' 57.5986''$

$\lambda = -1^{\circ} 07' 07.5324''$

H = 50.258

Zona di lavoro

c: [HDD]

C:\
19_k Programmi
TRAHISK
griglie k

61.GK2

Foglio al 50.000 : 61

Long. da Roma

-1° 11'

fuso

32

-0° 45'

Long. da Greenwich

11° 16'

11° 42'

46° 14'

Limiti approssimativi della zona in cui è possibile operare

45° 56'



Griglia	Griglia	Griglia	Griglia
ROMA40-ED50	ROMA40-ETRF89	ETRF89-ETRF2000	Griglia Ocoide
2002	2002	2008	2005



Esegui



Esci