

Approfondimento sui sistemi di riferimento

La definizione di un sistema di riferimento

Un sistema di riferimento, indicato spesso in Geomatica con il termine *datum*, è definito come una terna orientata di assi, posta in un'origine e di cui è opportunamente definito uno (o più) fattori di scala.

Focalizzando l'attenzione sul posizionamento e, più in generale, sulla rappresentazione cartografica, l'esigenza principale sarebbe quella di definire un sistema di riferimento rispetto al quale georiferire tutto: dall'Australia all'Europa, dai satelliti ai pianeti. Tra le varie configurazioni teoricamente possibili, la più conveniente è un sistema di riferimento, spesso indicato con la sigla ECEF (*Earth Centred Earth Fixed*), con un asse allineato con l'asse di rotazione terrestre e origine al centro di massa della Terra (Figura 1).

Ma dove si trova *realmente* il centro di massa della Terra?

Volendo rispondere a questa domanda, possiamo affermare che, sebbene in maniera indiretta, proprio le misure astronomiche e satellitari, combinate a misure di tempo, spazio e gravitazione, consentono di stimare la posizione del centro di massa terrestre, e di conseguenza di orientare gli assi della terna cartesiana (ad esempio, l'asse Z secondo l'asse d'istantanea rotazione, e l'asse X in modo convenzionale, facendo sì ad esempio che il piano ZX passi per Greenwich).

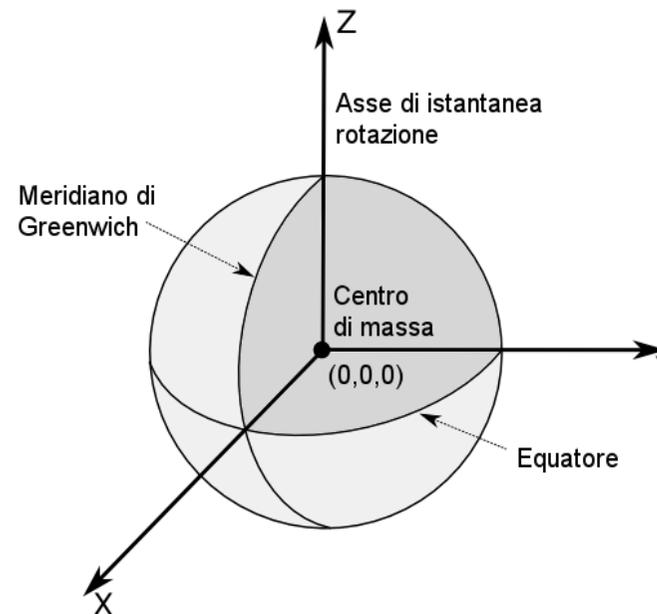


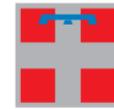
Figura 1 - Definizione del sistema di riferimento ECEF

Analogamente, anche la determinazione dell'asse di rotazione terrestre passa attraverso misure di tipo astronomico (tipicamente, ancora il moto dei satelliti), ma anche da misure di tempo e di latitudine. La Figura 2 riporta l'andamento dell'asse d'istantanea rotazione della Terra negli ultimi 100 anni.



SPIN GNSS

Servizio di Posizionamento Interregionale GNSS
Piemonte - Lombardia



REGIONE
PIEMONTE



Regione
Lombardia

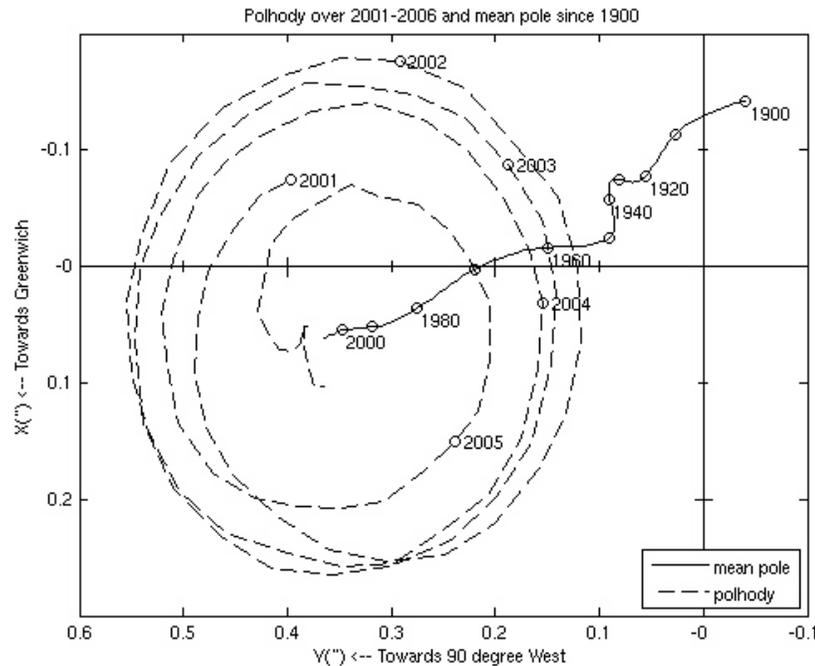


Figura 2 - Moto del polo medio dal 1900 al 2000 (linea continua) e precessione nel corso dell'anno dal 2001 al 2006 (linea tratteggiata)

Fatte queste premesse, si comprende in prima analisi che i sistemi di riferimento dipendono dalle misure, che migliorano in precisione con le tecniche più moderne (gli strumenti del 1800 non erano sicuramente così precisi come quelli di oggi), ma che dipendono anche dal periodo di misura. Per cui, anche se disponessimo di strumenti infinitamente precisi, la velocità di rotazione della Terra e la posizione dell'asse di rotazione

cambierebbero ogni volta che proveremmo a misurarle, visto che a cambiare sarebbe il periodo medio convenzionale di misura.

Per questa ragione, la definizione dei sistemi di riferimento è strettamente collegata all'epoca di misura, e per questa ragione tale periodo viene indicato all'interno dei nomi con cui tali sistemi sono chiamati (ad esempio, GRS67, GRS80, WGS84, ETRF89, PZ90, ITRF2000 sono sistemi di riferimento diversi, stimati considerando le misure fino al 1967, al 1980, 1984 e così via). Ad oggi, il più recente e più preciso sistema di riferimento globale è stato calcolato dallo IERS (*International Earth Rotation and Reference System Service*) nel 2010, considerando le misure astronomiche fino al 2008, e prende il nome di ITRS2008 (*IERS Terrestrial Reference System 2008*).

La materializzazione di un sistema di riferimento

Nel paragrafo precedente si è visto dov'è collocata e come è orientata la terna degli assi cartesiani che costituiscono il sistema di riferimento. Partendo da quest'idea, è possibile focalizzare l'attenzione sulla necessità pratica di poter "toccare con mano" un sistema di riferimento, e quindi non solo di definirlo, ma di **materializzarlo**, per poterlo utilizzare con la strumentazione topografica. Un sistema di riferimento non deve quindi essere rappresentato solo da un concetto, ma deve essere ben visibile al topografo, in modo tale che egli possa utilizzarlo per posizionare qualsiasi oggetto ovunque nello spazio.

Usualmente, un sistema di riferimento viene materializzato attraverso un picchetto, un chiodo o un caposaldo sulla superficie terrestre, posizionati

di norma dagli enti (solitamente nazionali ed internazionali) preposti alla definizione e al mantenimento dei sistemi di riferimento.



Figura 3 - Esempi di capisaldi trigonometrici per la materializzazione di sistemi di riferimento

La materializzazione di un sistema di riferimento attraverso capisaldi solidali al terreno comporta però un problema di base: come è noto, il corpo terrestre è deformabile, sia a causa del moto delle placche terrestri sia, talvolta, a causa di eventi estremi quali terremoti e frane. Quindi, qualsiasi vertice o caposaldo di coordinate note in un sistema di riferimento subisce prima o poi uno spostamento rispetto allo stesso sistema di riferimento.

Per le cause appena descritte, il TRF (*Terrestrial Reference Frame*), ovvero la materializzazione del sistema di riferimento TRS (*Terrestrial Reference System*), è ancora di più legata all'epoca di misura, in quanto la sua realizzazione (materializzazione) dipende da come si deforma la Terra.

Nell'era del posizionamento satellitare, in cui il sistema di riferimento è direttamente trasmesso dai satelliti insieme alle misure, ci si chiede se sia ancora utile materializzare un sistema di riferimento, in quanto le coordinate dei punti a terra sono ricavate da misure fatte dai satelliti. Ragionando su questo argomento, occorre sottolineare come a loro volta i satelliti trasmettano a terra il sistema di riferimento grazie al fatto che un centro di controllo è in grado di calcolare e prevedere con molta precisione la loro posizione nello stesso sistema di riferimento. Tale calcolo è in concreto stato possibile grazie a misure di/da diverse stazioni di controllo, che costituiscono la materializzazione "moderna" del sistema di riferimento.



Figura 4 – Le stazioni GPS di controllo IENG (Istituto Elettronico Nazionale "Galileo Ferraris" - Torino) e TORI (Politecnico di Torino), che contribuiscono alla materializzazione rispettivamente dei sistemi di riferimento ITRF e ETRF



SPIN GNSS

Servizio di Posizionamento Interregionale GNSS
Piemonte - Lombardia

Ecco quindi come si distingue il sistema (la "S" finale nella sigla ITRS, che stava appunto per *System*) dalla sua realizzazione (indicato con una lettera "F", che significa *Frame*, materializzazione).

I più moderni sistemi di riferimento e le reti associate sono, a livello internazionale i sistemi ITRSxxxx (*IERS Terrestrial Reference System*, calcolato con i dati fino all'anno "xxxx"), a cui vengono associati i *frame* ITRFxxxx (*IERS Terrestrial Reference Frame* associati all'anno "xxxx").

In particolare, l'ultimo e più preciso sistema di riferimento è chiamato ITRS08 al quale è legato il *frame* ITRF2008, che utilizza, oltre alle stazioni permanenti GNSS dislocate in tutto il globo (cfr. Figura 5), anche altre tecniche (stazioni laser SLR, stazioni interferometriche VLBI e misure ai satelliti DORIS).

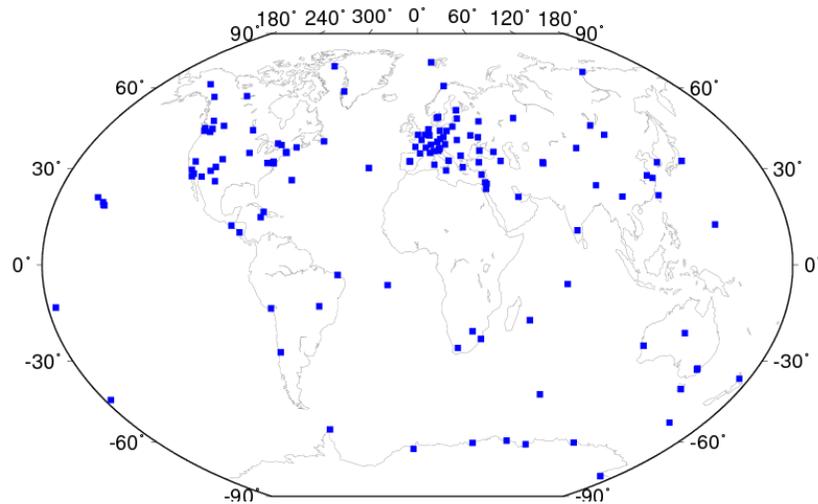


Figura 5 – Vertici del sistema ITRF08



Regione Lombardia

Oltre ai sistemi globali, esistono e si utilizzano comunemente anche dei sistemi di riferimento più locali (solitamente continentali), come ad esempio in Europa il sistema ETRSxxxx (acronimo di *European Terrestrial Reference System*) e la sua materializzazione ETRFxxxx. In particolare, al Simposio EUREF tenutosi a Firenze nel 1990 è stata adottata la seguente risoluzione:

“La Sotto Commissione EUREF per il Sistema di Riferimento Europeo della Associazione Internazionale di Geodesia (IAG) raccomanda che l'EUREF adotti un sistema di riferimento coincidente con ITRS all'epoca 1989.0 e che tale sistema sia solidale alla parte stabile della placca Eurasiatica. Tale sistema sarà denominato ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989)”.

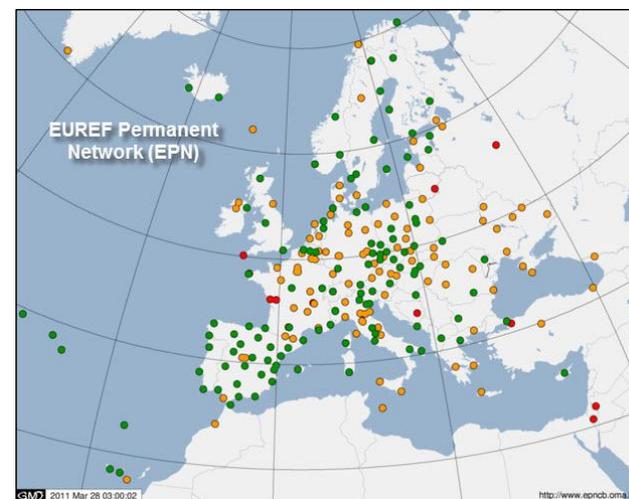


Figura 6 - Stazioni permanenti della rete EUREF che materializzano il sistema di riferimento ETRS



Ma perché si usano sistemi di riferimento, europei, italiani, o ancora dei sistemi più locali? I motivi sono, oltre che teorici, anche concreti.

I punti riportati in Figura 5 sono stazioni permanenti GNSS poste su luoghi stabili e che misurano 24 ore su 24 la costellazione GPS e/o altre costellazioni satellitari, ed hanno coordinate note in uno o più sistemi di riferimento. Queste stazioni costituiscono una rete in continuo ricalcolo giornaliero. I ricalcoli forniscono annualmente la loro posizione, ma anche una velocità media rispetto allo stesso sistema di riferimento delle coordinate. Le velocità di alcune stazioni europee sono riportate in Tabella 1.

Tabella 1 – Velocità medie annuali di alcune stazioni nei sistemi ITRF ed ETRF

Stazione	ITRF86			ETRF89		
	V _x (m/anno)	V _y (m/anno)	V _z (m/anno)	V _x (m/anno)	V _y (m/anno)	V _z (m/anno)
GRAS	-0.0120	+0.0189	+0.0106	+0.0006	+0.0021	-0.0030
MEDI	-0.0142	+0.0214	+0.0118	-0.0065	+0.0001	-0.0011
NOTO	-0.0163	+0.0188	+0.0157	-0.0105	-0.0032	+0.0022
CAGL	-0.0070	+0.0127	+0.0079	+0.0036	+0.0000	+0.0041
ZIMM	-0.0111	+0.0173	+0.0126	-0.0017	+0.0021	+0.0022

In particolare, nella Tabella 1 troviamo le velocità medie, espresse in metri all'anno, di alcune stazioni permanenti GNSS, rispettivamente Grasse (Francia), Medicina, Noto, Cagliari e Zimmerwald (Svizzera), ed espresse nella terna cartesiana geocentrica ECEF.

Se si osservano le velocità nel sistema ITRF86, si riscontrano parecchi millimetri delle stazioni italiane. Ad esempio per Noto vi è uno spostamento annuo di circa 30 mm, da cui consegue uno spostamento di circa 60 cm in 20 anni.

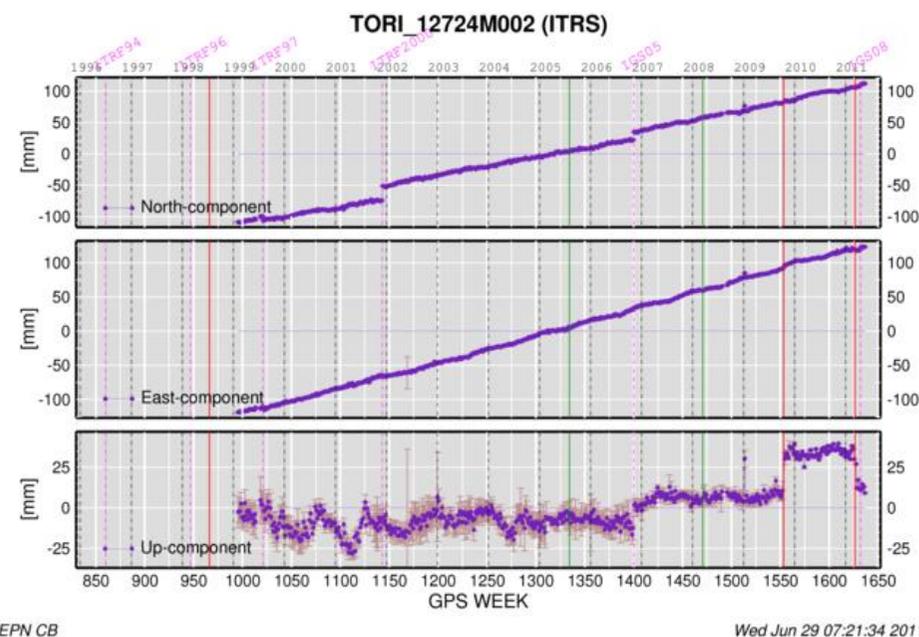


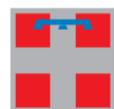
Figura 7 – Spostamenti dal 1999 al 2011 lungo Nord, Est e h (espresse in mm) della stazione permanente di TORI (Politecnico di Torino) nel sistema di riferimento ITRS2008

Tale spostamento è ben evidente anche dalla serie storica riportata in Figura 7. Si evidenzia quindi come costruire una cartografia globale, ad



SPIN GNSS

Servizio di Posizionamento Interregionale GNSS
Piemonte - Lombardia



REGIONE
PIEMONTE



Regione
Lombardia

esempio in scala 1:1000 (in cui già 30 cm rappresentano una deformazione significativa), significa cambiare la cartografia ogni 10 anni. Tuttavia, l'analisi della prima parte della Tabella 1 evidenzia anche come questi spostamenti siano simili, in valore e segno, in tutta la placca Euroasiatica. Ciò significa che, se al posto del sistema globale venisse adottato un sistema di riferimento locale, valido ad esempio per tutto il continente, le deformazioni nel tempo si ridurrebbero sensibilmente. Gli spostamenti nel sistema di riferimento europeo ETRS89 dal 1989 al 2011 per la stazione di TORI sono evidenti in Figura 8.

In conclusione, dopo aver descritto le necessità che rendono necessario adottare un sistema di riferimento, e dopo aver analizzato come calcolarlo e materializzarlo, si riporta la **definizione di un sistema di riferimento e della sua materializzazione**:

“Un sistema di riferimento è l'insieme di parametri e regole che permettono di ricavare la posizione di un punto nello spazio e nel tempo. Si utilizza per mezzo di una sua materializzazione (frame)”

Sistemi di riferimento e cartografia in Italia

In Italia, la cartografia ufficiale è realizzata dall'Istituto Geografico Militare Italiano (IGMI). Tale cartografia è stata riferita, in origine, all'ellissoide internazionale di Hayford (realizzato nel 1909) ed *orientato* in corrispondenza dell'osservatorio astronomico di Roma Monte Mario. Orientare un ellissoide significa che in un determinato punto dello spazio (in questo caso, l'osservatorio di Roma Monte Mario) si è arbitrariamente ipotizzato che ellissoide e geode siano tangenti in senso stretto, ovvero che anche le normali alle due superfici sono coincidenti, cfr. Figura 9. Una tecnica di questo tipo è stata adottata per motivi logistici: all'epoca della realizzazione del primo sistema di riferimento italiano (1940), non era possibile misurare l'altezza ellissoidica (h), e neppure le due coordinate geografiche. Le uniche coordinate misurabili erano quelle astronomiche, stimabili imponendo che l'asse primario dello strumento passante per la direzione verticale (la direzione del filo a piombo) fosse coincidente con il suo asse di rotazione, ovvero con l'asse primario normale alla superficie del geode. Da qui, l'esigenza di far coincidere la normale al geode con quella all'ellissoide.

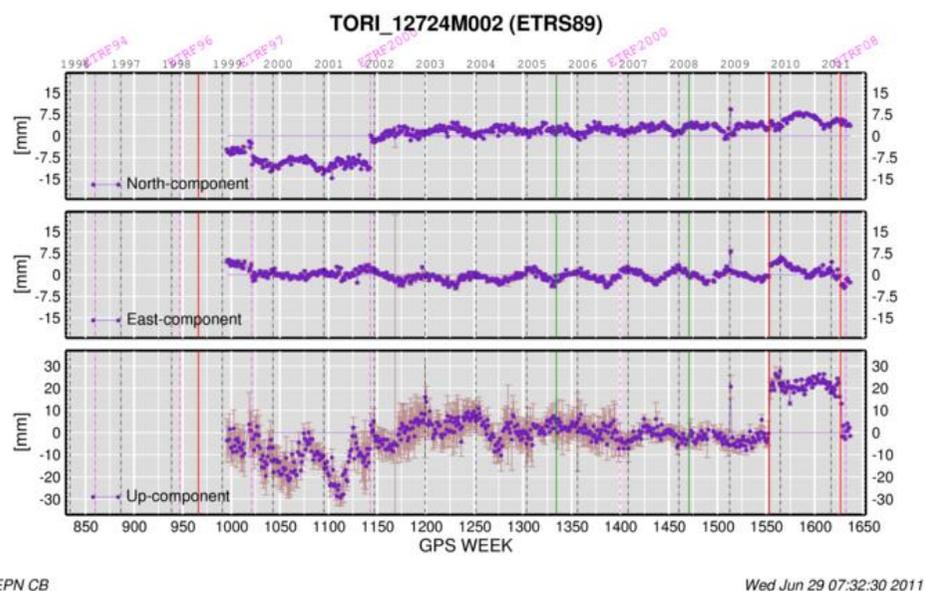


Figura 8 – Spostamenti dal 1999 al 2011 lungo Nord, Est e h (esprese in mm) della stazione permanente di TORI (Politecnico di Torino) nel sistema di riferimento ETRS89



SPIN GNSS

Servizio di Posizionamento Interregionale GNSS
Piemonte - Lombardia

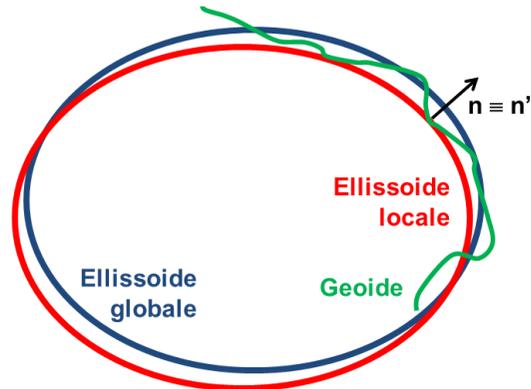


Figura 9 – Orientamento di un ellissoide

Tutte le cartografie prodotte dell'IGM sono riferite a questo ellissoide locale, sebbene in questi anni sia in corso una importante operazione di adeguamento ai sistemi di riferimento globali coerenti con gli strumenti satellitari. Tuttavia, prima ancora dell'ellissoide locale, la cartografia italiana nasce da una rete trigonometrica classica realizzata per triangolazione, e che solo negli anni 1980 ha incluso anche misure di trilaterazione. Tale rete consta di circa 20000 vertici trigonometrici suddivisi in quattro ordini ed uniformemente distribuiti sul territorio nazionale con una interdistanza media di circa 5 km (cfr. Figura 10).

La rete così ottenuta è poi stata ricompensata nel 1989, integrandola con le misure distanziometriche ottenute con l'uso di distanziometri ad onde. Tale compensazione ha però avuto una vita molto breve, visto che nello stesso anno inizieranno a diffondersi in Italia i primi strumenti topografici basati sul GPS, che cambieranno completamente il modo di materializzare un sistema di riferimento.

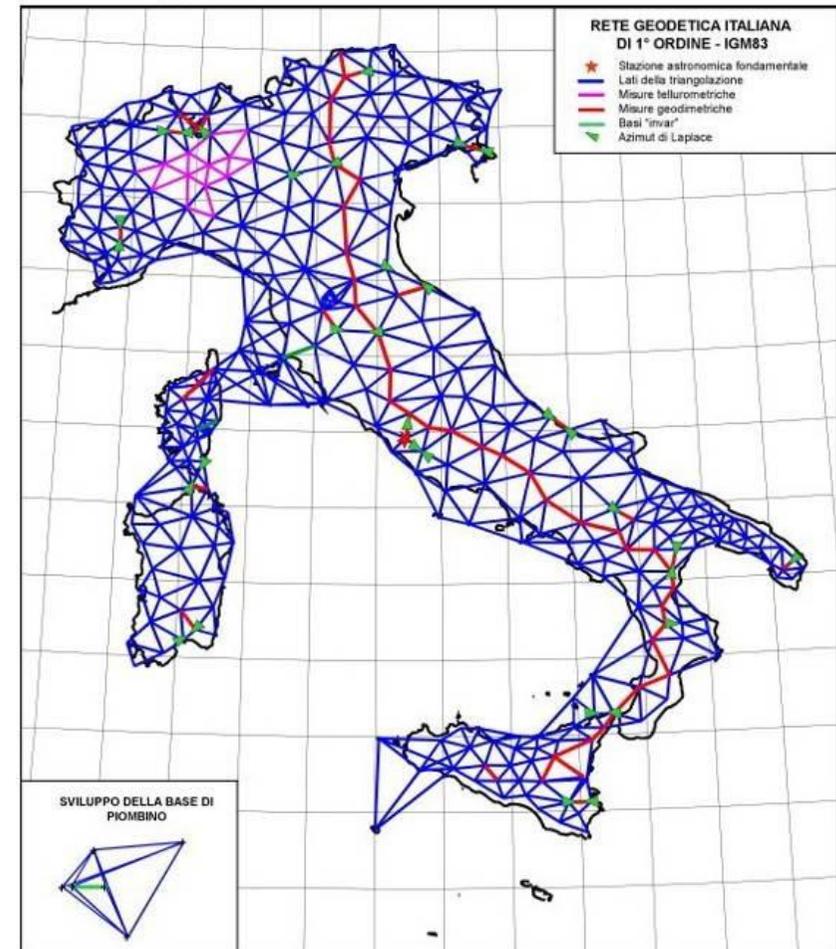


Figura 10 – La rete geodetica italiana IGM83, realizzata attraverso triangolazioni e trilaterazioni

Dal 1990 sino al 1995 vennero infatti misurati con strumentazione GPS circa 2000 punti della rete fondamentale IGM, e molti altri punti di reti di raffittimento fatti in collaborazione con gli enti regionali, fino ad arrivare ad avere una rete con una densità di circa un punto ogni 5 km. I punti scelti dovevano essere stazionabili con ricevitori GPS, per cui dalla vecchia rete trigonometrica vennero ad esempio eliminati i punti posti su un campanile.

La rete così formata prese il nome di rete IGM95, e rappresentava la prima materializzazione italiana dell'ETRS89 (Figura 11), in conformità con la direttiva Europea INSPIRE.

A partire da questa rete fondamentale, gli stessi Enti regionali diedero vita ad una serie di raffittimenti locali della rete IGM95, consentendo quindi l'utilizzo pratico di questi vertici per la maggior parte delle pratiche topografiche, e favorendo così il diffondersi del nuovo sistema di riferimento.

La rete IGM95 è, insieme ai suoi raffittimenti locali, senza dubbio più precisa della rete trigonometrica tradizionale. Tuttavia, rimase irrisolto il problema legato all'aggiornamento continuo delle coordinate dei vertici della rete. Infatti, l'evoluzione degli strumenti topografici e delle tecniche di misura ha portato un incremento nella precisione delle misure rispetto a quelle del 1990. Inoltre, occorre sommare alle imprecisioni strumentali anche le deformazioni che sono avvenute nel territorio, e legate ai movimenti locali della penisola italiana rispetto alla placca Euroasiatica e agli eventi rari (ad esempio, il terremoto dell'Aquila del 2009 che ha portato a deformazioni superiori ai 20 cm nei pressi dell'area interessata).

Stazionando oggi su un centrino della rete IGM95, e confrontando le coordinate ottenute con quelle riportate nella monografia ufficiale, vi sono deformazioni visibili con strumenti sensibili al centimetro, e che in alcuni casi raggiungono anche 5 cm.

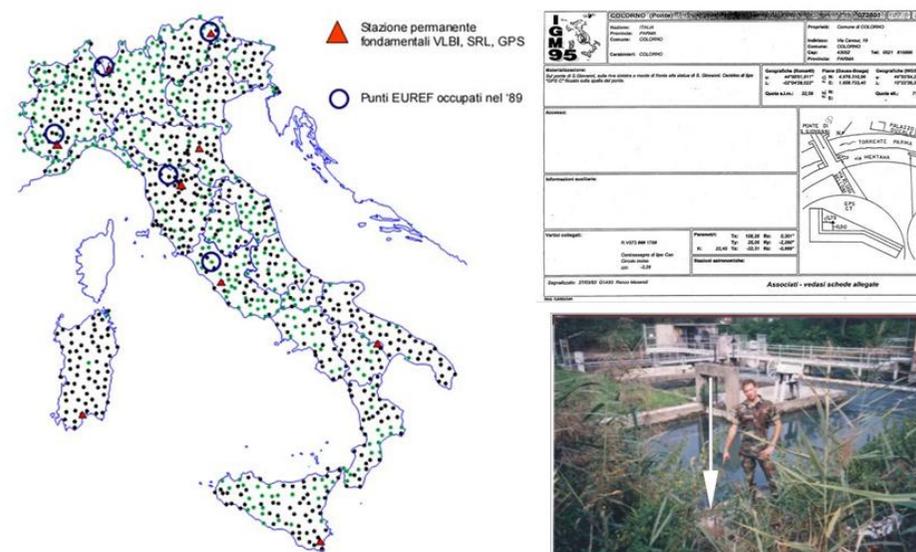


Figura 11 – I vertici della rete IGM95 (a sinistra), ed una monografia di uno dei vertici, completa di documentazione fotografica (a destra)

A causa delle deformazioni locali e puntuali cui è soggetto il territorio, occorrerebbe controllare ed aggiornare la posizione di questi vertici con una elevata frequenza, con un conseguente aumento dei costi ed un continuo aggiornamento delle cartografie esistenti.



SPIN GNSS

Servizio di Posizionamento Interregionale GNSS
Piemonte - Lombardia



La soluzione a questo problema è rappresentata dall'utilizzare, come vertici della rete che materializza il sistema di riferimento geodetico nazionale, direttamente un insieme di stazioni permanenti GNSS, analogamente a quanto già fanno enti internazionali quali IERS ed EUREF rispettivamente per il sistema di riferimento globale e per quello europeo.

Si tratta quindi di avere a disposizione una **rete** di vertici che mantiene il sistema di riferimento in tempo reale e che rileva la dinamica della crosta della Terra, e che risulta direttamente connessa sia al sistema di riferimento europeo sia al sistema di riferimento globale. L'ideale è quindi disporre di una rete non statica (come erano le precedenti realizzazioni dell'IGM), ma **dinamica**, sempre in ricalcolo, e che si estenda su tutto il territorio **nazionale**.

Per poter realizzare la Rete Dinamica Nazionale (RDN), occorre pertanto organizzare la raccolta dei dati, possibilmente in maniera automatica, di un certo numero di stazioni permanenti storicamente stabili ed affidabili (ad esempio, le due stazioni di Torino riportate in Figura 4), e monumentate nella maniera più stabile possibile.

Il lavoro di realizzazione di tale rete ad opera dell'IGM ha dato vita ad una rete di 99 stazioni su tutto il territorio nazionale (Figura 12), con una densità di una stazione permanente ogni 100 km. Come detto, la rete è dinamica, e le coordinate delle stazioni permanenti vengono ricalcolate ogni sei mesi per individuare possibili deformazioni locali, dovute a fenomeni fisici o anche solamente al cedimento della monumentazione di uno dei vertici della rete.



Figura 12 – I vertici della Rete Dinamica Nazionale dell'IGM



SPIN GNSS

Servizio di Posizionamento Interregionale GNSS
Piemonte - Lombardia

In conformità con il Decreto della Presidenza del Consiglio dei Ministri del 10 novembre 2011 (*“Adozione del Sistema di riferimento geodetico nazionale”*, G.U. n. 48 del 27/02/2012), il sistema di riferimento della RDN è stato riconosciuto come la materializzazione del nuovo sistema di riferimento italiano, costituito dalla realizzazione ETRF2000 (all’epoca 2008.0) del Sistema di riferimento geodetico europeo ETRS89, e quindi sempre in linea con la direttiva INSPIRE.

Analogamente a quanto accadeva per i raffittimenti della rete IGM95, accanto alla Rete Dinamica Nazionale sono sorte reti di stazioni permanenti più dense (normalmente, 1 punto ogni 25-30 km), solitamente su scala regionale, allo scopo non solamente di materializzare, ma anche di distribuire il sistema di riferimento ETRF2000-RDN e di fornire un servizio di posizionamento di precisione al topografo. Secondo quanto previsto dal sopra citato Decreto del 10 novembre 2011, tali reti devono essere georiferite nel sistema ETRF2000-RDN, e rappresentano la materializzazione regionale dello stesso sistema di riferimento geodetico nazionale.

In quest’ottica, la Regione Piemonte dal 2011 si è dotata di una rete di stazioni permanenti, denominata PiemonteGNSS e composta da 15 stazioni permanenti, quasi tutte di nuova monumentazione, ed inquadrata nel sistema di riferimento ETRF2000-RDN. Due delle stazioni della rete PiemonteGNSS (Biella e Torino) fanno parte della realizzazione originale della RDN (primo calcolo, riferito al 1 gennaio 2008), mentre altre tre (Alessandria, Demonte e Domodossola) fanno parte delle stazioni di supporto e verranno incluse nei successivi ricalcoli.

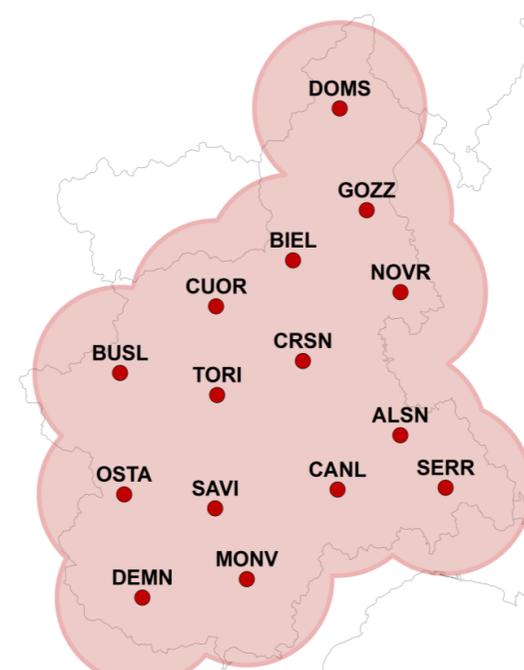


Figura 13 - La rete di stazioni permanenti della Regione Piemonte

Alla luce di quanto detto finora sulle nuove reti di stazioni permanenti, la rete IGM95 è quindi inutile? La risposta in questo caso è negativa. In sintesi, una rete di vertici quale la vecchia IGM95 potrebbe essere definitivamente accantonata, e sostituita dalla Rete Dinamica Nazionale. Tuttavia, la necessità da parte del topografo di poter “toccare con mano” il sistema di riferimento, ovvero di poter disporre di un elemento fisico e *stazionabile* su cui appoggiarsi durante i suoi rilievi hanno spinto l’IGM a non dismettere completamente i centri della vecchia rete di



SPIN GNSS

Servizio di Posizionamento Interregionale GNSS
Piemonte - Lombardia



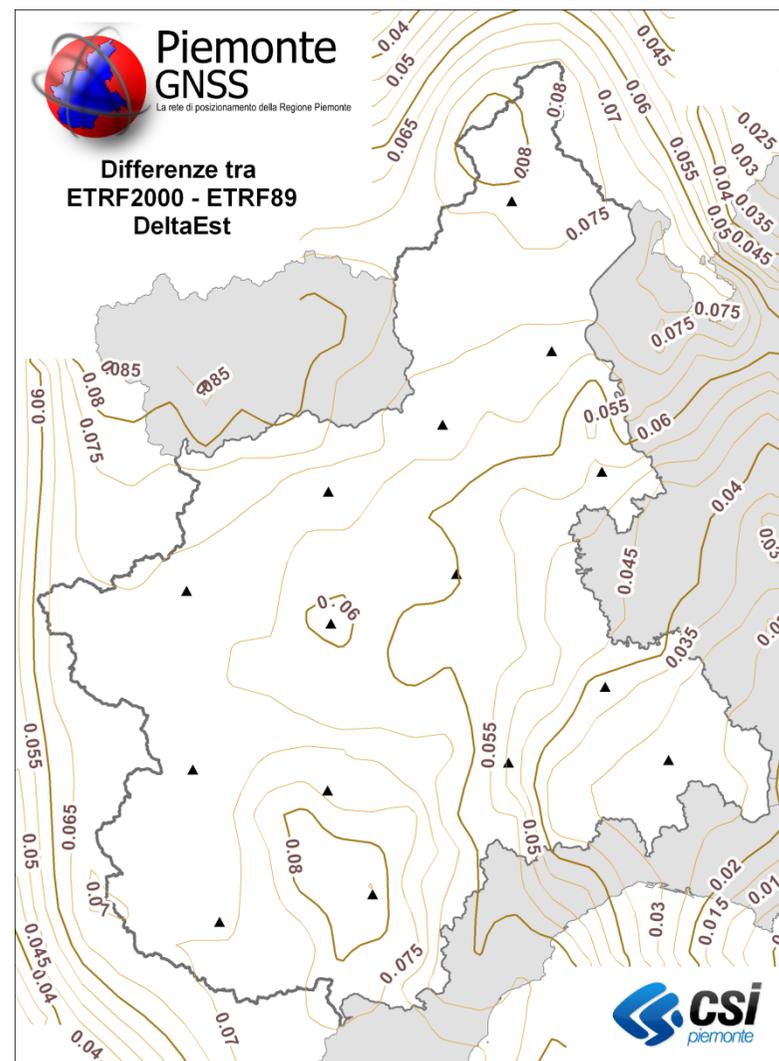
posizionamento. I vertici “statici” (in contrapposizione a quelli “dinamici” visti sopra) della rete IGM95 sono stati completamente aggiornati nel sistema RDN. Chi disponeva quindi delle vecchie coordinate può disporre dei parametri per passare dalle vecchie coordinate alle nuove coordinate semplicemente collegandosi al sito dell’IGM.

E per quanto concerne la cartografia dell’IGM espressa nei vecchi sistemi di riferimento? Come si può recuperare tutta la vecchia cartografia?

In effetti, il passaggio tra due sistemi di riferimento non può avvenire in maniera rigorosa attraverso una formula empirica chiusa. Se è vero che il grosso della trasformazione è assorbito da una rototraslazione, occorre tenere presente che vi sono deformazioni non isotrope non compensabili con un singolo fattore di scala.

Per favorire quindi la conversione tra i diversi sistemi di riferimento nazionali, l’IGM ha pertanto valutato queste deformazioni su tutta Italia e le ha calcolate su una griglia molto fitta, con passo sempre inferiore a 10 secondi sessagesimali. Applicando localmente tali valori deformativi, contenuti in grigliati che hanno l’estensione dei fogli in scala 1:50000 (gli ultimi, la serie GK, sono venduti dallo stesso IGM), si può recuperare la vecchia cartografia e riportarla nel sistema di riferimento attuale, coerente come detto con la direttiva INSPIRE.

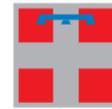
Per quanto concerne il Piemonte, le differenze tra le due materializzazioni del sistema ETRS89 (ovvero, tra ETRF89-IGM95 e ETRF2000-RDN) sono per lo più centimetriche. Nelle figure seguenti è riportata una rappresentazione a curve di livello delle deformazioni introdotte tra i due sistemi per ciascuna coordinata nella proiezione UTM, ottenuta partendo proprio dai grigliati GK2 prodotti dall’IGM.





SPIN GNSS

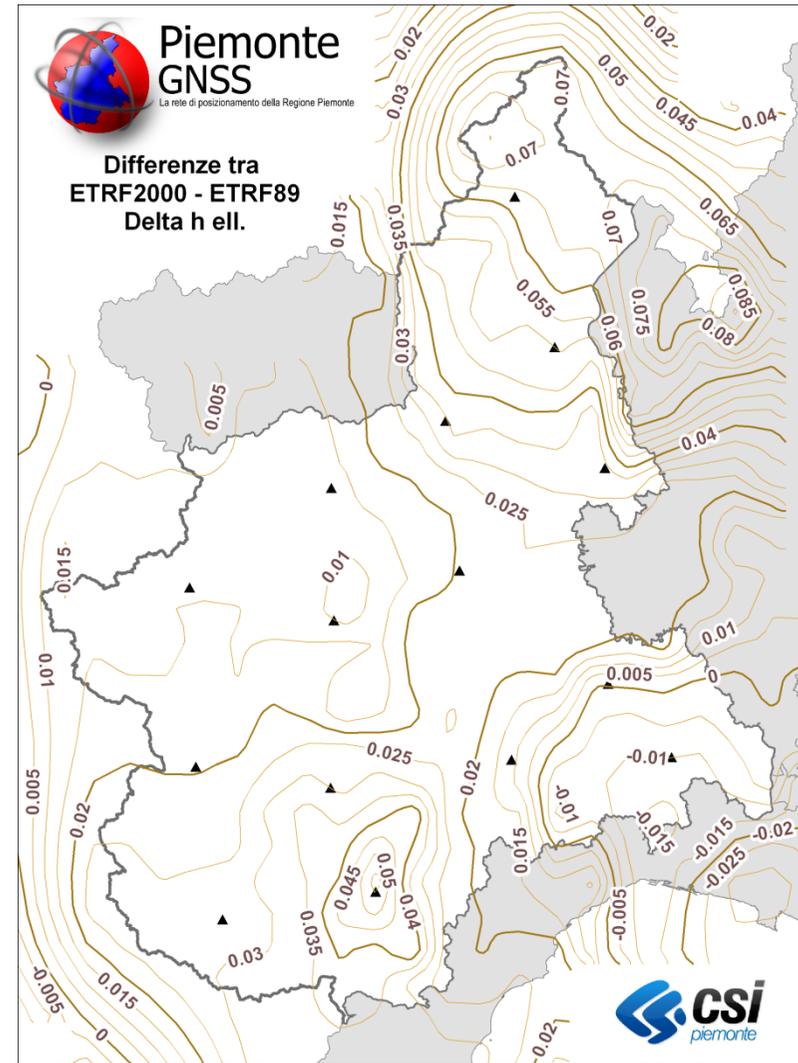
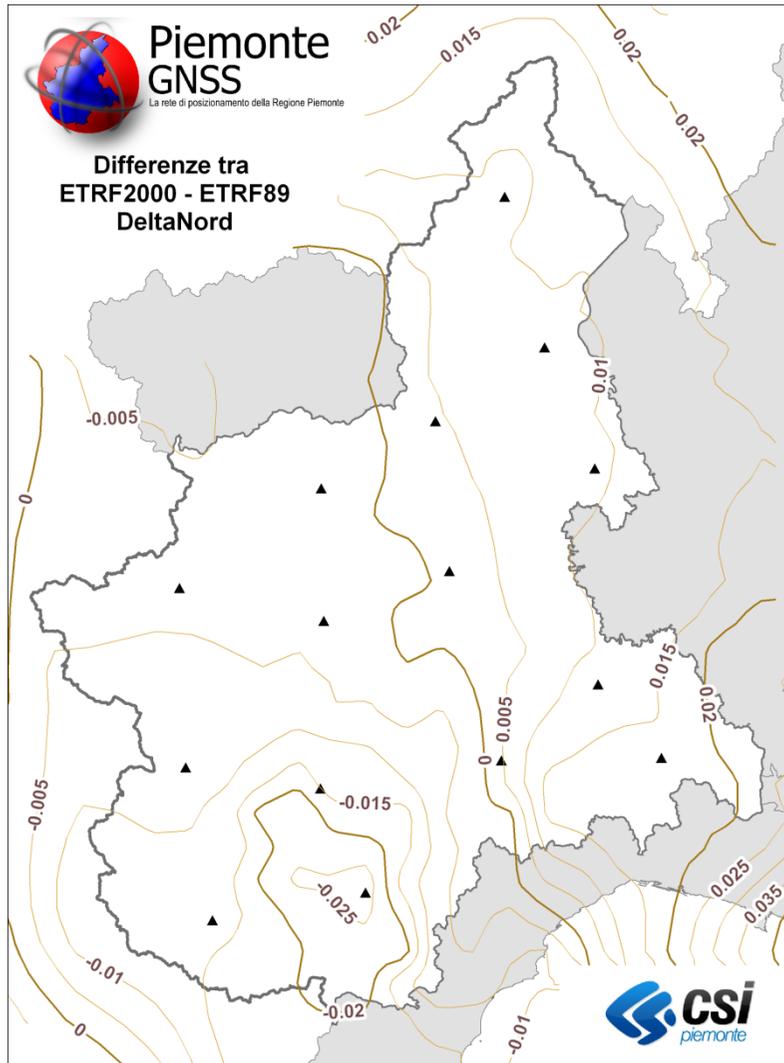
Servizio di Posizionamento Interregionale GNSS
Piemonte - Lombardia



REGIONE PIEMONTE



Regione Lombardia



Bibliografia ed approfondimenti

Il testo sopra riportato è parzialmente tratto dalla dispensa a cura del professor Ambrogio Manzino per il corso di Geomatica del Politecnico di Torino.

Oltre al testo sopra citato, ulteriori approfondimenti relativi ai sistemi di riferimento possono essere reperiti dalle seguenti fonti:

- Biagi L., “I fondamentali del GPS.”, Geomatics Workbooks n.8.
- Cina A., “GPS. Principi e modalità di funzionamento”, Celid.
- Manzino A., “Lezioni di Topografia (parte I – Geodesia)”, Otto Editore.
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E., “GNSS – Global Navigation Satellite Systems”, Springer.
- Strang G., Borre K., “Linear Algebra, Geodesy and GPS”. Wellesley-Cambridge Press.

Oppure consultando i seguenti siti web:

- International Earth Rotation and Reference System Service (IERS):
<http://www.iers.org/>
- International Terrestrial Reference Frame (ITRF):
<http://itrf.ensg.ign.fr/>
- European Reference Frame Sub-Commission (EUREF):
<http://www.euref-iag.net/>
- EUREF Permanent GNSS Network (EPN):
<http://www.epncb.oma.be/>
- Istituto Geografico Militare – Servizio Geodetico:
<http://www.igmi.org/>



Quest’opera è stata rilasciata con licenza
Creative Commons Attribuzione - Non commerciale 2.5 Italia
(CC BY-NC 2.5 IT)

Per leggere una copia della licenza visita il sito web:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/it/>