

CAPITOLO 2.1

MATERIALIZZAZIONE DEI SISTEMI DI RIFERIMENTO MEDIANTE I SERVIZI DI POSIZIONAMENTO SATELLITARI

*Battista Benciolini (1), Ludovico Biagi (2), Mattia Crespi (3),
Ambrogio Maria Manzino (4), Marco Roggero (4), Fernando Sansò (2)*

- (1) Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Trento, via Mesiano 77 – 38100 Trento
(2) DIIAR - Politecnico di Milano, c/o Polo Regionale di Como, via Valleggio 11 – 22100 Como
(3) DITS – Area di Geodesia e Geomatica, Sapienza Università di Roma, via Eudossiana 18 - 00184 Roma
(4) DITAG- Politecnico di Torino, II Facoltà P.zza S. Eusebio 5 – 13100 Vercelli

SOMMARIO

Un servizio di posizionamento basato su una rete di SP GNSS contribuisce a disseminare, sia in tempo reale sia per il post-processamento, un sistema di riferimento agli utenti. A tale scopo, in generale si può affermare che la rete dovrebbe essere inquadrata nel sistema di riferimento globale, materializzato dalla rete IGS; nell'operazione di inquadramento le coordinate delle SP IGS dovrebbero essere vincolate alle loro stime ufficiali e si dovrebbero adottare per l'elaborazione gli standard e i prodotti di IGS. In effetti l'applicazione di tali linee guida, apparentemente univoche, richiede operativamente di effettuare delle scelte, con effetti significativi sui risultati.

A un secondo livello, si considera che un servizio di posizionamento deve distribuire all'utenza (in genere quella dei servizi in tempo reale) il sistema di riferimento tipicamente richiesto per applicazioni di tipo topografico; tale sistema di riferimento, almeno nel caso italiano, è differente dal sistema di riferimento globale. Ciò pone al servizio due tipi di problemi; il primo è quello della stima della trasformazione fra il sistema di riferimento globale e quello richiesto dall'utente, quindi vi è il problema della comunicazione all'utente dei parametri della suddetta trasformazione.

Il presente capitolo ha lo scopo di analizzare nel dettaglio le problematiche sopra sintetizzate.

1 INTRODUZIONE

Per comprendere la centralità di questo problema bisogna ricordare che una rete di SP GNSS destinata all'erogazione di servizi di posizionamento materializza un Sistema di Riferimento (SR) e lo distribuisce alla propria utenza: infatti ogni utente che utilizzi i dati e le coordinate distribuite dalla rete (in tempo reale od a posteriori) implicitamente si posiziona nel sistema materializzato da essa.

È quindi fondamentale individuare le operazioni ed i criteri sui quali si deve basare la definizione del SR materializzato dalla rete di SP.

Si possono individuare essenzialmente 6 operazioni, di cui 3 riguardano la scelta, la materializzazione vera e propria ed il monitoraggio del SR, ed altre 3 riguardano la distribuzione agli utenti, la connessione con altri SR (in genere preesistenti) e l'interconnessione tra reti di SP contigue ma gestite da Enti diversi.

Poiché si discute di SR, è essenziale che vengano puntualizzati alcuni aspetti teorici e operativi, relativi a quelli tipicamente utilizzati nelle operazioni di rilevamento.

I sistemi di riferimento di interesse per il GNSS e i servizi di posizionamento in Italia sono il sistema di riferimento globale, ovvero l'International Terrestrial Reference System (ITRS) e il sistema di riferimento europeo, l'European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89), in particolare è usata la sua realizzazione che chiameremo ETRF89-IGM95.

Esistono in realtà altri sistemi di riferimento più propriamente usati per scopi cartografici: Roma1940, ED50 e il sistema cartografico catastale, sui quali ritorneremo brevemente in seguito.

ITRS (*Geodetic's handbook*, 1992, *Mc.Carthy et al.*, 2003) è definito con origine nel baricentro del

pianeta, orientamento iniziale coincidente con l'orientamento del Bureau International de l'Heure (BIH) del 1984.0, evoluzione nel tempo dell'orientamento tale da assicurare una condizione di non rotazione rispetto alla tettonica a placche del pianeta, scala delle lunghezze coerente con la scala dei tempi geocentrica terrestre (TCG: Geocentric Coordinate Time); a oggi si sono succedute diverse realizzazioni di ITRS. La prima famiglia di realizzazioni è quella fatta dall'International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS, <http://www.iers.org>), denominate ITRF_{yy}: la lettera finale F (Frame) anziché S denota il fatto che si tratta di realizzazioni specifiche, yy indica l'anno della realizzazione; i vari ITRF sono stati ottenuti mediante compensazione congiunta delle reti di stazioni permanenti del Very Long Baseline Interferometry (VLBI), del Satellite Laser Ranging (SLR) e, con peso minore, del GPS. Per ogni realizzazione vengono stimate e distribuite le coordinate geocentriche cartesiane delle stazioni ad una certa epoca iniziale t_0 ; vengono inoltre state stimate e distribuite le velocità delle stazioni, nell'ipotesi di spostamenti lineari nel tempo; a coordinate e velocità sono associate gli scarti quadratici medi stimati. Le principali realizzazioni, per la valenza che hanno avuto negli studi degli ultimi decenni, sono ITRF89 ($t_0=1994.0$), ITRF97 ($t_0=1997.0$); all'epoca di redazione iniziale del testo la realizzazione corrente era ITRF2000 ($t_0=1997.0$, *Boucher et al.*, 2003); nel mese di ottobre 2006 è stato presentato e rilasciato ITRF2005, caratterizzato da σ dell'ordine del millimetro.

Come detto, ITRF viene aggiornato ogni circa 5 anni, nelle ultime versioni a partire da serie decennali di soluzioni provenienti da tecniche miste: ciò implica una grande accuratezza nella stima pregressa di coordinate e velocità, necessaria per qualunque interpretazione della geodinamica del pianeta. Tale caratteristica costituisce però anche un limite per applicazioni ove sia necessaria una propagazione in avanti delle coordinate delle SP, ad esempio per l'inquadramento di sottoreti regionali GNSS; infatti, su scale di tempo di alcuni anni, la classica ipotesi di propagazione lineare sulle coordinate delle SP può essere localmente eccessivamente rigida (*Ray, Dong, Altamimi*, 2004): ad esempio è ben noto che i cambi di strumentazione in una SP causano quasi sempre brusche discontinuità nelle serie e, per le SP IGS, si registra che mediamente ognuna di esse subisce qualche sostituzione ogni 20 mesi.

Una ulteriore realizzazione di ITRS è quella effettuata da IGS, basata sulle compensazioni settimanali della sola rete globale di stazioni permanenti GNSS; all'epoca della redazione iniziale del testo la realizzazione corrente aveva nome di IGb00 (*Ferland*, 2003, *Ferland et al.*, 2004, *Ray et al.*, 2004): in parallelo al rilascio di ITRF2005, il 5 novembre 2006 IGS è passato alla realizzazione IGS05 (*Steigenberger, Romero, Fang*, 2006). La nuova realizzazione è caratterizzata da alcune importanti novità, tra cui l'adozione dei modelli assoluti per la variazione del centro di fase; anche per questo motivo è previsto il ricalcolo completo nella nuova realizzazione di tutti i dati storici dell'IGS. Il sistema di riferimento IGS viene aggiornato settimanalmente e viene distribuito in due modalità distinte:

1. le stime settimanali delle coordinate (e delle loro covarianze) delle stazioni permanenti, per il momento centrale della settimana cui si riferisce la soluzione;
2. la stima delle coordinate e delle velocità delle stazioni permanenti all'epoca 1998.0, ottenute tramite una soluzione incrementale di tutte le settimane da quella iniziale alla settimana corrente.

Inoltre il SR IGS è distribuito anche attraverso le effemeridi GPS e i parametri di orientamento terrestre (EOP) calcolati da IGS. Anche il SR IGS è caratterizzato da precisione dell'ordine di qualche millimetro. Nonostante le precisioni dei due sistemi di riferimento le discrepanze fra SR ITRF e SR IGS arrivano ad alcuni millimetri (Tab. 1); la causa più significativa è un effetto di scala, ancora non pienamente compreso, fra le tecniche VLBI e SLR da un lato e la tecnica GPS dall'altro. Si noti che, per alcune semplificazioni attualmente adottate nella compensazione della rete IGS (*Davis, Blewitt*, 2000, *Blewitt*, 2004), le varianze associate alle stime delle coordinate sono sicuramente sottostimate; nelle compensazioni settimanali vengono inoltre ignorate le correlazioni temporali (*Barzaghi et al.*, 2002).

ETRS89 è definito come il sistema di riferimento coincidente con ITRS nell'epoca 1989.0, ma solidale al moto geodinamico della parte stabile della placca Europea, che grossolanamente coincide con la zona centrale del continente. ETRS89 rappresenta il sistema di riferimento per applicazioni cartografiche in Europa e realizza quindi, sulla scala del nostro continente, un sistema di riferimento statico (rappresentazione cartografica) rispetto a un "mondo dinamico" (realtà).

La realizzazione ufficiale europea di ETRS89 è curata dall'European Reference Frame (EUREF, <http://www.euref-iaag.net/>); nuovamente si hanno due realizzazioni internazionali di ETRS89.

Innanzitutto, ad ogni realizzazione ITRFyy di ITRS corrisponde una realizzazione ETRFyy di ETRS89 (Adam *et al.*, 1999): questa viene distribuita mediante le coordinate e le velocità (rispetto alla placca europea) all'epoca t_0 delle stazioni europee. Viene inoltre distribuita la trasformazione fra ITRFyy e ETRFyy: tale trasformazione è descritta da una trasformazione di similarità a 6 parametri (ovvero senza fattore di scala) linearmente dipendenti dal tempo, combinata con una propagazione lineare delle velocità geodinamiche, dipendenti dalla posizione del punto (Boucher, Altamimi, 2001). Vi è anche una realizzazione di ETRS89 basata sulle soluzioni settimanali della rete di SP GNSS dell'European Permanent Network (EPN, <http://www.epncb.oma.be/>); tale realizzazione non ha valenza di ufficialità, poiché allo stato attuale viene proposta semplicemente come un progetto di monitoraggio delle serie temporali; assume peraltro particolare rilevanza rispetto alla realizzazione ufficiale per alcune fondamentali ragioni: innanzitutto coinvolge un numero molto maggiore di SP; inoltre, come il SR IGS, viene aggiornata settimanalmente; infine, nella stima delle coordinate si tiene conto delle discontinuità introdotte dai cambi di strumentazione.

In quanto solidale con la placca media europea, ETRS89 ormai non è consistente con ITRS: ad esempio le differenze per l'Italia sono dell'ordine di alcuni decimetri nelle direzioni locali Est e Nord, con un incremento dell'ordine di 1-2 centimetri all'anno; le differenze e il loro incremento variano inoltre sul territorio nazionale poiché questo è interessato da significativi fenomeni di deformazione geodinamica. Si può quindi affermare che ETRS89 è deformato, sia su scala continentale sia su scala nazionale, rispetto a ITRS.

In Italia la materializzazione ufficiale di ETRS89 è data dalla rete IGM95 (Surace, 1997); la rete si compone di circa 1250 vertici, rilevati con il GPS negli anni '90 ed inquadrati nella realizzazione ETRF89. ETRF89-IGM95 è distribuito mediante le coordinate compensate dei punti della rete, riportate sulle monografie vendute dall'Istituto Geografico Militare (IGM, <http://www.igmi.org/>). Tale realizzazione in altri testi è talvolta definita genericamente come WGS84. La rete ETRF89-IGM95, a causa delle tecniche di acquisizione e di elaborazione dei dati allora disponibili, è ulteriormente localmente deformata ($\sigma \approx 2-3$ cm) rispetto alle attuali realizzazioni internazionali di ETRS89; in alcuni punti si sono osservate deformazioni anche maggiori di 3σ . Su scala nazionale la trasformazione fra il SR IGS e ETRF89-IGM95 probabilmente può essere descritta mediante una trasformazione di similarità a 7 parametri combinata con un campo di deformazione, caratterizzato plausibilmente da lunghezze d'onda dell'ordine delle decine di chilometri.

ZIMM, (after 98:312)	X (m)	Y (m)	Z (m)
ITRF2000	4331297.053	567555.898	4633133.930
ITRF2005	4331297.055	567555.898	4633133.948
IGb00-1	4331297.057	567555.900	4633133.933
IGb00-2	4331297.059	567555.899	4633133.937
IGS05-1	4331297.047	567555.903	4633133.938
ETRF2000	4331297.330	567555.637	4633133.710
ETRF2000-EPN	4331297.335	567555.640	4633133.712
ETRF2005	4331297.346	567555.646	4633133.729
ETRF2005-EPN	4331297.347	567555.649	4633133.728

Tabella 1. Stime di coordinate per la SP di Zimmerwald, epoca 2006.0. ITRF2000, ITRF2005, ETRF2000, ETRF2005 sono le soluzioni IERS, IGb00 e IGS05 sono le soluzioni IGS; ETRF2000-EPN e ETRF2005-EPN sono le soluzioni EPN. ITRF2000, IGb00-1, IGS05-1, ETRF2000, ETRF2000-EPN, ETRF2005, ETRF2005-EPN sono calcolate mediante propagazione lineare delle coordinate iniziali e delle velocità dalla relativa epoca t_0 . IGb00-1 e ETRF2000-EPN sono ottenute dalle soluzioni cumulate della prima settimana del 2006, IGS05-1 e ETRF2005-EPN, sono ottenute dalle soluzioni cumulate disponibili alla redazione del testo (settimana GPS 1415). IGb00-2 è ottenuta mediante interpolazione delle 52 soluzioni settimanali IGS che precedono l'epoca 2006.0. Si noti che il sito di ZIMM ha subito il cambio di ricevitore (ma non di antenna) nel 2003.

In questa breve discussione non si sono considerati altri sistemi di riferimento, che pure hanno valenza ufficiale sul territorio italiano, come Roma1940 e ED1950 oppure i diversi sistemi di riferimento utilizzati in ambito catastale: questi infatti non sono direttamente collegati alle tecniche di rilievo

mediante GPS e ai servizi di posizionamento, che sono l'oggetto del lavoro.

È stato già ufficialmente risolto dall'IGM tramite definizione ed implementazione della procedura VERTO 3 il problema della trasformazione tra ETRF89-IGM95 e ROMA1940 o ED1950 (*Donatelli et al.*, 2002). Non esistono invece procedure ufficiali per la trasformazione da e verso tutti i sistemi utilizzati in ambito catastale, anche se per alcuni di essi (le cosiddette "grandi origini") sono state definite procedure pratiche ed è stata complessivamente già proposta una soluzione generale del problema per un sistema generico. Si noti, tuttavia, che, dal punto di vista dei rilievi topografici di interesse catastale, per la stragrande maggioranza connessi ad atti di aggiornamento (oltre 400000 all'anno), l'importanza di un sistema di riferimento globale ha, nell'ambito della normativa attuale, importanza limitata, in quanto tali rilievi devono essere inquadrati localmente rispetto ai cosiddetti "punti fiduciali" (PF). È tuttavia auspicabile che i punti fiduciali (circa 1670000 sul territorio nazionale) possano essere sostituiti in tempi brevi, da "punti fiduciali globali" (GPF) materializzati da SP (*Reina et al.*, 2005), con significativi vantaggi per l'Agenzia del Territorio.

Per una discussione sulla trasformazione di risultati GPS a tali sistemi di riferimento si rimanda alla letteratura già esistente (oltre a *Donatelli et al.*, 2002, *Baiocchi et al.*, 2002); in tale contesto si ricorda semplicemente che la trasformazione fra ETRF89-IGM95 e Roma1940, stimata sulla base di tutti i dati disponibili, è implementata nel programma Verto3, distribuito ufficialmente dall'IGM.

2 LA SCELTA DEL SISTEMA DI RIFERIMENTO

Questa scelta risulta sostanzialmente "obbligata" se si sintetizzano alcune considerazioni emerse nell'introduzione:

1. le coordinate delle stazioni IGS sono attualmente disponibili in 2 SR: ITRF e IGS;
2. ITRF viene aggiornato circa ogni 5 anni e ciò pone problemi nella propagazione in avanti delle coordinate, per le discontinuità tipicamente presenti in corrispondenza dei cambi di strumentazione delle SP IGS; all'epoca in cui iniziò il presente studio, la soluzione corrente, ITRF2000, era oggettivamente obsoleta; ora, a breve distanza dal rilascio, ITRF2005 è ovviamente aggiornato: purtroppo a medio termine potranno ripetersi i medesimi problemi.
3. IGS05 è attualmente il SR aggiornato con maggior frequenza: inoltre è distribuito sia come soluzione cumulativa a lungo termine, sia come soluzioni settimanali.
4. IGS05 è il SR realizzato da IGS e per il "mondo" GPS, rappresenta il SR in cui si realizza la massima coerenza fra parametri di orientamento terrestre (EOP), efemeridi precise (EPH), parametri delle SP IGS (coordinate, ritardi troposferici zenitali), e costanti e/o modelli adottati internazionalmente (dalla velocità della luce nel vuoto che definisce la scala delle lunghezze ai modelli di Phase Center Variation-PCV e agli eventuali modelli di mitigazione del multipath).

Conseguentemente la scelta più ragionevole nell'inquadramento di una rete regionale di SP è quella di utilizzare il SR IGS; in particolare si propone l'utilizzo delle soluzioni settimanali, secondo una prassi che verrà descritta nel successivo paragrafo.

3 LA MATERIALIZZAZIONE DEL SISTEMA DI RIFERIMENTO

Tale operazione si concretizza nell'inquadramento della rete di SP nel SR IGS. Tenendo presente che l'estensione della rete è generalmente limitata all'ambito regionale, l'inquadramento deve essere realizzato vincolando EOP ed EPH stimati globalmente in sede IGS e vincolando i parametri di alcune (almeno 3) SP IGS (coordinate, ritardi troposferici zenitali) in modo stocastico, con varianze (ed eventualmente covarianze) realistiche (in particolare per quanto riguarda le coordinate).

Per quanto riguarda queste ultime, è ormai ben noto che le covarianze dei parametri stimati delle SP IGS (in qualunque SR) sono sottostimate (*Barzaghi et al.*, 2004) e non è corretto utilizzare le matrici di covarianza associate alle soluzioni settimanali per imporre tali vincoli. Si tratta quindi di definire un criterio di utilizzo delle soluzioni settimanali che preveda anche la stima delle loro varianze e covarianze

sulla base delle loro serie storiche. In questa sede si propone la seguente procedura per la stima delle coordinate e delle relative precisioni, attualmente in corso di sperimentazione:

1. si considera un numero significativo di settimane, multiplo di un anno (52 settimane), per individuare (eventualmente, se presenti) e rimuovere le tipiche periodicità delle soluzioni;
2. si trasformano le serie di coordinate (X,Y,Z) in (N,E,U) e si rimuovono i trend lineari con un'interpolazione robusta, ad esempio basata sui Least Trimmed Squares-LTS (*Leroy, Rousseeuw, 2003*), individuando nel contempo gli outlier ed i "gradini" (aggiornamento della strumentazione, del SR internazionale), in corrispondenza dei quali le serie devono essere suddivise; si deve verificare la validità dell'ipotesi lineare almeno a tratti (tra due "gradini");
3. si stima lo spettro di potenza su base annua per ogni coordinata (N,E,U) e si verifica se il comportamento spettrale si mantiene costante; si migliora la stima dello spettro di potenza considerando la mediana degli spettri annui;
4. si definisce un modello di segnale correlato (e, conseguentemente, un modello di rumore incorrelato) e si esegue il filtraggio (filtro di Wiener) dei residui delle serie di coordinate (N,E,U) rispetto all'interpolazione lineare robusta, in modo da separare un eventuale segnale stocastico correlato dal rumore incorrelato;
5. si verifica l'incorrelazione del rumore (test di "bianchezza" di Anderson): se il test è positivo la varianza del rumore di ogni coordinata è quella da utilizzare per imporre i vincoli; se è negativo si devono migliorare i modelli degli spettri di potenza del segnale e del rumore;
6. per quanto riguarda la stima delle coordinate delle SP IGS da utilizzarsi per l'inquadramento, la loro propagazione si basa sulla stima della velocità ottenuta dall'interpolazione robusta.

Evidentemente è anche indispensabile definire il criterio per l'elaborazione dei dati grezzi finalizzata all'inquadramento; a questo proposito, peraltro, si ritiene opportuno l'utilizzo di costanti, modelli e metodologie adottate in sede IGS.

È opportuno sottolineare che le coordinate delle SP della rete stimate sono evidentemente riferite all'epoca dell'inquadramento e che tutte le scelte effettuate, sia quelle relative a EOP, EPH, costanti, modelli e metodologie di elaborazione, sia quelle, certamente più arbitrarie, delle SP IGS da utilizzare per l'inquadramento, concorrono alla materializzazione del SR realizzato dalla rete regionale.

4 IL MONITORAGGIO DEL SISTEMA DI RIFERIMENTO

Le SP si muovono, sia per motivi geodinamici sia per eventuali fenomeni locali. Per monitorare l'evoluzione temporale delle coordinate, separando la componente geodinamica dai possibili movimenti locali (subsidenza, cicli termici o eventualmente cedimenti delle strutture, instabilità della materializzazione, ecc.) è perciò necessario che, da un lato, l'inquadramento di una rete regionale di SP sia ripetuto con continuità e, dall'altro, si predispongano delle reti di monitoraggio locale in corrispondenza di ogni SP. È importante che ciò sia effettuato per tutte le SP, indipendentemente dal tipo di monumentazione, che generalmente solo per alcune (se possibile almeno 3) può essere eseguito in modo idoneo a scopi geodinamici.

Tenendo conto dell'entità degli spostamenti geodinamici medi nel SR IGS in ambito nazionale (1-3 cm/anno), si ritiene che, eseguendo quotidianamente la ristima delle coordinate finalizzata al controllo di qualità complessivo della rete, sia sufficiente un aggiornamento settimanale delle coordinate delle SP di inquadramento, in modo da mantenerle coerenti con quelle delle stazioni IGS utilizzate anch'esse per l'inquadramento con precisione superiore al millimetro.

Con particolare riferimento alle operazioni di inquadramento, è opportuno sottolineare che sarebbe ottimale eseguire due tipi di soluzioni giornaliere, con scopi diversi. La prima soluzione è finalizzata innanzitutto al controllo in quasi tempo reale della qualità dei dati acquisiti e, perlomeno a livello centimetrico, della stabilità delle SP della rete; visti i fini succitati deve essere calcolata con la minima latenza possibile (ovvero alle ore 24 di ogni giornata) ed è quindi basata su EPH e EOP ultrarapidi IGS; tale compensazione non può quindi fornire l'inquadramento finale della rete, che viceversa richiede l'utilizzo dei prodotti finali (EPH, EOP, coordinate ecc.) IGS: perciò, in linea di massima, può essere effettuata senza includere alcuna SP IGS, vincolando semplicemente le coordinate di una SP della rete

regionale, per esempio quella baricentrica.

La soluzione finalizzata all'inquadramento della rete regionale deve viceversa essere calcolata con una latenza di circa 15 giorni, ovvero la latenza dei prodotti finali IGS, seguendo la procedura descritta nei paragrafi precedenti. Le soluzioni giornaliere, come è consuetudine nei centri di analisi delle reti internazionali, possono essere compensate in modo da produrre soluzioni settimanali; queste ultime, una volta accumulato un sufficiente numero di soluzioni, potranno quindi essere analizzate mediante procedure di interpolazione analoghe a quanto proposto per l'analisi delle serie delle SP IGS, in modo da ricavare e mantenere aggiornate con continuità le stime delle coordinate, delle velocità lineari e delle eventuali discontinuità delle SP della rete. Si noti che sulla base di tali parametri cinematici (coordinate, velocità e discontinuità) è possibile definire modelli cinematici per determinare le posizioni delle SP in prescelte epoche di riferimento; tali modelli, stimati puntualmente in corrispondenza delle SP, sono certamente necessari per poter integrare o confrontare (ad esempio per scopi di monitoraggio) rilievi appoggiati alla rete di SP eseguiti in epoche diverse.

Per quanto riguarda i monitoraggi locali, dopo un'accurata misura della rete locale all'epoca "zero", cioè dopo la sua istituzione, si ritiene debbano essere strettamente legati ai risultati dei calcoli giornalieri e settimanali e si debba intervenire quando questi risultati facciano sospettare fenomeni locali di deformazione o si abbia notizia di qualche evento deformativo avvenuto in prossimità del sito.

4.1 La strategia di calcolo implementata mediante il Bernese

Il calcolo periodico della rete richiede non solo un'elevata automazione, ma anche un'accurata ricerca dei dati e dei prodotti e la preparazione dei dati grezzi in accordo ai requisiti del programma adottato. La strategia di calcolo adottata dal Politecnico di Torino, Politecnico di Milano e la Sapienza Università di Roma, per la compensazione della rete regionale, si ispira alle procedure standard implementate dall'AIUB, dal CODE e alle raccomandazioni diffuse ai centri di calcolo della rete EPN, (Habrich et al., 2005). L'allineamento alle procedure standard è facilitato dall'uso del software Bernese versione 5.0 (Dach et al., 2007), la cui distribuzione include il file PCF RNX2SNX, input del Bernese Processing Engine (BPE). Tale file contiene i parametri standard per tutti i passi dell'analisi di dati RINEX, fino alla creazione dei file di risultati in formato SINEX. Per l'automazione del calcolo con il BPE si utilizza il programma NetDownload, sviluppato dall'unità di Torino, che serve a predisporre dati, cartelle e lanci per il calcolo automatico con il motore BPE del software Bernese 5.0. NetDownload è periodicamente aggiornato in conformità agli standard del software Bernese e agli standard IGS, in particolare quelli inerenti il sistema di riferimento, le effemeridi precise, i PCV, gli EOP, etc. Il software è disponibile all'indirizzo <http://antartica60.spaces.live.com/blog/cns!340535DA8086D35A!766.entry>.

NetDownload può essere lanciato da linea di comando o mediante file batch ed è sviluppato per piattaforma WIN32. È sviluppata anche una versione per LINUX, NextDownload, che può essere eseguita anche in Windows previa l'installazione del programma CygWin.

Le principali funzioni di NetDownload sono:

1. scaricare i file di orbite e atmosfera da Berna e dall'IGS,
2. scaricare i RINEX da vari FTP e HTTP (sono possibili personalizzazioni),
3. scaricare i SINEX dall'IGS,
4. ordinare i file scaricati per campagna nelle cartelle appropriate,
5. estrarre gli archivi .ZIP e .Z (UNIX compressed),
6. rinominare i file secondo convenzioni standard,
7. estrarre dai SINEX le coordinate delle stazioni e creare i file CRD,
8. creare file di serie temporali CRS, data una lista di stazioni,
9. interpolare le serie temporali calcolando ad una data stabilita coordinate a priori, velocità e deviazioni standard,
10. creare grafici delle serie temporali,
11. cancellare file obsoleti o vuoti,
12. creare in automatico grafici di serie temporali,
13. creare file batch per il lancio di BPE.BAT che usa lo script PERL *rtn_pcs.pl*.

È dotato di un help in linea, visibile con il comando *netdownload +h*.

Scelta e definizione del sistema di riferimento sono state discusse e coordinate con queste unità di ricerca, al fine di garantire la massima continuità e compatibilità tra reti attigue. La rete viene vincolata ad alcune stazioni della rete IGS prossime all'area di interesse, estrapolandone le coordinate a priori e le relative varianze dalle serie temporali di soluzioni settimanali pubblicate da IGS. A questo scopo è necessario individuare e gestire le discontinuità nelle serie temporali (non sempre documentate) e valutare, eventualmente con un metodo robusto, coordinate e velocità delle stazioni. Le varianze di tali coordinate sono infine calcolate dalle serie dei residui, e possono essere considerate realisticamente rappresentative della ripetibilità delle soluzioni IGS. Nel software di pretrattamento sono stati implementati tre algoritmi di regressione, che descriviamo sinteticamente.

1. Regressione lineare ai minimi quadrati classici, implementata nella routine *drline*, distribuita con le IMSL STAT/LIBRARY.

2. Regressione lineare robusta, implementata nella routine *medfit*. Le Numerical Recipes in Fortran al paragrafo 15.7 descrivono una routine per la regressione lineare robusta: il criterio applicato è la minimizzazione della deviazione assoluta (o in altre parole la somma del modulo degli scarti). Questo algoritmo funziona abbastanza bene quando un insieme di dati, non troppo grande rispetto all'intera popolazione della serie, segue una legge diversa da quella seguita dalla maggioranza della popolazione. Se ad esempio l'80% della popolazione segue la legge $y=mx+a$ e il 20% la legge $y=nx+b$, *medfit* restituirà i coefficienti m ed a della legge seguita dalla maggioranza (almeno il 60-70%) della popolazione.

3. Regressione lineare robusta mediante i Trimmed Least Squares (LTS): una soluzione decisamente più robusta, molto ben documentata e distribuita gratuitamente sono gli algoritmi scritti dal gruppo di Peter Rousseeuw (Università di Antwerpen, Belgio - <http://www.agoras.ua.ac.be/index.html>). È stato implementato l'algoritmo *fast-lts*, che consente di individuare discontinuità dell'entità anche di pochi mm. Altro pregio di questa routine è di fornire in output anche la lista dei dati inclusi nell'iterazione finale, consentendone l'uso per procedure di clustering; la regressione secondo i LTS è in grado di funzionare anche con il 50% dei dati inficiati da outlier.

I dati sono sottoposti a controllo di qualità secondo lo standard UNAVCO, e successivamente a pretrattamento per mezzo del modulo Bernese *rnxsmt*. *rnxsmt* rileva cycle slips e outlier nelle osservazioni di fase e codice, ed inoltre liscia le osservazioni di codice con le osservazioni di fase. La procedura di calcolo di *rnxsmt* è basata sull'utilizzo delle combinazioni lineari di fasi e codici di Melbourne-Wübbena (L6), Geometry-Free (L4) e Iono-Free (L3) ed è in grado di prescindere da effetti risultanti dalla posizione reciproca di satelliti e vertici della rete, dagli effetti di ionosfera e troposfera, nonché dai offset degli orologi. Non sono quindi necessarie informazioni geometriche a priori.

Un altro passo preliminare e di preparazione dei dati a disposizione è il calcolo dei offset degli orologi dei ricevitori, che permette la sincronizzazione delle osservazioni. Per far ciò è sufficiente la precisione con la quale vengono determinati assieme alle coordinate nel posizionamento di codice (1 ms \approx 300 m) e l'uso del programma *codspp*. Per questi calcoli si è adottato il modello troposferico di Saastamoinen.

La scelta delle basi della rete è automatica, ed è effettuata dal modulo *sngdiff* in base al criterio della minima distanza. La ricerca dei cycle slip è affidata al modulo *mauprp*. Il programma è in grado di processare sia differenze singole sia misure non differenziate: in ogni caso sono richieste orbite di precisione migliore del metro. Il programma può lavorare nell'ipotesi che le combinazioni Wide Lane non siano affette da cycle slip, il che è sicuramente vero se i dati di ingresso sono stati sottoposti a lisciatura preliminare; in alternativa può procedere allo screening dei salti nelle acquisizioni per le basi selezionate per il calcolo.

L'angolo di cut-off per le osservazioni è stato fissato a 10°. È stato a priori assunto il modello troposferico di Saastamoinen, mappato con la funzione dry Niell. Il ritardo troposferico zenitale viene mappato zenitalmente con la funzione Wet Niell. Il salvataggio delle equazioni normali consente il ricalcolo delle coordinate senza la necessità di un totale riprocessamento delle osservazioni; tale procedura si rende necessaria qualora si rilevino problemi su una o più stazioni utilizzate per definire il sistema di riferimento, o nel caso di ricalcolo dello stesso, come avviene nel periodo di passaggio a un nuovo sistema di riferimento.

A titolo di esempio si mostrano i risultati relativi ad un anno di controllo settimanale della SP di Como, appartenente alla rete di Regione Lombardia: è visibile, dal giorno 309, l'effetto dovuto al cambio di sistema di riferimento da IGB00 a IGS05; un altro esempio, collegato al controllo di qualità della rete, è mostrato nel Capitolo 3.

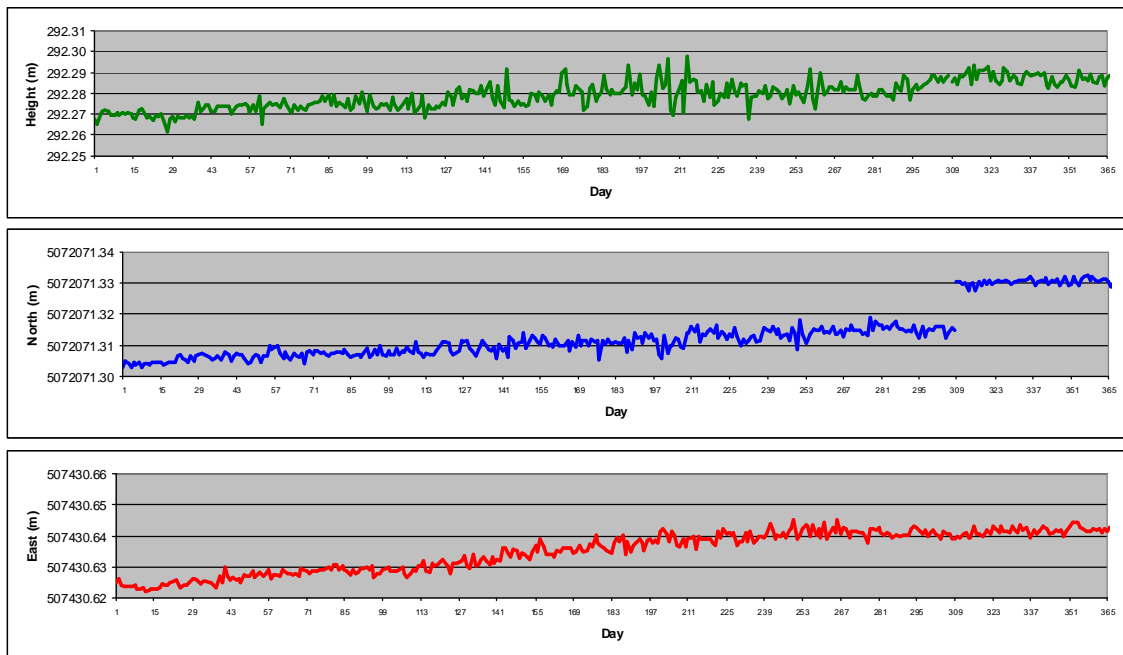


Figura 1. Evoluzione nel primo anno di monitoraggio (2006, SR IGS) delle stime giornaliere delle coordinate di una SP (Como) della rete della Regione Lombardia. Si noti la discontinuità (giorno 310) al passaggio da IGB00 a IGS05

5 LA DISTRIBUZIONE DEL SISTEMA DI RIFERIMENTO AGLI UTENTI: EVOLUZIONE NEL TEMPO DELLE COORDINATE

Si premette che la presente discussione si riferisce alle coordinate che una rete distribuisce nel messaggio di correzione o nei files dei dati e che ipotizziamo riferite al SR IGS: il problema della trasformazione delle coordinate a un altro eventuale sistema di riferimento cartografico (ad esempio ETRF89-IGM95) verrà trattato nel seguente paragrafo. L'esigenza di un aggiornamento continuo, ovvero settimanale, delle coordinate delle SP è pienamente fondata dal punto di vista scientifico ma può apparire problematica dal punto di vista dell'utenza; si deve quindi valutare per quali applicazioni della rete questo aggiornamento sia effettivamente significativo. Innanzitutto si consideri che, a meno di anomalie locali (sostanzialmente cedimenti strutturali), ci si attende che gli spostamenti delle SP siano dell'ordine di 1-3 cm all'anno. Distinguiamo quindi le applicazioni di una rete in due macro-categorie, essenzialmente in funzione dell'accuratezza richiesta, del metodo di rilievo e della tipicità dei relativi operatori; la prima macroarea è quella dei servizi di supporto a rilievi finalizzati a scopi topo-cartografici, ovvero con requisiti massimi di accuratezza dell'ordine di alcuni cm; vi è poi il campo dell'inquadrimento di reti locali finalizzate al controllo di precisione, come ad esempio il monitoraggio di frane o di strutture, ovvero con requisiti del cm o migliori.

Le applicazioni topo-cartografiche al presente, almeno in Italia, si basano ancora spesso sul post-processamento (PP) dei dati ma, in futuro, verranno tipicamente effettuate in tempo reale (RT); in prospettiva la distribuzione delle coordinate avverrà quindi tramite il messaggio RTCM, ma deve essere anche considerato il problema della distribuzione di coordinate nei relativi file RINEX. Per tali applicazioni, i rilievi e l'eventuale processamento dei dati sono operati da tecnici che, seppure specializzati, richiedono la massima semplificazione di approccio. L'aggiornamento delle coordinate delle SP può essere effettuato quando le loro stime siano variate di una quantità significativa e comparabile con le tipiche precisioni richieste, ad esempio ogni qualvolta siano cambiate di più di 1 cm:

ovvero, considerando nuovamente gli spostamenti tipici nel SR IGS e supponendo una ragionevole stabilità locale nella monumentazione delle SP, con una frequenza al più quadrimestrale

Poiché su scala regionale gli spostamenti sono abbastanza omogenei, l'aggiornamento può essere contemporaneo e schedato per tutta la rete. Per garantire la congruenza, le coordinate distribuite per il PP e quelle trasmesse per il RT dovranno essere tenute allineate.

In realtà le ragioni teoriche che reggono questa scelta, a parte il benefico aggancio ad un sistema globale con precisione subcentimetrica, sono esclusivamente legate alla possibilità, o all'alta probabilità della rete di raggiungere il fissaggio in tempo reale su tutte le stazioni. Questo risultato è compromesso in uno dei due casi:

1. le differenze di coordinate tra due qualsivoglia vertici della rete supera il centimetro;
2. le differenze in blocco di tutte le coordinate rispetto alla precedente realizzazione siano tali da non essere più coerenti con la precisione di EOP, delle effemeridi e di ogni altro prodotto IGS usato per il tempo reale. In tal caso hanno senso e sarebbero tollerabili spostamenti in blocco di alcuni centimetri.

Per differenze intendiamo le differenze fra i risultati di un periodico calcolo statico della rete, ma solo nel caso che la precisione di tali valori sia significativa.

L'aggiornamento delle coordinate richiede evidentemente che ogni rilievo sia temporeferenziato; vi è inoltre il problema delle discontinuità dei risultati per una campagna di misura condotta in un periodo che includa un aggiornamento. Nel RT il problema delle discontinuità è apparente: le coordinate trasmesse risultano trasparenti all'utenza e le discontinuità minori di 1 cm sono sicuramente inferiori, ovvero non distinguibili, rispetto alla precisione del metodo. Per il PP, in un'ottica di semplificazione per l'utente, è opportuno suggerire l'utilizzo delle coordinate relative alla prima giornata di misura per l'elaborazione e la compensazione di tutta la campagna. In quest'ottica quindi la temporeferenziazione di un rilievo sarà alla data del suo inizio.

A quanto detto, naturalmente, fa eccezione il caso in cui qualche SP abbia subito un comportamento difforme da quello tipico, ovvero quando il controllo di qualità a fine giornata abbia evidenziato una discontinuità anomala e inaccettabile. Tale stazione deve essere immediatamente esclusa dalla distribuzione (RT e PP); ovviamente le cause della discontinuità devono essere appurate, se possibile risolte e, nel tipico caso di una modifica irreversibile, la SP verrà resa nuovamente disponibile solo quando le sue coordinate siano state nuovamente stimate con ragionevole accuratezza.

Per le applicazioni di alta precisione, ovvero quando la rete di SP venga utilizzata per inquadrare ulteriori sottoreti locali di controllo, l'aggiornamento continuo (settimanale) delle coordinate può essere di effettiva utilità; oggi come oggi questa è però di una famiglia di applicazioni molto specifiche, tipicamente con finalità di ricerca scientifica e quindi condotte e analizzate da utenti con maggiori competenze. In tali applicazioni è proponibile quindi l'adozione di coordinate e varianze rigorosamente propagate nel tempo a partire dalle stime dei modelli cinematici, in modo analogo a quanto è già stato fatto per inquadrare la rete regionale.

Da ultimo si noti che dai modelli cinematici delle singole SP, opportunamente depurati dagli effetti di sito (ciclicità strutturali, discontinuità strumentali) si possono anche interpolare dei modelli di spostamento e stimare campi di deformazione regionali; questi, a loro volta, possono integrare l'analisi di serie di coordinate stimate da sottoreti locali, per separare l'analisi delle cinematiche locali dai fenomeni regionali: tale aspetto costituisce oggetto di ulteriori ricerche.

6 LA COERENZA FRA RETI CONTIGUE

Più critico appare il problema della coerenza fra coordinate calcolate da reti contigue ma indipendenti in quanto gestite da Enti diversi: si deve infatti evitare che utenti operanti sul confine fra due servizi ottengano risultati finali significativamente diversi a seconda della rete su cui si appoggiano. Tale problema è particolarmente sentito in Italia poiché le diverse reti si stanno sviluppando in modo indipendente su scala regionale e attualmente manca completamente un'autorità di coordinamento a livello nazionale.

Innanzitutto, si deve definire il limite al di sotto del quale si ritiene che la coerenza sia soddisfatta; tale

limite deve essere stabilito tenendo conto dell'accuratezza media del posizionamento conseguibile con le reti contigue, a sua volta dipendente dall'accuratezza con cui esse materializzano il SR IGS e dall'accuratezza del posizionamento rispetto alle rispettive materializzazioni del SR IGS conseguibile tramite i servizi di posizionamento erogati dalle reti. In tale ottica, e considerando anche le applicazioni di alta precisione, si ritiene che la coerenza debba essere contenuta assolutamente entro il millimetro in tutte le coordinate.

È innanzitutto evidente che la coerenza presuppone la definizione e la condivisione di protocolli comuni per la materializzazione dei SR (download ed elaborazione delle serie storiche di coordinate delle stazioni IGS da utilizzare per l'inquadramento, elaborazione delle osservazioni per l'inquadramento); a questo proposito si ricorda che presso il Politecnico di Torino, Sede di Vercelli si è implementato e si mantiene aggiornato il SW NetDownload, presso il Politecnico di Milano, Polo di Como si è implementata la procedura batch per l'esecuzione dell'inquadramento tramite il SW Bernese 5.0 e presso l'Area di Geodesia e Geomatica della Sapienza Università di Roma sono in corso di definizione e sperimentazione procedure per l'analisi delle serie storiche delle soluzioni settimanali IGS finalizzata alla stima delle coordinate settimanali e delle relative precisioni per le stazioni IGS di inquadramento.

Nel presente paragrafo si analizza innanzitutto il caso ideale di due reti contigue che condividano, oltre ai protocolli di elaborazione dei dati, anche la scelta delle SP IGS rispetto alle quali effettuare l'inquadramento; si vuole analizzare quale differenza vi sia nei risultati finali a seconda che le reti vengano compensate congiuntamente o separatamente. A tale scopo sono state utilizzate le reti regionali del Piemonte, costituita da 13 SP e operata dal Politecnico di Torino (<http://www.vercelli.polito.it/civili/topo0103.htm>) e la rete della Lombardia, costituita da 14 SP (<http://www.gpslombardia.it>) e operata da IREALP (<http://www.irealp.it>) in collaborazione con il Politecnico di Milano, Polo regionale di Como (<http://geomatica.como.polimi.it>). Di tali reti sono stati analizzati a titolo di prova le 4 settimane comprese fra i giorni 015 e 042 del 2006; in particolare sono state condotte le operazioni di inquadramento della sola rete piemontese, della sola rete lombarda e delle due reti congiuntamente; per tutte le prove è stato effettuato l'inquadramento in Igb00 adottando la seguente prassi:

1. utilizzo delle stazioni IGS di MATE, CAGL, MEDI, PADO, GRAZ, WTZR, ZIMM, IENG, GRAS e stima delle loro coordinate mediante interpolazione lineare delle ultime 52 settimane;
2. attribuzione alle coordinate interpolate di $\sigma = 2mm$ in planimetria e $\sigma = 4mm$ in quota: tali valori non hanno una reale giustificazione formale, ma semplicemente sono apparsi coerenti con la ragionevole accuratezza delle serie interpolate;
3. utilizzo di EPH e EOP finali di IGS, elaborazione dei dati grezzi con il SW BERNESE 5.0 adottando gli standard internazionali per reti di estensione regionale.

In ognuna delle tre prove i dati sono stati elaborati su base quotidiana: le tre soluzioni finali sono state ottenute compensando (con Bernese 5.0 e software Compare) le rispettive 28 soluzioni giornaliere. Si noti che le tre operazioni di inquadramento sono state condotte in modo indipendente, ovvero ripartendo ogni volta dai dati RINEX, e che la costruzione delle singole differenze, ovvero delle basi, si è basata sul principio automatico della minima distanza; inoltre, rispetto a quanto si dovrebbe fare in una reale operazione di inquadramento, non sono stati rimossi gli outlier presenti in alcune soluzioni quotidiane: ciò rende i confronti ancora più sensibili. Sono quindi stati confrontati, per ogni SP, i risultati finali dell'inquadramento congiunto con quelli degli inquadramenti disgiunti. Come si vede dalla Tab. 2, tali confronti mostrano statistiche decisamente soddisfacenti, e pienamente coerenti con i requisiti ipotizzati: ovvero, reti contigue possono essere inquadrate separatamente senza perdita di coerenza, purché condividano le SP utilizzate per l'inquadramento e i protocolli di elaborazione dei dati grezzi.

Più critico appare il problema della coerenza fra reti che non condividano le SP IGS utilizzate per l'inquadramento. Inoltre, poiché le stazioni IGS in ambito nazionale sono poche e non omogeneamente distribuite (Fig 2), è necessario far ricorso a stazioni IGS estere; questo è certamente possibile in Italia settentrionale ma diventa problematico nelle regioni centromeridionali, per mancanza di stazioni affidabili nei paesi vicini (Penisola Balcanica, Nord Africa). Da un punto di vista generale, la situazione ottimale richiederebbe dunque una densificazione della rete IGS in ambito nazionale in modo tale da disporre di un sufficiente numero di stazioni IGS comuni per eseguire l'inquadramento in ogni regione:

ciò peraltro non è controllabile in modo diretto, in quanto dipende dalla politica di densificazione applicata in sede IGS: una possibile soluzione potrebbe essere quella di definire una densificazione “convenzionale” della rete IGS a livello nazionale. Questa rete potrebbe funzionare da rete di riferimento rispetto alla quale verificare la coerenza delle reti regionali.

	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
Medie	0.3	-0.2	-0.1
RMS	0.4	0.1	0.2
Min	-0.5	-0.4	-0.4
Max	0.9	0.0	0.3

Tabella 2. Reti piemontese e lombarda: statistiche delle differenze fra inquadramenti congiunto e separato



Figura 2. Le stazioni permanenti IGS in Italia e nazioni limitrofe (28 ottobre 2006)

7 LA CONNESSIONE CON ALTRI SISTEMI DI RIFERIMENTO

È ben noto che in ambito nazionale (non solo italiano) sono correntemente utilizzati per applicazioni topo-cartografiche SR (e corrispondenti sistemi cartografici) diversi dal SR IGS.

È subito opportuno distinguere tra SR di diversa origine, quali i sistemi ROMA1940, ED1950 oppure i sistemi locali utilizzati in ambito catastale, basati su misure terrestri e caratterizzati da precisioni relative intrinseche medie dell'ordine di qualche decimetro, ed il sistema ETRF89-IGM95, caratterizzato da precisioni superiori di circa un ordine di grandezza (alcuni centimetri) rispetto alle precedenti. In questa sede si considera il problema della trasformazione tra IGB00 ed ETRF89-IGM95.

È innanzitutto utile notare che, sebbene a un diverso e significativamente più elevato livello di precisione (ordine di grandezza centimetrico), ci si trova qui ad affrontare un problema già ben noto e considerato, ad esempio, quando, nel corso degli anni '50, l'introduzione del sistema ED1950 ha messo in evidenza deformazioni presenti nel sistema ROMA1940, e quando, durante gli anni '90, l'introduzione del sistema ETRF89-IGM95 ha nuovamente evidenziato, ad un livello di precisione superiore, le deformazioni dei sistemi ROMA1940 e ED1950.

Ora, il livello di precisione consentito dalle attuali disponibilità tecnologiche ci sta mostrando che un sistema statico come ETRF89-IGM95, anche se realizzato per mezzo del GPS, appare inadeguato nel

senso che manifesta significative deformazioni rispetto alla realtà fisica attuale del nostro territorio: tale sistema di riferimento quindi non permette una rappresentazione di posizioni di punti altrettanto accurata quanto quella possibile in una realizzazione di ITRS e dovrebbe essere utilizzato solo per applicazioni di tipo topo-cartografico, mai per il controllo del territorio. Ciò detto è comunque chiaro che, almeno nella normativa cartografica attuale, un servizio di posizionamento deve garantire ai propri utenti la possibilità di trasformare i risultati a tale sistema di riferimento.

Si ritiene innanzitutto che, su scala nazionale, la trasformazione da IGS a ETRF89-IGM95 richieda una trasformazione di similarità a 7 parametri da IGS a ETRF corrente combinata con un eventuale campo di deformazione di ETRF89-IGM95 rispetto a ERTF. Da un punto di vista pratico si consideri inoltre che, come già scritto, in Italia le reti regionali stanno sviluppandosi in modo spazialmente disomogeneo e discontinuo. Una scelta ragionevole potrebbe essere quella che le reti regionali già attive adottino una trasformazione di similarità condivisa a livello nazionale; quindi ciascuna rete o agglomerato di reti contigue potrebbe stimare localmente, mediante campagne di misura su un numero significativo di punti IGM95, il campo residuo di deformazione; naturalmente in prospettiva, a valle di una analoga campagna di rilievo nazionale, il campo residuo potrebbe essere parametrizzato per l'intera Italia anziché su scala regionale o di agglomerati di regioni.

Per quanto riguarda la trasformazione di similarità, una prima ipotesi potrebbe essere quella di adottare la trasformazione fra ITRF e ETRF pubblicata sul sito di EUREF (*Boucher, Altamimi, 2001*), in quanto trasformazione ufficiale di un organismo IAG. Ciò pone innanzitutto un problema di ordine pratico, poiché tale formula implica l'utilizzo della velocità nel sistema ETRF del punto di calcolo; naturalmente si può adottare una velocità comune e media per il territorio di interesse e questo è stato l'approccio adottato a livello regionale nella fase di avviamento della rete della Lombardia (si veda l'appendice 1). Si nota che l'ipotesi di una velocità media comune è equivalente ad applicare una trasformazione di similarità senza fattore di scala: se in un'ottica regionale ciò può essere ragionevole, non lo è per una nazione come l'Italia, notoriamente soggetta a fenomeni compressivi; si potrebbero percorrere ulteriori vie in tale direzione, come ad esempio interpolare il campo di velocità in diversi punti della nazione, e quindi stimare un fattore di scala nazionale: tali scelte risulterebbero però piuttosto macchinose e comunque arbitrarie.

Un'alternativa molto più semplice, e questa è la strada che si propone, è la seguente; si possono utilizzare le SP nazionali (ed eventualmente quelle appena oltre confine) che appartengano sia alla rete IGS sia alla rete EPN: per l'Italia, ad esempio, queste sono 11.

Per ciascuna di tali SP sono disponibili le stime ufficiali delle coordinate, sia nel SR IGS sia in ETRF2000-EPN: tali coordinate possono dunque essere utilizzate per la stima dei parametri di una trasformazione nazionale fra i due sistemi di riferimento. A tale riguardo si noti il seguente aspetto computazionale: la stima a minimi quadrati dei 7 parametri di una trasformazione geocentrica da reti di estensione nazionale può risultare internamente consistente ma globalmente mal condizionata; per tale motivo si ritiene opportuno che la stima dei parametri avvenga mediante una trasformazione baricentrica.

Per quanto riguarda la modellizzazione del campo di deformazione residuo, questa può essere condotta mediante l'approccio classico di stima mediante il metodo della collocazione (*Moritz, 1980*) scindendo il campo in una componente deterministica e in una stocastica. Non si dispone di un numero sufficiente di riscontri a livello nazionale mentre a livello locale alcuni test sono stati condotti sulle reti di Lombardia e Piemonte (*Biagi et al.*, appendice al presente capitolo, pubblicazione in stampa): in tal caso la semplice adozione di un modello lineare per la componente deterministica, la stima e l'applicazione dei relativi parametri, porta già a residui spazialmente incorrelati.

Un'ultima ipotesi, puramente locale, potrebbe essere quella di stimare un diverso set di parametri della trasformazione di similarità fra SR IGS e ETRF89-IGM95 per ogni rete regionale. Tale approccio presenta apparentemente due vantaggi: innanzitutto, probabilmente, a livello di singola regione la trasformazione può già essere ben rappresentata da una trasformazione a 7 parametri, senza bisogno di un ulteriore campo di deformazione; inoltre le singole reti potrebbero muoversi autonomamente, senza bisogno di faticose sinergie. Il problema principale di tale approccio è che le stime regionali della trasformazione perdono di significatività al bordo e comportano comunque inaccettabili discontinuità al confine fra regioni contigue: ad esempio le trasformazioni stimate in tal modo separatamente per le regioni Lombardia e Piemonte hanno dimostrato discontinuità al confine dell'ordine di 5 cm in planimetria e 10 cm in altimetria: ciò è evidentemente inaccettabile e preclude tale approccio.

	BA Nord	BA Est	BA Up	IE1 Nord	IE1 Est	IE1 Up	IE2 Nord	IE2 Est	IE2 Up
E	0.5	0.1	4.2	1.0	0.9	1.0	0.0	0.0	0.0
SQM	1.7	2.4	4.5	1.7	2.5	4.2	1.5	1.6	4.0
Min	-2.4	-4.6	-5.8	-1.8	-4.0	-9.6	-2.6	-3.6	-11.7
Max	4.0	4.7	12.2	4.7	5.5	8.1	3.4	4.2	5.7

Tabella 3. Statistiche di confronto sulle trasformazioni da IGB00 a ETRF89-IGM95: esempio sulla sola regione Lombardia. Le statistiche sono state così ottenute: per 28 punti IGM95 omogeneamente distribuiti sulla regione sono state rilevate le coordinate IGB00 mediante rilievo statico rispetto alla rete regionale e post-processamento dei dati; le coordinate sono quindi state trasformate in ETRF2000 mediante le diverse trasformazioni sopra proposte; i valori trasformati sono stati confrontati con i valori ETRF89-IGM95 monografati. BA: trasformazione di Boucher Altamimi; IE1: trasformazione stimata da coordinate IGS e EPN; IE2: IE1 più campo di deformazione lineare. Si noti che le coordinate ETRF89-IGM95 sono caratterizzate da precisioni nominali di circa 1-2 cm in planimetria e 3-4 cm in quota; dalle statistiche non sono stati esclusi 4 punti contigui nel nord della regione, per i quali è nota una deformazione in quota di circa 10 cm.

Si nota che la distribuzione all'utenza dei 7 parametri della trasformazione di similarità fra SR IGS e ETRF corrente non pone problemi di tipo operativo. Nel RT è pur vero che l'attuale protocollo RTCM (RTCM, 2004) non prevede la trasmissione di parametri di trasformazione fra sistemi di riferimento; però tutti i ricevitori di recente costruzione permettono all'operatore di impostare i 7 parametri di una trasformazione di similarità fra coordinate ottenute nel rilievo in tempo reale e coordinate da trascrivere nel file dei risultati; nel caso del PP, ciò è altrettanto vero per i programmi di postelaborazione dei dati. Perciò è sufficiente che un servizio di posizionamento pubblici sul proprio sito le stime dei parametri di trasformazione e le istruzioni per il loro corretto utilizzo nei principali modelli di ricevitore e nei principali programmi di postelaborazione dei dati.

Più problematico appare il problema di applicare ai risultati il campo di deformazione residuo fra ETRF corrente e ETRF89-IGM95; peraltro, analizzando il caso di Lombardia e Piemonte, l'entità delle deformazioni residue non appare significativa rispetto alle precisioni del RT: ovviamente ulteriori approfondimenti saranno necessari con la disponibilità di nuove reti regionali; per il PP si possono sempre implementare opportuni programmi che applichino la trasformazione completa.

Infine, considerando da un lato l'esigenza dell'aggiornamento continuo (settimanale) delle coordinate delle SP e, dall'altro, la precisione intrinseca del sistema ETRF89-IGM95, si ritiene che l'aggiornamento dei parametri di trasformazione tra IGB00 e ETRF89-IGM95 possa avere frequenza analoga a quella con cui vengono aggiornate le coordinate IGS distribuite per applicazioni topo-cartografiche.

8 CONCLUSIONI E PROBLEMI APERTI

Si ritiene particolarmente cruciale il problema della materializzazione e della distribuzione del sistema di riferimento all'utenza delle reti regionali per il posizionamento satellitare; si pone infatti un problema di coerenza fra coordinate distribuite da reti contigue ma indipendenti in quanto gestite da enti diversi: si deve infatti evitare che utenti operanti sul confine fra due servizi ottengano risultati finali significativamente diversi a seconda della rete su cui si appoggiano. In particolare in Italia il problema appare particolarmente sentito perché tali reti si stanno sviluppando autonomamente su scala regionale, senza una effettiva autorità di coordinamento nazionale.

Il presente lavoro ha proposto alcune ipotesi che si ritiene possano minimizzare tale rischio; peraltro rimangono alcuni punti critici.

Uno fra questi, forse il più rilevante e comunque ancora da analizzare pienamente, risiede nel fatto che reti contigue possono utilizzare per l'inquadramento stazioni IGS diverse, solo parzialmente comuni. In particolare in ambito italiano le SP IGS sono poche e non omogeneamente distribuite; considerato che, da un punto di vista generale, la situazione ottimale richiederebbe la densificazione della rete IGS in modo tale da disporre di un sufficiente numero di stazioni IGS per eseguire l'inquadramento in ogni regione, ma

ciò è evidentemente non controllabile direttamente, in quanto dipende dalla politica di densificazione della rete applicata in sede IGS, una possibile soluzione potrebbe essere quella di definire una densificazione “convenzionale” della rete IGS a livello nazionale. Questa rete potrebbe funzionare da rete di riferimento rispetto alla quale verificare la coerenza delle reti regionali: a questo proposito si tratta di definire il ruolo di questa rete di riferimento ed i criteri di verifica; vi sono almeno due possibilità:

1. si scelgono alcune stazioni a livello nazionale le cui coordinate vengono confrontate con quelle calcolate all'interno delle singole reti regionali di cui fanno parte e si accetta la coerenza entro una certa tolleranza;
2. si scelgono alcune stazioni a livello nazionale e si impongono le coordinate di tali stazioni uguali nelle reti regionali e nella rete nazionale.

Si sottolinea infine che sarebbe altresì opportuno che tutte le scelte relative ai SR (in particolare quelle relative alle connessioni con SR preesistenti) fossero condivise con tutti i soggetti che realizzano e gestiscono DB cartografici (ovvero con gli Enti cartografici). Si auspica peraltro che, in futuro, si possa lavorare sempre in un solo SR globale, dopo aver trasformato in esso tutte le informazioni cartografiche disponibili.

ACRONIMI ADOTTATI

BIH: Bureau International de l'Heure; BPE: Bernese Processing Engine; DB: database; ED50: European Datum 1950; EPN: European Permanent Network; EOP: Earth Orientation Parameters; EPH: efemeridi precise IGS; ETRS89: European Terrestrial Reference System 1989; ETRFyy: European Terrestrial Reference Frame, anno yy; EUREF: European Reference Frame IAG Subcommittee; IAG: International Association of Geodesy; IERS: International Earth Rotation and Reference Systems Service; IGM: Istituto Geografico Militare Italiano; ITRS: International Terrestrial Reference System; ITRFyy: International Terrestrial Reference Frame, anno yy; GNSS: Global Navigation Satellite Systems; HW: hardware; GPS: Global Positioning System; IGS: International GNSS Service; LTS: Least Trimmed Squares; PCV: Phase Center Variation; PP: Postprocessamento; RINEX: Receiver Independent Exchange Format; RT: tempo reale; RTCM: Radio Technical Commission for Maritime Services; SINEX: Solution Independent Exchange Format; SLR: Satellite Laser Ranging; SP: Stazione/i Permanente/I; SW: software; TCG: Geocentric Coordinate Time; VLBI: Very Long Baseline Interferometry.

BIBLIOGRAFIA

- Adam J., et al, *The European Reference System coming of age*, Geodesy Beyond 2000, IAG General Assembly, Birmingham July 1999, K. P Schwarz eds., IAG Symposia , Vol. 121, Springer-Verlag, Berlin, 1999.
- Baiocchi N V., Crespi M., De Lorenzo C., *Trasformazione di datum e di coordinate per scopi cartografici: analisi delle prestazioni di alcuni software*, Documenti del territorio, n. 49, 2002.
- Barzaghi R., Borghi A., Crespi M., Pietrantonio G., Riguzzi F., *GPS permanent network solution: the impact of temporal correlations*, V Hotine Marussi Symposium on Mathematical Geodesy, Matera, Italy, June 2003, IAG Symposia, Vol. 127, Springer-Verlag, Berlin, 2004.
- Beutler G., Rothacher M., Schaer S., Springer T.A., Kouba J., Neilan R.E., *The International GPS Service (IGS): An Interdisciplinary Service in Support of Earth Sciences*, Adv. Space Res. Vol. 23, No 4, 1999.
- Biagi L., Sansò F. eds, AAVV, *Il Servizio di Posizionamento in Regione Lombardia e la prima sperimentazione sui servizi di rete in tempo reale*, Bollettino SIFET n°3, 2006.
- Biagi L., Caldera S., Sansò F., Visconti M. G., *Parametri di trasformazione fra coordinate rete e coordinate utente per la Regione Lombardia*, <http://geomatica.comopolimi.it/prin/>, 2005.
- Biagi L., Caldera S., Visconti M. G., *A first estimate of the transformation from the global IGS and the Italian ETRF89-IGM95 RF for the Italian Peninsula*, in fase di peer review per la pubblicazione sugli atti (IAG Symposia Volumes) del convegno GRF2006, Monaco.
- Biagi L., Crespi M., Manzino A., Sansò F., *I servizi di posizionamento basati su reti di stazioni permanenti GNSS*, relazione invitata alla 9a Conferenza ASITA, 2005, Catania, Bollettino SIFET n° 1, 2006.
- Boucher C., Altamimi Z., Memo, *Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign*, <http://lareg.ensg.ign.fr/EUREF/>, 2001.

- Boucher C., Altamimi Z., Sillard P., Feissl-Vernier M., *The ITRF2000*, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, ISBN 3-89888-881-9, 2004, 270 + 19 pp. online version at: <http://www.iers.org/iers/publications/tn/tn31/>
- Cina A., Manzano A., Piras M., Roggero M., *Rete test in Piemonte, impianto e risultati*, in Bollettino SIFET, No 2, 2004.
- Davis P., Blewitt G., *Methodology for global geodetic time series estimation: a new tool for geodynamics*, Journal of Geophysical Research, vol 105, No B5, May, 10, 2000.
- Donatelli D., Maseroli R., Pierozzi M., *La trasformazione tra sistemi di riferimento utilizzati in Italia*, Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, No 4, 2002.
- Ferland R., Gendt. G., Schone T., *IGS Reference Frame Maintenance*, Proceedings of IGS: Celebrating a decade of the International GPS Service, Berne, March 1-5, 2004, AIUB, Berne, 2004.
- Ferland R., *IGS00 (v2)*, IGSMail-4642, 2003.
- Geodesist's Handbook*, Bulletin Geodesique, 66, 1992.
- IGS, *IGS celebrating a decade of the International GPS Service Workshop & Symposium*, Proceedings of IGS: Celebrating a decade of the International GPS Service, Berne, March 1-5, 2004, AIUB, Berne, 2004.
- Kouba J., Ray J., Watkins M. M., *IGS Reference Frame Realization*, 1998 IGS Analysis Center Workshop Proceedings, European Space Operations Centre, Darmstadt, Germany, 1998.
- Leroy A., Rousseeuw P., *Robust Regression and Outlier Detection*, J. Wiley & Sons, 2003.
- McCarthy D., Petit G., *IGS Conventions 2003*, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, on-line su <http://www.iers.org/iers/publications/tn/tn32/>, 2004 on-line su <http://www.iers.org/iers/publications/tn/tn32/>, 2003.
- Moritz H., *Advanced physical geodesy*, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1980.
- Ray J., Dong D., Altamimi Z., *IGS Reference Frame: Status and Future Improvements*, Proceedings of IGS: Celebrating a decade of the International GPS Service, Berne, March 1-5, 2004, AIUB, Berne, 2004.
- Reina G., Crespi M., *Reti di stazioni permanenti GNSS a supporto dell'aggiornamento di un DB cartografico: il caso della cartografia catastale*. 9a Conferenza ASITA, 2005.
- Steigenberger P., Romero I., Fang P., *Reprocessing Issues, Standardization, New models*, Position Paper at IGS Workshop 2006.
- Surace L., *La nuova rete geodetica nazionale IGM95: risultati e prospettive di utilizzazione*, Bollettino di Geodesia e Scienze affini, Anno LIV, N° 2, 1995.

