

NUOVI METODI DI RILEVAMENTO A SUPPORTO DELLA CARTOGRAFIA

NEW SURVEYING METHODS FOR MAPPING

Maurizio Barbarella*

Riassunto

Nell'ambito delle attività finalizzate alla realizzazione di Cartografia e di Basi di Dati Territoriali, le moderne tecnologie mettono a disposizione tecniche di rilievo che, fatta salva la precisione necessaria alla scala della carta da costruire, consentono un alto livello di produttività. Una fase importante del processo di rilevamento della posizione dei punti utili alla realizzazione della Cartografia è quella dell'inquadramento nel Sistema Cartografico Nazionale. A questo proposito occorre considerare le novità intervenute nella definizione da parte dell'IGM del nuovo riferimento geodetico italiano, oggi incentrato nel frame denominato Rete Dinamica Nazionale.

Nella nota si presentano alcuni elementi di recente introduzione nella pratica operativa del rilievo, ormai incentrato sull'uso di ricevitori satellitari, in particolare le strutture che consentono il rilievo di precisione in tempi brevissimi, le reti di stazioni permanenti interoperanti in tempo reale.

Abstract

The surveying of points to carry out the photogrammetric and mapping process can be done with modern techniques, subject to two principal requirements: to achieve the accuracy necessary for the scale of the map to be built, but also allowing a high level of productivity. In the process of acquisition of the points position is included the phase of insertion of the new network in the national geodetic frame and in the Cartographic System. In the note we present some innovative features: the current geodetic infrastructure (RDN) that allows the inclusion in the National Geodetic and Cartographic System, the evolution of the GPS technique, from static GPS baseline to the real time surveys allowed by the use of NRTK.

Introduzione

Il progresso tecnologico e scientifico degli ultimi anni ha messo a disposizione dei ricercatori e dei tecnici che operano nel settore della Cartografia e della Topografia dei prodotti – strumenti, tecniche, infrastrutture – che hanno fortemente innovato la prassi operativa e diversificato la gamma di prodotti cartografici ottenibili (Bianchin 2009). Ci si riferisce in particolare,

- sul fronte strumentale e delle metodologie teoriche e operative, a:
 - Immagini satellitari ad alta risoluzione sia sul Pancromatico, che sul multi spettrale;

* DISTART– Università di Bologna - Viale Risorgimento, 2 40134 - Bologna . 051 tel. 2093106 - maurizio.barbarella@unibo.it

- Riprese radar, Interferometria SAR
- Camere fotogrammetriche digitali aeree
- Laser Scanner aviotrasportato o e terrestre;
- Integrazione di sistemi inerziali (IMU) con altri sensori;
- Mezzi di rilievo ad alta produttività (Mobile Mapping System)
- Fotogrammetria “diretta” (tramite l’impiego di IMU e GPS) ,
- geodatabase, Sistemi Informativi geografici, Location Based Services
- sul fronte delle Infrastrutture geodetiche e topografiche:
 - Sistemi Geodetici Globali di Riferimento di facile accesso (ITRF, ETRF) e Reti Geodetiche Nazionali statiche e Dinamiche
 - Strutture per il rilievo GPS in tempo reale (Reti NRTK)
 - Strutture di trasmissione dati di misura (telefonia cellulare, satellitare, wireless)

Alcune di queste novità hanno un impatto diretto sulle procedure di realizzazione della cartografia e sono ben note negli ambienti della Associazione Italiana di Cartografia, basti pensare alla realizzazione di ortofotocarte digitali, la fotogrammetria diretta, i database topografici e i Sistemi informativi Territoriali (SIT).

Nel seguito ci si limita a descrivere alcuni aspetti innovativi e tecniche di rilievo che più da vicino sono venute a far parte parte dell’attuale bagaglio operativo del topografo rilevatore a terra evidenziando mutamenti, limiti e vantaggi che tali tecniche e metodologie comportano nel processo di produzione di cartografia.

1. Fasi della produzione di cartografia

La tipologia di prodotto alla quale si fa riferimento è la cartografia numerica a scale che vanno da 1:10000 a 1:1000, o anche superiori. Oggi, il prodotto cartografico numerico viene strutturato attraverso la realizzazione di una Database Topografico, che include il riferimento territoriale sul quale insistono poi tutte le informazioni semantiche che rendono tale una cartografia. In alcune delle fasi di produzione e collaudo della Cartografia viene coinvolto più pesantemente l’aspetto di rilievo topografico a terra. Seguendo l’approccio suggerito da prassi consolidate, nonché da numerosi Capitolati, le fasi di produzione possono essere sintetizzate nelle seguenti:

Acquisizione di informazione metrica	Volo fotogrammetrico/acquisizione dell’immagine Inquadramento a terra nel sistema di riferimento assoluto e Triangolazione Aerea
Esplorazione dei dati e restituzione delle informazioni metriche	Restituzione Ricognizione / integrazione a terra
Realizzazione del prodotto cartografico	Strutturazione data base Disegno

Le innovazioni degli ultimi 10-15 anni hanno riguardato tutte le fasi della produzione di cartografia, ma in particolare hanno avuto impatto sul rilievo topografico che interviene pesantemente nelle prime due fasi che richiedono il posizionamento dei sensori (Camere fotogrammetriche e

da telerilevamento, Lidar) , e dei punti a terra indispensabili all'orientamento assoluto dei fotogrammi nonché le operazioni di rilievo necessarie alle integrazioni e verifiche. La Geodesia deve a sua volta definire e fornire il Frame, la Rete nel cui ambito inserire nel modo più semplice e corretto il rilievo e quindi tutti gli elementi della restituzione cartografica.

Limitandoci al contributo della Topografia alla Fotogrammetria, prima di descrivere le novità salienti nelle tecniche di rilievo tramite GPS, si ritiene opportuno premettere una brevissima analisi delle strutture geodetiche disponibili sul territorio italiano che realizzano il Sistema di Riferimento Nazionale nel quale inserire il rilievo e quindi la cartografia o il SIT.

2. Infrastrutture Geodetiche di Riferimento

Il tradizionale approccio utilizzato per inserire una Cartografia nel Sistema Cartografico Nazionale è consistito e nell'esecuzione di operazioni di *raffittimento* della Rete Geodetica nazionale per determinare i punti a terra necessari all'inquadramento, con la successiva integrazione per via essenzialmente fotogrammetrica di ulteriori punti di appoggio, tramite le operazioni di Triangolazione Aerea.

La rete trigonometrica tradizionale presente dell'area interessata dalla Cartografia che può essere usata per l'inquadramento è costituita in pratica principalmente dai vertici di terzo ordine, che sono i più diffusi sul territorio, e talvolta da vertici della rete di secondo ed eventualmente di primo ordine, a maggior distanza tra loro. Il raffittimento andava progettato a partire da questo inquadramento per aumentare la densità dei punti noti collegati alla Rete Trigonometrica IGM, fino al punto da consentire la determinazione dei Punti Fotografici di Appoggio utili a proseguire o direttamente con l'orientamento assoluto dei fotogrammi (nel caso di piccole aree, o per la grandissima scala) oppure ad alimentare il processo di Triangolazione Aerea dei blocchi che genera i punti che consentono l'orientamento assoluto dei singoli modelli o fotogrammi. Operazioni queste da effettuare necessariamente in sequenza, impegnative nei costi e tali da richiedere tempi non brevi per la loro esecuzione.

Fin tanto che si è operato con strumenti di rilievo puramente terrestri , cioè con teodolite e distanziometro, un fattore critico è rappresentato dalla intervistibilità tra i punti, che lega la scelta dei nuovi vertici di raffittimento e impone talvolta l'aumento del numero delle stazioni necessarie per i collegamenti tra la Rete Trigonometrica e i punti di dettaglio.

L'introduzione nella prassi operativa usuale delle tecniche di rilievo tramite satelliti artificiali, il GPS in pratica, ha rivoluzionato l'approccio di campagna, consentendo una assai più elastica scelta dello schema di rilievo, in quanto non è necessaria l'intervistibilità tra i punti da collegare e la precisione e l'impegno richiesto dal rilievo non sono che in piccola parte legati alla distanza tra i punti collegati.

Viene così a mancare, o ridursi fortemente, il ruolo della rete di raffittimento quale intermedia tra la Rete Nazionale e i punti di dettaglio necessari per l'appoggio fotogrammetrico. La necessità di operare 'a cielo aperto', ossia con ampia visibilità verso i satelliti, impone però dei vincoli, non possono essere direttamente rilevati con GPS punti materiali con sviluppo verticale, quali ad esempio spigoli di fabbricati, o non stazionabili: da qui la necessità talvolta di ulteriore rilievo di dettaglio con strumenti tradizionali quali stazioni totali.

2.1 Sistema Geodetico nazionale e Reti d'inquadramento: Trigonometrica e Fondamentale GPS

Si ricorda che il sistema di Riferimento Nazionale Italiano è costituito dal Sistema Geodetico Roma 40 associato alla rappresentazione cartografica Gauss-Boaga e che la sua realizzazione pratica, il suo Frame per usare un moderno termine tecnico, è costituita dalla Rete Trigonometrica Nazionale, articolate in ordini gerarchici (primo, secondo,terzo): ad essa si è fatto cenno precedentemente descrivendo i passi necessari al rilievo tradizionale per l'appoggio fotogrammetrico. La tipologia dei punti del frame trigonometrico tradizionale (pilastrini, assi di campanili) era legata alle caratteristiche della strumentazione impiegata per la sua determinazione e per il suo uso da parte del rilevatore.

Lo sviluppo della tecnica di rilievo satellitare GPS rende inadeguato il Frame costituito dalla rete Trigonometrica, visto che è necessario fare stazione sul punto da determinare con il ricevitore GPS, avere il cielo sgombro per ricevere i segnali senza ostacoli o occlusioni e possibilmente arrivare in macchina nelle immediate vicinanze della stazione.

Nella seconda metà degli anni '90 l'IGM realizza una Rete Nazionale GPS denominata IGM95 che diventa il nuovo Frame nazionale ed è costituito inizialmente da oltre milleduecento punti occupabili con i ricevitori, con interdistanza media di meno di 20 km, costituenti un unico ordine, di grande omogeneità e affidabilità e con una precisione ben superiore alla Rete Trigonometrica, ovvio risultato derivante delle caratteristiche della nuova strumentazione.

Le due reti, la Trigonometrica tradizionale e la IGM95 (fig.1) sono comunque completamente integrate grazie all'esistenza di centinaia di punti comuni. Il Sistema Geodetico rimane lo stesso, Roma 40 e così pure il sistema cartografico adottato (il Gauss Boaga): solo che ora appaiono nelle monografie anche le coordinate geografiche (e cartografiche) nel sistema WGS84 (e UTM_WGS84), sistema proprio della tecnica GPS, di valenza ovviamente mondiale. Il Frame Italiano viene a dipendere da Sistemi Geodetici Globali, che non interessano più solo specificatamente l'Italia, ma la integrano con la struttura geodetica mondiale.

Più recentemente sono stati eseguiti dei raffittimenti della Rete a cura del Catasto da un lato e di Regioni e Province, finalizzati a rendere più densa la rete di punti materializzati stabilmente noti nel sistema nazionale, in modo da ridurre l'interdistanza tra i vertici e renderne più agevole l'occupazione da parte del tecnico rilevatore; le Regioni in particolare hanno promosso il raffittimento a 7 km; la collaborazione con l'IGM farà sì che i nuovi punti



Fig. 1 - Rete Fondamentale GPS IGM95 e Rete Trigonometrica classica

vengano anch'essi a far parte del frame nazionale. Ad operazione completata dunque, si dovrebbe disporre – mediamente – di un punto ogni 7 km circa materializzato e monografato e noto nel Sistema Nazionale.

2.2 Sistemi di riferimento Globali e loro Frame

L'introduzione nel sistema nazionale delle coordinate di valenza mondiale (sistema WGS84) porta a dover fare riferimento ai sistemi rigorosamente definiti a livello globale, su tutta la terra.

A livello mondiale si definiscono tanto gli aspetti teorici dei Sistemi di Riferimento (System) quanto le *realizzazioni operative* di detti sistemi con le Reti di punti (Stazioni Permanenti) definenti il Frame. Il Sistema di Riferimento Terrestre, cioè solidale con la Terra, che viene generalmente adottato è l'ITRS (International Terrestrial Reference System) le cui realizzazioni ad una certa data yy sono denominate ITRFyy (International Terrestrial Reference Frame); la distribuzione delle Stazioni Permanenti GPS che realizzano il sistema è riportata in figura 2.

In riferimento a tale sistema vengono calcolate le orbite "precise" dei satelliti dei sistemi di navigazione, attualmente non solo le orbite della costellazione GPS, ma anche quelle della costellazione GLONASS: ciò significa che chi fa rilievi utilizzando quelle orbite, viene ad essere inserito nel sistema.

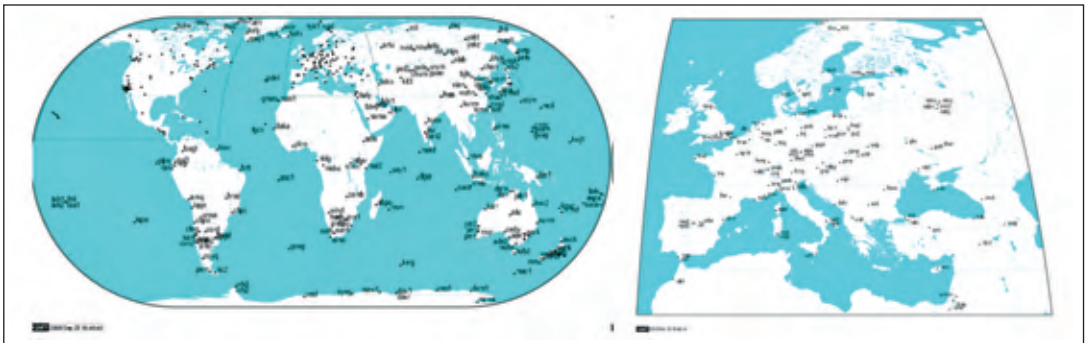


Fig. 2 - IGS Tracking Network

Raffittimento Europeo - EUREF

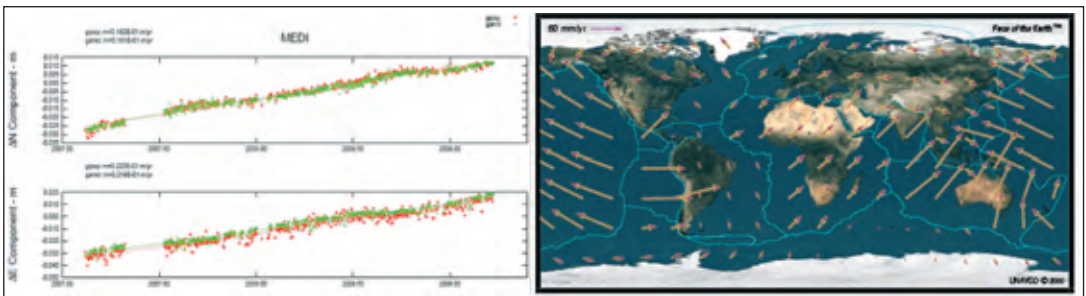


Fig. 3a - Variazione della posizione giornaliera di una Stazione Permanente GPS. (I colori si riferiscono all'uso di tre diversi software)

Fig. 3b - Movimenti delle singole placche in un riferimento generale unico

Una Stazione Permanente GPS è realizzata tramite un ricevitore GPS collocato su un punto materializzato stabilmente (a centramento forzato) e lasciato continuamente in funzione: tale stazione costituisce un punto fisso di posizione nota e invariata rispetto la crosta terrestre che acquisisce h24 i segnali GPS e rispetto tale punto gli utenti possono determinare in campagna la propria posizione relativa, per esempio per realizzare il rilievo di appoggio a fini cartografici. La Stazione Permanente diviene un comodo infaticabile collega sempre in campagna che esegue misure occupando un punto noto.

Poiché la Stazione Permanente è sempre in funzione, si può verificare la sua stabilità, ad esempio calcolando la sua posizione ogni giorno con le misure fatte nelle 24 ore ('soluzione giornaliera') e riportando in un grafico le coordinate giornaliere in funzione del tempo.

Quello che generalmente si ottiene per un punto ben monumentato e ben funzionante, è quello che appare in fig. 3a : al di là della variabilità giornaliera appare evidente un movimento abbastanza regolare e pronunciato della stazione. L'entità del trend del movimento è generalmente in Italia dell'ordine di un paio di cm all'anno, quantità misurabile con GPS.

Questo avviene perché la superficie terrestre come noto è suddivisa in placche in moto relativo mentre il sistema ITRFyy tiene conto di un comportamento medio mondiale (il Frame è distribuito su tutte le placche terrestri) e quindi la Stazione Permanente Italiana appare in movimento rispetto ad esso, in quanto solidale alla placca Euro asiatica.

Le misure GPS riferite alla infrastruttura geodetica opportuna sono così precise da evidenziare (ed essere disturbate) dai movimenti delle placche.

Per evitare di dover considerare questo movimento d'insieme, è stato istituito dalla IAG (International Association of Geodesy) dalla struttura preposta EUREF (IAG Reference Frame Subcommittee for Europe) un diverso Sistema di Riferimento Terrestre, che sia solidale con la placca europea e quindi finalizzato a costituire un sistema di riferimento utile per i rilievi in Europa: tale sistema è l'ETRS89 (European Terrestrial Reference System 89), il cui Frame attuativo è stato inizialmente l'ETRF89 (European Terrestrial Reference Frame 89). Se un punto appartiene alla placca europea, la sua posizione non cambia (o cambia di molto poco, causa fattori locali) rispetto al sistema che si muove come la placca nel suo complesso.

È questo il sistema nel quale l'Italia inserisce le proprie reti, a partire dalla rete fondamentale GPS IGM95: per il suo calcolo vennero infatti tenute fisse alcune Stazioni della rete ETRF89 alle coordinate note in quel sistema.

2.3 Rete Dinamica Nazionale

In Italia sono presenti molte (alcune centinaia!) Stazioni Permanenti GPS, di proprietà di strutture statali e di ricerca quali ASI (Agenzia Spaziale Italiana), INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia), Università, di Scuole, Province e Regioni, e di singoli privati e di Associazioni di professionisti. L'IGM ha selezionato un centinaio di queste stazioni di 'terzi' e ha provveduto, in collaborazione con Università (Milano, Padova, Bologna) al calcolo in blocco della posizione delle stazioni sulla base di un mese di dati misurati dalle stazioni a cavallo tra il 2007 e il 2008.

Questa rete di punti di posizione nota (nell'attuale Frame Europeo ETRF2000, evoluzione del precedente ETRF89) costituisce la Rete Dinamica Nazionale che diviene il nuovo Frame di riferi-

mento Nazionale; a maggio del 2009 la rete è stata accettata come raffittimento Italiano della Rete Europea in un Convegno dell'EUREF tenutosi a Firenze (26-29 maggio 2009). La rete è stata ufficialmente dichiarata dall'IGM come rete geodetica fondamentale italiana nel gennaio 2010.

La rete IGM95 continua ad essere anch'essa un riferimento ufficiale per l'Italia e le coordinate dei suoi vertici sono in corso di ricalcolo nell'ambito di RDN.

La catena di collegamenti – se vogliamo, di ‘ordini’ ma a livello mondiale - è tale che attualmente un collegamento tramite misure GPS alla rete RDN consente di inserirsi nel sistema di riferimento terrestre mondiale. Situazione analoga avviene nei paesi europei che siano anche essi dotati di un raffittimento della rete ETRF.

A questo punto conviene considerare brevemente le modalità che possono essere impiegate per un uso efficiente, oltre che preciso, delle tecniche di rilievo GPS.

3. Moderne tecniche di rilievo GPS

La nuova rete di riferimento nazionale nasce in risposta allo sviluppo negli ultimi due decenni dell'uso di ricevitori satellitari. Le novità degli ultimi anni hanno riguardato più l'efficienza e la produttività del rilievo che non la precisione o la disponibilità del servizio. Per apprezzare l'innovazione introdotta dalle nuove tecniche di rilievo in tempo reale e delle strutture che le supportano conviene prendere brevemente in considerazione i metodi di rilievo GPS che consentono di effettuare misure al livello di precisione consentito dagli altri strumenti tradizionali usati per l'appoggio cartografico, ovvero distanziometro e teodolite (o, equivalentemente la Stazione Totale, che li integra).

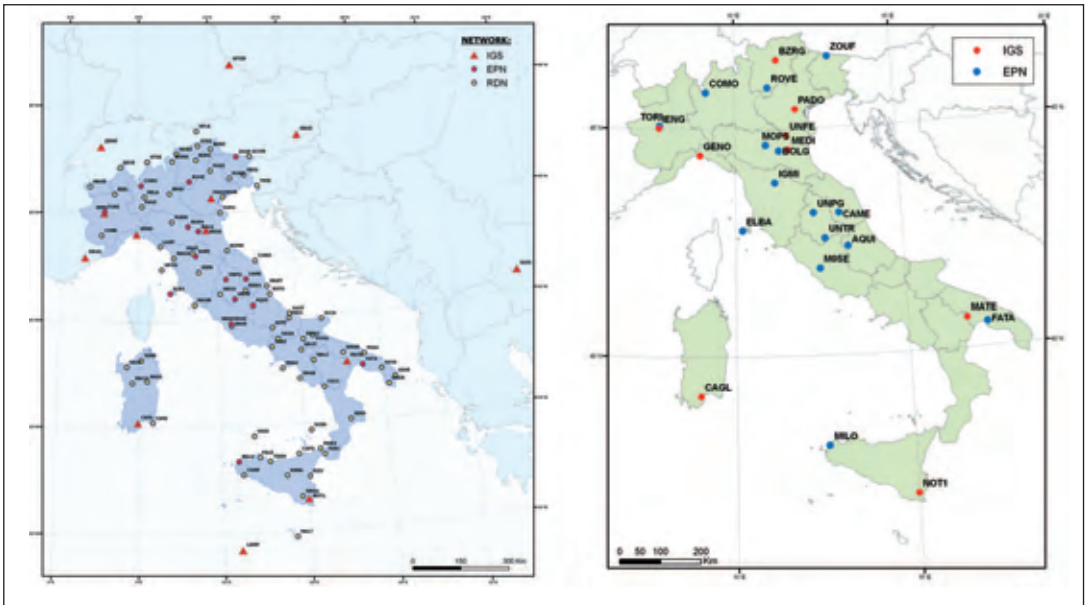


Fig. 4a - Rete Dinamica Nazionale, nuovo Frame di Riferimento per il Sistema Geodetico Nazionale

Fig. 4b - Vertici della Rete Europea di EUREF usati per inquadrare il raffittimento italiano RDN

L'uso di singoli ricevitori GPS consente il posizionamento del ricevitore stesso con una indeterminazione dell'ordine della decina di metri in 'tempo reale': garantisce cioè una elevatissima produttività non essendo necessaria alcuna elaborazione (se non quelle necessarie per entrare nel sistema Cartografico vigente) ma una precisione limitata. Ottimo per acquisire dati per un GIS ambientale, non è sufficientemente preciso per la produzione di cartografia tecnica e a grande scala.

Per contro le tecniche di rilievo con coppie di ricevitori satellitari a scala più sofisticati ('di fase'), consentono il raggiungimento di precisioni che vanno dal cm a pochi dm per distanze relative dei punti coinvolti dell'ordine dei km, e sono quindi al centro dell'attività del topografo, non solo per rilievi finalizzati a lavori catastali, lottizzazioni, creazione di modelli numerici del terreno, ma anche per l'aggiornamento e l'inquadramento di cartografia a grande e grandissima scala.

L'operatore topografo è sostanzialmente interessato:

- a raggiungere le precisioni richieste dall'applicazione cartografica e imposte dal committente;
- alla possibilità di verificare di aver raggiunto le precisioni richieste e di poterlo dimostrare al committente;
- alla massima efficienza delle operazioni da fare per raggiungere l'obiettivo, ovvero è interessato ad aumentare la produttività del proprio lavoro senza inficiarne la correttezza e la precisione.

Gli sviluppi recenti della tecnica GPS sono stati orientati proprio verso il tentativo di creare strumenti e infrastrutture che consentano all'operatore di ottenere risultati di alta precisione con un impegno operativo e tempi di risposta per il risultato finale comparabili con il posizionamento assoluto, ma con precisioni di due ordini di grandezza migliori, passando dai metri di errore ai centimetri.

Per sottolineare questa linea di tendenza, si richiamano prima i principi del 'tradizionale' rilievo per basi GPS, l'uso delle basi per costruire delle reti di qualità controllabile per pervenire alle tecniche di rilievo di precisione in tempo reale.

3.1 Rilievo relativo statico

Per ottenere con sistemi GPS precisioni dell'ordine dei cm, il metodo principe è eseguire misure in relativo, misurando "basi GPS". Tale metodo si basa da un lato sull'uso di ricevitori in grado di eseguire misure 'di fase' che consentono il raggiungimento di maggiori precisioni nella valutazione della distanza satellite-ricevitore, dall'altro sull'uso contemporaneo di due di tali ricevitori geodetici, il che consente di eliminare alcuni errori e di ridurne notevolmente altri.

È ben noto che i disturbi sulla misura della distanza tra satellite e ricevitore sono dovuti a vari effetti sistematici quali gli errori nella definizione dell'orbita dei satelliti, disturbi subiti dal segnale nell'attraversamento di ionosfera e troposfera, errori di sincronizzazione e deriva degli orologi del satellite e del ricevitore, multi riflessioni su superfici riflettenti a terra. Tali effetti sistematici possono essere distinti tra errori specifici dei soli satelliti (orologio, orbita,...), quelli specifici del solo ricevitore (orologio del ricevitore, riflessioni multiple) e quelli dipendenti dalla posizione relativa tra satellite e ricevitore (effetti troposfera e ionosfera,); questi ultimi che non variano molto tra punti vicini ('errori spazialmente correlati').

Nella formulazione matematica della relazione tra incognite e misure, gli errori possono essere considerati come termini additivi che si aggiungono al valore 'corretto' della distanza, espresso

come somma della frazione di lunghezza d'onda (quantità misurata) e della "ambiguità di fase" N , incognita, corrispondente al numero intero di lunghezze d'onda che coprono il percorso satellite-antenna.

Effettuando le differenze tra le relazioni relative alle misure *contemporanee* effettuate da due ricevitori sugli stessi due satelliti, si eliminano perché uguali i termini specifici dei singoli ricevitori e dei singoli satelliti, e si ottiene una quantità, la "doppia differenza" delle misure, che può essere espressa in funzione delle componenti della base \underline{b} (cioè le differenze di coordinate tra le due stazioni GPS), e delle differenze delle ambiguità incognite, oltre ad effetti residui ionosferici e troposferici di disturbo.

Facendo stazione sui due punti per un intervallo di tempo sufficientemente lungo si accumula il numero di misure necessario a stimare le incognite di ambiguità e quindi ottenere la base GPS. I due punti risultano collegati da un vettore di componenti note nel sistema WGS84

Inoltre, se il rilievo è complesso e coinvolge più punti, come è il caso dell'inquadramento di cartografia di aree vaste, richiede generalmente la realizzazione di una rete composta da più basi rilevate in numero sovrabbondante rispetto ai punti da collegare, e occorre quindi eseguire la compensazione in blocco delle misure.

Spesso viene richiesta una ulteriore elaborazione: per l'inserimento del rilievo nella rete geodetica nazionale, occorre inserire tra i punti rilevati anche vertici della rete d'inquadramento (nel caso italiano tali punti sono i vertici IGM95 o da essi derivati) ed effettuare un calcolo per l'inquadramento in rete. Solo alla fine del processo di post elaborazione i punti rilevati sono inseriti nel sistema desiderato.

3.1.1 Limiti e vantaggi del rilievo tramite basi statiche

Dal punto di vista operativo la tecnica del rilievo relativo statico richiede per la misura di ogni base:

- una coppia di ricevitori in grado di acquisire le fasi oltre i codici, in singola (L1) o doppia (L1 + L2) frequenza (ricevitori geodetici),
- due squadre che operano contemporaneamente e quindi almeno due operatori in contatto (radio o telefonico) tra di loro per garantire la contemporaneità delle ricezioni,
- un tempo di stazionamento (contemporaneo) dipendente dalla distanza tra i punti,
- un lavoro di ufficio alla fine delle operazioni di campagna, consistente nello scarico dei dati acquisiti dai due ricevitori su un computer e nella elaborazione dei dati di misura con software opportuno.

Oltre all'onere di rilievo, questo tipo di rilievo presenta l'ulteriore limite di non offrire garanzia già in campagna che le misure abbiano dato esito positivo: ci si può accorgere al rientro che qualche cosa non ha funzionato.

A fronte di questo impegno l'uso di basi indipendenti in numero ridondante rispetto l'indispensabile offre buone possibilità di analisi dei dati acquisiti, rigetto di eventuali misure non attendibili o non sufficientemente precise e la possibilità di dimostrare la qualità del lavoro svolto, tramite i parametri d'errore che una compensazione in blocco basata sui minimi quadrati, può offrire.

Con una rete di basi GPS indipendenti si può insomma verificare e dimostrare la precisione raggiunta nel rilievo, comunque complesso.

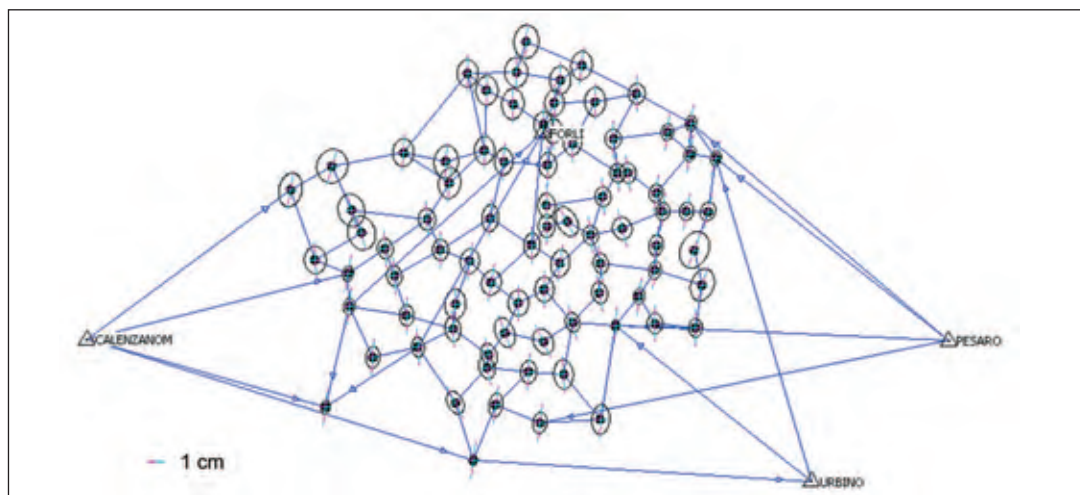


Fig. 5 - Rete rilevata sulla provincia di Forlì-Cesena. Ellissi standard di errori di pochissimi cm

In figura 5 è riportato il grafico di una rete di raffittimento; le basi sono rappresentate da linee che collegano i punti con interdistanza tra i punti interni di 7 km e distanza rispetto i punti esterni utilizzati per l'inquadramento di decine di km.

Attorno ai punti sono tracciate le ellissi standard d'errore che hanno semiassi da uno a tre cm: il grafico è esplicativo delle precisioni raggiungibili anche in aree vaste.

3.2 Rilievo relativo cinematico

Con lo stesso tipo di strumentazione è possibile effettuare rilievi *cinematici*, durante i quali un ricevitore (detto master) rimane fisso in un punto mentre un secondo ricevitore (il rover) va ad occupare via via i punti dei quali si vuole ottenere la posizione rispetto a quello fermo. Il rilievo cinematico richiede una inizializzazione statica, o comunque una procedura che permetta di fissare inizialmente le ambiguità e richiede la ricezione continua, senza soluzione di continuità; in caso di interruzione, occorre ri-inizializzare, perché le ambiguità iniziali $\Delta \nabla N(t_0)$ non valgono più.

Anche nel caso cinematico, il rilievo richiede l'impiego di una coppia di strumenti, in particolare:

- di un ricevitore fisso, controllato da un operatore non necessariamente esperto,
- di un ricevitore in movimento, gestito da un operatore esperto, in grado di valutare la continuità e la qualità della ricezione, e capace di individuare le situazioni a rischio di interruzione della ricezione.

Una volta eseguito il rilievo in campagna occorre procedere alla post elaborazione dei dati, che nel caso del cinematico non è banale, sia per la mole di dati acquisita che per i frequenti cambi di posizione del ricevitore.

3.2.1 Limiti e vantaggi del rilievo cinematico

Questo tipo di rilievo presenta un evidente vantaggio: la produttività è molto più elevata rispetto

al rilievo statico, in quanto, una volta fissate le ambiguità iniziali, non occorre fermarsi sul punto che si vuole determinare, ma si può passare senza soluzione di continuità da un punto al successivo.. Un limite alla produttività è costituito dalla presenza di ostacoli sul percorso tra un punto e l'altro: se il rilievo è frequentemente interrotto per perdita di segnale, occorre re-inizializzare e quindi procedere sostanzialmente ad un rilievo statico con conseguente perdita di efficienza.

Come il rilievo relativo statico, anche il rilievo cinematico richiede un post-processamento non sempre banale.

Dal punto di vista della attendibilità del rilievo, occorre notare che:

- è difficile valutare già in campagna la affidabilità delle posizioni acquisite,
- mancano praticamente misure sovrabbondanti;
- non è facile valutare la precisione raggiunta, in quanto quella dichiarata dal software di elaborazione generalmente sottostima l'indeterminazione e non conviene considerarla attendibile.

Per avere un riscontro delle effettiva affidabilità delle coordinate determinate, si può sempre rioccupare dei punti già stazionati, ma questo comporta evidentemente una perdita di produttività e non garantisce una affidabilità generalizzata: i pochi punti controllati danno sì indicazioni della serietà del rilievo ma non garanzie sulla qualità dell'intero rilievo.

4. Aumento di produttività nei Rilievi relativi GPS

Un incremento di efficienza rispetto il rilievo statico può essere ottenuto per due vie.

Da un lato si può ridurre l'onere delle operazioni di campagna utilizzando un ricevitore che funzioni in modo permanente, magari in un luogo protetto che non richiede la presenza continua di un operatore (per esempio fissato su un tetto, fig. 6), su un punto del quale siano acquisite con cura le coordinate, e che fornisca i dati acquisiti all'operatore di campagna che può quindi lavorare in modo completamente autonomo, in ogni momento della giornata: sa infatti che avrà a disposizione le ricezioni acquisite sul punto noto. Il post processamento effettuato a posteriori in ufficio delle due serie di dati consente permette il calcolo delle basi consentendo la stessa precisione del rilievo statico o cinematico. Le basi collegano la stazione permanente impiegata al punto occupato dal rilevatore.

Dall'altro lato, disponendo di ricevitori opportunamente configurati, è possibile evitare la fase di post - processamento e ottenere la posizione del ricevitore già in campagna, praticamente al



Fig. 6 - Stazione permanente GPS

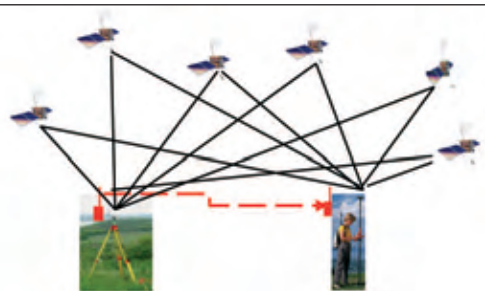


Fig. 7 - Schema rilievo "real time kinematic"

momento del rilievo. La modalità RTK (Real Time Kinematic) prevede l'uso di una coppia di ricevitori equipaggiati con un sistema di trasmissione dati (radio modem o cellulare) che permette l'invio, secondo un opportuno protocollo, di dati misurati o di correzioni da uno strumento (il master) all'altro (il rover). Il rover viene così a disporre dei dati di entrambi i ricevitori e mediante un software residente su di esso viene calcolata la posizione del rover stesso in tempo praticamente reale.

Dal punto di vista operativo il rilievo richiede la presenza contemporanea in campagna di due squadre, con opportuna strumentazione, il ricevitore RTK, ovviamente più costoso e anche più complesso da utilizzare, richiedendo il collegamento radio tra i due ricevitori.

Oltre alla riduzione del tempo di calcolo, si ottengono due notevoli vantaggi:

- sapere già al momento del rilievo se questo è riuscito correttamente o meno;
- conoscere le coordinate del rover già in campagna e quindi ad esempio poter effettuare un picchettamento, ovvero andare ad occupare punti del terreno non segnalizzati ma dei quali si conoscono le coordinate rispetto un qualche riferimento.
- inserire il rilievo nel sistema "assoluto" desiderato, assegnando le opportune coordinate al master.

Per contro, agli usuali problemi topografici di rilievo con ricevitori satellitari, si aggiunge che:

- il corretto e tempestivo trasferimento dei dati da master a rover è condizione imprescindibile per il funzionamento del metodo RTK; per contro il collegamento non è sempre scontato: la copertura telefonica non è sempre garantita ovunque (in montagna tipicamente c'è un minor numero di utenti telefonici e la copertura risulta talvolta carente) e dal canto loro i radio modem hanno portata ridotta;
- per il raggiungimento di precisioni centimetri che o comunque sub-decimetriche è necessario che la distanza tra master e Rover non superi 10-15 km.

Quest'ultimo limite deriva sostanzialmente dovuto dall'effetto degli errori residui dovuti all'atmosfera che perturbando la misura e non consentono il corretto fissaggio delle ambiguità a grandi distanze, in una parola non consentono il calcolo affidabile della base.

Anche nel caso del cinematico in tempo reale non è completamente attendibile la indeterminazione della posizione auto dichiarata dal software di elaborazione, soprattutto in presenza di un numero ridotto di satelliti (5): come nel caso del cinematico post-processato, non ci sono praticamente misure ridondanti se non rioccupando il punto.

4.1 Reti di Stazioni Permanenti interoperanti per il rilievo RTK

Una stazione permanente in grado di lavorare in modalità RTK unisce i vantaggi dell'elaborazione in tempo reale con l'impiego di un solo operatore. Questo tipo di Stazione consente ad ogni singolo operatore che si può collegare ad essa di lavorare autonomamente in ogni momento della giornata ottenendo già in campagna il risultato del proprio lavoro, in un sistema di riferimento assoluto. Ovviamente SE TUTTO va bene: visibilità satellitare, presenza comunicazione, funzionamento dalla Stazione,...).

Tenendo conto del limite sulla distanza che garantisce il miglior risultato, una singola stazione copre un'area circostante di raggio inferiore ai 15 km, come dire indicativamente un'area di circa

400 km². Per coprire aree più vaste, come ad esempio una Provincia o addirittura una Regione occorre avere più stazioni permanenti tutte operanti in modalità RTK, per le quali la somma delle aree d'azione copre tutta la zona. Se una struttura (Ente pubblico o privato) si pone il problema di coprire con un servizio una area vasta, deve gestire un elevato numero di stazioni e l'utente da parte sua deve sapere quale stazione è la stazione più vicina o comunque alla distanza utile per eseguire efficacemente il rilievo, e poter accedere telefonicamente ad essa.

Ultimo passo in direzione dell'aumento di efficienza è la realizzazione di Reti di Stazioni Permanenti interoperanti tra loro in tempo reale, denominate NRTK (Network Real Time Kinematic).

Una tale infrastruttura è realizzata tramite un insieme di Stazioni Permanenti funzionanti con continuità per l'intero arco della giornata, che inviano i propri dati di ricezione non direttamente all'operatore, ma a un centro di elaborazione dati. La posizione delle Stazioni è calcolata con elevatissima precisione, e mantenuta costantemente monitorata durante l'impiego.

Il Centro di elaborazione dispone di un software che utilizzando i dati di ricezione, le coordinate delle stazioni di riferimento, le informazioni relative alle orbite, riesce a modellare i sistematismi che perturbano la qualità del rilievo GPS: i dati cioè sono utilizzati non per calcolare le basi tra le Stazioni (le coordinate sono già note) ma per stimare gli errori del sistema GPS, che indurrebbero diversi valori delle coordinate delle Stazioni.

Conoscendo per ogni satellite una stima degli errori (in particolare quelli dovuti all'atmosfera) su tutta l'area coperta dalla rete di Stazioni di Riferimento, può essere stimato un andamento d'area dei principali errori e può essere costruito un *modello degli errori* del sistema GPS presenti ad una certa epoca nell'area compresa tra le stazioni.

Tale modello consente di calcolare le correzioni da fornire all'utenza che opera all'interno dell'area, dati che, combinati con le osservazioni acquisite dal rover, gli consente di definire le proprie coordinate con elevata precisione. L'utente in questo caso deve collegarsi sempre e comunque con il Centro di Calcolo, ovunque stia operando all'interno dell'area coperta dal servizio (figura. 8).

L'operatore che si collega al Centro di Calcolo accede, se autorizzato, ad uno dei servizi offerti, anche di precisione, messi a disposizione dal Gestore della Rete; il tipo di modalità con le quali

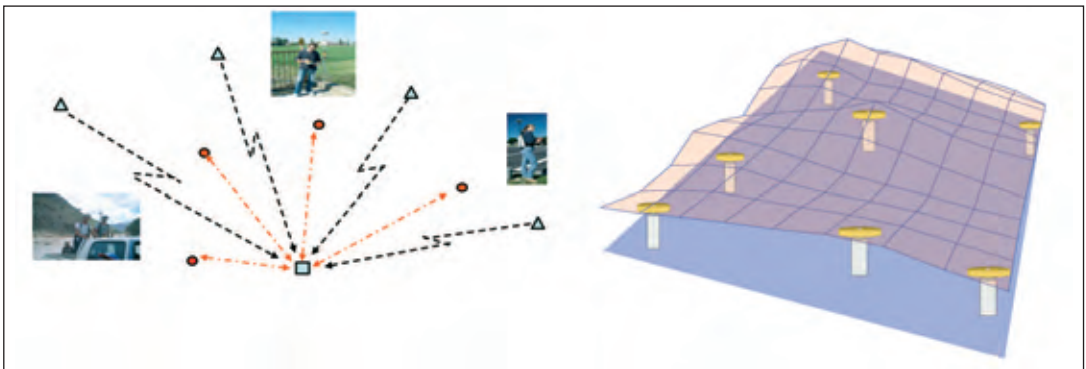


Fig. 8a - Schema di funzionamento di una rete NRTK (network Real Time Kinematic)

Fig 8b - Indicazione simbolica della modellazione degli errori sistematici

viene determinata la posizione di precisione del rover (VRS, I-Max, FKP) dipende dalle potenzialità del ricevitore a disposizione o dalle scelte di preferenza dell'utente.

Dal punto di vista operativo l'utente deve essere provvisto di un solo ricevitore di tipo "RTK", della possibilità di connettersi con il centro di Calcolo, di essere autorizzato ad accedere al servizio fornito dal gestore della rete NRTK.

Un modello di correzioni efficace può essere calcolato anche se le stazioni permanenti di riferimento più prossime sono a qualche decina di chilometri dalla posizione dell'utente: tipicamente una regione italiana è coperta da una quindicina di Stazioni che possono distare tra loro anche 60-80 km.

Nelle figure sottostanti sono riportate le Reti NRTK di due Regioni di superficie poco differenziate, con un numero pressoché con lo stesso numero di Stazioni di Riferimento (14 e 15)

Per entrambe le Reti NRTK la organizzazione e la gestione della rete è di soggetti privati (una Ditta in un caso e una Associazione di colleghi dei Geometri nell'altro), i servizi offerti sono di diverso tipo.

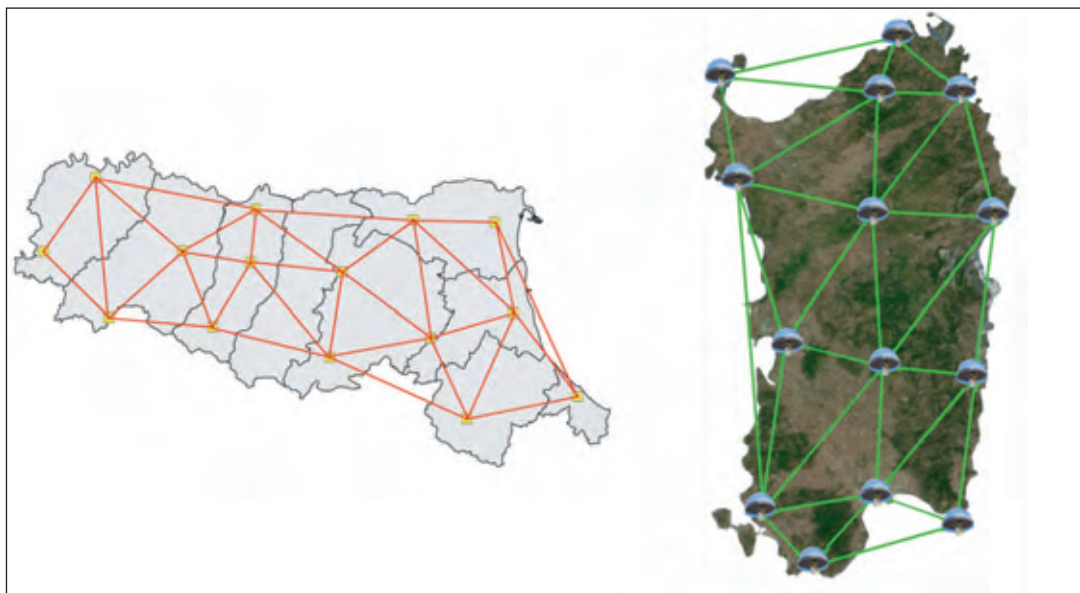


Fig. 9 - Reti NRTK della Emilia-Romagna (copertura ~22.500 km²) e della Sardegna (copertura ~24.000 km²)

4.1.1 Limiti e vantaggi del rilievo tramite rete NRTK

I vantaggi del rilievo in tempo reale tramite collegamento ad una Rete NRTK sono numerosi:

- impiego di un solo ricevitore, anche se di tipo RTK, con modem cellulare;
- posizionamento con precisione centimetrica;
- rapidità di esecuzione della misura: la posizione si ottiene in tempi brevissimi (quasi in tempo reale), in quanto tra collegamento tramite rete telefonica al gestore della rete NRTK, acquisi-

zione dei dati/correzioni, il ricevitore Rover calcola la propria posizione in un paio di minuti (o non ci riesce affatto), anche a decine di km dalla stazione di Riferimento più vicina;

- le coordinate sono fornite nel Sistema assoluto previsto dalla rete NRTK;
- gli attuali Rover e gli attuali protocolli di trasmissione ad essi (RTCM 3) consentono anche l'acquisizione di parametri di trasformazione su un altro sistema (ad esempio, Cartografico);
- se il collegamento non riesce, questo è noto già in campagna: se dopo 2-3 minuti non si riesce a fissare il punto, si sa di dover utilizzare altre modalità di rilievo;
- non è necessaria alcuna elaborazione in post processamento;
- il metodo funziona anche se il Rover è in movimento

Per avere questi risultati, occorre che TUTTA la filiera funzioni perfettamente.

Svantaggi/oneri:

- occorre che ci sia copertura telefonica per il collegamento in rete (oltre ovviamente alla copertura satellitare GPS);
- occorre disporre di un ricevitore tipo RTK, modem cellulare,
- occorre disporre di un abbonamento o preventiva registrazione ad un gestore di rete NRTK;
- le misure non sono ridondanti

Non si deve cioè dimenticare che la posizione acquisita è difficilmente controllabile e quindi la certificazione della qualità del rilievo non è né facile né scontata; ovviamente, come già detto per il cinematico post processato, un controllo può essere attuato tramite ripetizione, indipendente, della misura.

Conclusione

Questa nota ha cercato di focalizzare alcuni elementi che stanno modificando il modo con il quale vengono eseguiti i rilievi topografici e quindi anche i lavori a terra di supporto alla realizzazione di cartografia.

Questi elementi innovativi derivano dallo sviluppo avuto sulla pratica operativa dall'impiego dei ricevitori satellitari. Questa nuova strumentazione ha comportato anche modifiche dell'infrastruttura geodetica nazionale, in quanto la tipologia dei punti che realizzano le reti geodetiche dipende dalle caratteristiche d'impiego della strumentazione adottata dai rilevatori. Si è passati dalle tradizionali reti Trigonometriche strutturate rigidamente in "ordini" adatte al rilievo con i teodoliti, alla rete IGM95 realizzata per l'impiego del GPS e pensata come struttura unica, dai vertici della quale collegare poi direttamente i punti di dettaglio. Un ulteriore passo è in corso con la definizione di una rete di Stazioni Permanenti GPS di tipo 'dinamico' che dovrebbero misurare con continuità la propria posizione, e fornire i dati all'utenza consentendo la misura delle basi rispetto quelle stazioni. Questa Rete Dinamica Nazionale costituirà da 2010 il frame di riferimento del Sistema Geodetico nazionale sul quale basare il sistema cartografico di tipo UTM.

Dal punto di vista operativo gli ultimi anni hanno visto lo sviluppo di strumentazione GPS sempre più orientata ad un incremento di efficienza, per consentire all'utenza rilievi di altissima precisione in tempi sempre più contenuti. In questa direzione la frontiera è costituita dalla realizzazione in sede locale (ma a dimensione per lo più regionale) di infrastrutture NRTK in grado di modellare gli errori del sistema GPS su di fornire a tutti gli utenti operanti sull'area i dati necessa-

ri a correggere le misure che l'operatore esegue con un singolo strumento e pervenire a precisioni dell'ordine dei centimetri nella definizione della propria posizione, il tutto in pochi minuti.

Ci sono in Italia numerose Reti NRTK che si sviluppano come accennato per lo più in ambito regionale, ma poiché le iniziative che le hanno generate sono del tutto indipendenti le une dalle altre, e talvolta geograficamente sovrapposte, c'è da aspettarsi una certa disomogeneità dei vari servizi.

È da sottolineare il fatto che per la positiva realizzazione della misura, tutte le fasi che la precedono debbono funzionare correttamente, tanto sul fronte della produzione della correzione (funzionamento delle Stazioni di Riferimento della rete NRTK, invio delle misure al centro di elaborazione, calcolo del modello), quanto su quello dell'acquisizione da parte dell'utente: se salta una qualche fase, l'operatore non riesce a fissare la propria posizione.

Inoltre occorre segnalare che questo tipo di misura, precisa e rapida, non è facilmente controllabile: nell'esperienza dell'autore ci sono stati casi (indubbiamente rari) in cui la misura pareva essere felicemente conclusa mentre il confronto con ripetizioni o la conoscenza a priori della posizione del punto testato hanno evidenziato differenze di decimetri. Il problema della certificabilità di una misura NRTK rimane ancora aperto e dovrà essere affrontato con decisione e sistematicità.

Infine una osservazione: il GPS, da solo, non è evidentemente sufficiente alla determinazione di punti che non siano stazionabili, cosa che accade praticamente sempre per punti fotografici di appoggio o punti fiduciali catastali. E' cioè necessario affiancare e integrare completamente il rilievo GPS col rilievo trami Stazioni Totali; esistono già strumenti che integrano completamente i due tipi di sensori, anche dal punto di vista della gestione del dato.

Bibliografia

- ALMAMI, Z., COLLILIEUX, X., LEGRAND, J., GARAYT, B., BOUCHER, C., 2007. ITRF2005: a new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters. *J. Geophys. Res.* 112, B09401. doi:10.1029/2007JB004949
- BARBARELLA M., GANDOLFI S., GORDINI C., VITTUARI L. (2003). Reti di Stazioni Permanenti per il posizionamento in tempo reale: prime sperimentazioni, Atti della 7° conferenza nazionale ASITA, Verona 28 - 31 ottobre 2003, 173-178.
- BARBARELLA M., GANDOLFI S., RONCI E., (2006). The Use of a GNSS Test Network for Real Time Application in Italy: First Results Based on Regional Field Test, ION GNSS 19th International Technical Meeting of the Satellite Division, 26-29 September 2006, Fort Worth, TX, USA, 1226-1232.
- BARBARELLA M., GANDOLFI S., ZANUTTA A., CENNI N., (2007), Tecniche per l'inquadramento di reti di stazioni permanenti regionali per il posizionamento in tempo reale. *Atti del Convegno Nazionale SIFET (ISBN 88-901939-4-8)*, 27-29 giugno 2007, Arezzo, 52-59
- BARBARELLA M., CENNI N., GANDOLFI S., RICUCCI L., ZANUTTA A., 2009, Technical and scientific aspects derived by the processing of GNSS networks using different approaches and softwa-

re, *ION GNSS 22th International Technical Meeting of the Satellite Division*, 23-25 September 2009, Savannah, GA, USA, 2677-2688.

BARONI L., CAULI F., DONATELLI D., FAROLFI G., MASEROLI R., (2008) La Rete Dinamica Nazionale (RDN) ed il nuovo sistema di riferimento ETRF2000

BLEWITT, G. (2008), Fixed point theorems of GPS carrier phase ambiguity resolution and their application to massive network processing: Ambizap, *J. Geophys. Res.*, 113, B12410, doi:10.1029/2008JB005736.

DOW J.M., NEILAN R.E., GENDT G., (2005), "The International GPS Service (IGS): Celebrating the 10th Anniversary and Looking to the Next Decade", *Adv. Space Res.* 36 vol. 36, no. 3, pp. 320-326, 2005. doi:10.1016/j.asr.2005.05.125

DONG, D., HERRING, T.A., KING, R.W., (1998). Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data, *J. Geod.*, 72, 200–214.

HERRING T.A., KING R.W., MCCLUSKY S.C. (2006). *Gamit Reference Manual, GPS Analysis at MIT*, Release 10.2, 28th September 2006.

MASEROLI R., (2009) La Rete Dinamica Nazionale (RDN)

Convegno SoGer, Bologna, 15 gennaio 2009

MASEROLI R., (2009) La Rete Dinamica Nazionale: integrazione dei servizi e delle reti a livello nazionale, Udine, 7 ottobre 2009

Siti Web

International GNSS Service

<http://igsceb.jpl.nasa.gov/>

International Terrestrial Reference Frame (ITRF) products

<http://itrf.ensg.ign.fr/>

European Terrestrial Reference System

<http://www.epncb.oma.be/>

Guidelines for European Permanent Network Analysis Centers:

http://www.epncb.oma.be/_organisation/guidelines/guidelines_analysis_centres.pdf

Istituto Geografico Militare:

<http://www.igmi.org/>

<http://87.30.244.175/rdn.php>