

**Alma Mater Studiorum – Università di Bologna**

---

**DISTART**

**Dottorato di ricerca in  
SCIENZE GEODETICHE E TOPOGRAFICHE**

**Raggruppamento disciplinare  
ICAR 06**

**DALLO STATICO AL NETWORK RTK:  
L'EVOLUZIONE DEL RILIEVO  
SATELLITARE**

**Tesi di Dottorato di :  
Ing. Ernesto Ronci**

**Relatore:  
Prof. Maurizio Barbarella**

**Coordinatore :  
Prof. Gabriele Bitelli**

---

**Ciclo XIX**

**Panta rei**  
(πάντα ρει)  
*Eraclito*

Parole Chiave

**GNSS, Stazioni Permanent, IGM95, Sistemi di riferimento, NRTK**

## **Indice**

<b>Introduzione</b>	I
<b>Capitolo 1</b>	
<b>Evoluzione e modernizzazione dei sistemi satellitari</b>	1
1.1    Il Sistema Galileo	2
1.1.1    I servizi previsti dal sistema GALILEO	4
1.2    Modernizzazione dei sistemi satellitari (GPS e GLONASS)	4
1.3    L'integrazione delle osservabili di differenti sistemi GNSS	8
1.4    La nuova generazione di ricevitori GNSS	11
<b>Capitolo 2</b>	
<b>Il Rilievo di Reti statiche di Raffittimento</b>	5
2.1    La rete IGM95	16
2.1.1.    Caratteristiche della rete	8
2.2    Il progetto GPS7	23
2.2.1    Analisi del Capitolato d'appalto	24
2.3    I Datum di interesse internazionale	27
2.4.1    ITRF	27
2.4.2    IGS	28
2.4    Il rilievo di una rete statica GPS-GLONASS per la sperimentazione di misure VRS	30
2.5.1    Struttura della rete	31
2.5.2    Elaborazione dei dati	33
<b>Capitolo 3</b>	
<b>Il Progetto GPS7 in Emilia Romagna</b>	37
3.1 Le reti provinciali Emiliano-Romagnole	38
3.2 Le sperimentazioni effettuate	39
3.3 Lo studio dell'Ondulazione	40
3.4 La trasformazione fra Datum diversi	41
3.4.1 Il software Verto	43
3.4.2 Applicativo per l'utilizzo del dato Verto su aree vaste	44
3.5 Giunzione di reti provinciali	52

## **Capitolo 4**

<b>Il posizionamento mediante reti di stazioni permanenti GNSS</b>	61
4.1 Informazioni generali	62
4.2 Lo stato dell'arte in Italia	63
4.3 La rete NRTK/BO dell'Università di Bologna	68
4.3.1 L'inquadramento in ITRF2000	70
4.3.2 L'inquadramento in ETRF89 (IGM95)	72
4.4 Modalità di trasmissione delle correzioni	74
4.4.1 VRS	75
4.4.2 MRS	77
4.4.3 I protocolli di trasmissione	78

## **Capitolo 5**

<b>La sperimentazione condotta con la rete di stazioni permanenti BO/POS</b>	81
5.1 La raccolta e l'organizzazione dei dati	82
5.2 Il database per le misure NRTK	83
5.2. Studio sulla ripetibilità delle misure	85
5.3. Il rilievo NRTK della rete GPS7 della Provincia di Forlì-Cesena	88
5.3.1 Rete test	89
5.3.2 Modalità di esecuzione dei rilievi in tempo reale	91
5.3.3 Dispersione relativa tra le soluzioni nelle tre ripetizioni	95
5.3.4 Confronto con le coordinate ottenute dal rilievo statico	100
5.3.5 Problemi riscontrati durante le misure e nella fase di analisi dati.	103
5.4. Il rilievo NRTK in continuo	106
5.5. Il rilievo cinematico in tempo reale	112

## **Capitolo 6**

<b>Il confronto fra rilievo statico e NRTK</b>	115
1.1 Considerazioni sulle prestazioni	116
1.2 Il collegamento fra reti adiacenti	119
1.3 Opportunità della certificazione delle reti di stazioni permanenti	121
1.4 Il problema del Sistema di riferimento	124

<b>Conclusioni</b>	VI
<b>Bibliografia</b>	XI
<b>Ringraziamenti</b>	XIX

## **Introduzione**

In questi ultimi anni, come confermato dagli argomenti affrontati in svariati consensi scientifici sia in ambito nazionale che internazionale, il rilievo satellitare si è sviluppato e modificato continuamente, se qualche tempo fa, infatti, era piuttosto raro osservare qualche “collega” utilizzare in campagna uno strumento GPS per scopi tecnici, oggi assistiamo ad una situazione completamente opposta.

L’evoluzione della strumentazione ha permesso la nascita di modelli via via più versatili, leggeri, con autonomie, in termini di capacità di registrazione e alimentazione, sempre più ampie, inoltre il mercato, vista l’ampia concorrenza nel settore, ha assistito all’ingresso in commercio di modelli sempre più economici.

Se per un momento abbandoniamo il contesto geodetico, ci accorgiamo che siamo di fronte ad una nuova tecnologia e ad un nuovo mercato di ricevitori “a basso costo” utilizzati per la navigazione navale e automobilistica; l’incremento della vendita dei navigatori satellitari è stato talmente veloce che, in meno di due anni, il prezzo medio di un sistema si è ridotto di circa il 60%, e tale strumentazione è diventata parte integrante degli optional proposti dalle case automobilistiche alla stregua del car-stereo.

Di pari passo con l’evoluzione della strumentazione è andata l’evoluzione delle tecniche di rilievo, le applicazioni geodetiche del GPS sono andate migliorando con una progressione incredibile, il rilievo statico e post-processato si è andato sempre di più affiancando al rilievo in tempo reale e, quest’ultimo, si è avvalso di tecniche per il fissaggio delle ambiguità sempre più rapide e precise, fino ad arrivare, in molte applicazioni tecniche, ad essere sostituibile al rilievo statico stesso.

Uno degli ultimi “passaggi” può essere identificato con la nascita delle stazioni permanenti, che, in un certo senso, hanno avuto la funzione di fondere insieme le due metodologie, le SP devono sempre e comunque essere inquadrati in un sistema di riferimento e se, in prima battuta, le stazioni permanenti sono state identificate solo come “base per un rover” con il concetto di rete si è assistito ad un progressivo movimento alla tecnica “real time con approccio di rete”, identificabile, nel senso più ampio possibile del termine, con l’acronimo NRTK.

Il posizionamento in tempo reale basato su reti di stazioni permanenti è ormai una realtà, una testimonianza di questo può essere trovata nella nascita, anche in ambito italiano, di svariate reti gestite da enti privati che forniscono all’utenza un servizio di correzione in tempo reale a pagamento sotto diverse forme; a questo deve, ovviamente, essere aggiunto l’enorme lavoro svolto dalle comunità scientifiche, ad ogni livello, che ha permesso una comprensione approfondita sul funzionamento delle reti, delle, purtroppo, inevitabili problematiche legate

alla loro gestione e, senza dubbio, delle prestazioni attendibili dall'utente finale; con questo non si vuole assolutamente affermare che le reti di stazioni permanenti non hanno più "nessun segreto", anzi, ma sicuramente abbiamo assistito ad uno sviluppo delle metodologie e ad una più precisa identificazione delle domande da porsi nel prosieguo della sperimentazione.

Questa tesi di dottorato ha avuto la fortuna, o la sfortuna secondo i punti di vista, di svilupparsi proprio durante questo periodo di transizione, per questa sua natura gli argomenti trattati sono affrontati e riportati con l'ottica di passare al setaccio le problematiche e i vantaggi propri delle tecniche di rilevamento che si sono avvicendate e integrate nel corso del tempo.

Sebbene in questi ultimi anni la metodologia satellitare sia stata, forse erroneamente, identificata con la metodologia GPS, stiamo assistendo ad un'evoluzione continua dei sistemi, tra qualche anno sarà attiva la costellazione GALILEO, il GLONASS e il GPS stesso sono in fase di ammodernamento, per tali motivi ci si sta dirigendo, lentamente, ma inevitabilmente, ad una concezione più ampia del rilievo stesso tanto che, già oggi scrivendo questa introduzione, sembra anacronistico parlare di rilievo GPS in luogo di un più appropriato rilievo definito come GNSS.

A tal proposito nel primo capitolo del lavoro verranno passate in rassegna le novità, più o meno recenti, nel campo delle costellazioni e degli strumenti di misura, senza voler avere la pretesa di mettere un punto fermo e entrare troppo nel dettaglio saranno presentati gli aspetti più salienti riguardanti il funzionamento del sistema GALILEO e delle possibili problematiche e applicazioni legate all'integrazione dei dati provenienti da differenti sistemi; questo diventerà, entro i prossimi anni, il problema più grande in questo contesto, sono infatti noti i problemi con cui ci si dovrà scontrare in termini di definizione dei sistemi di riferimento, di prestazioni attese, dell'utilizzo più proficuo delle nuove frequenze e così via; fondamentalmente ci si troverà nella condizione di dover studiare, per la prima volta, un sistema nato e sviluppato principalmente per scopi civili, questo aspetto sicuramente porterà il mondo scientifico a studiare situazioni con caratteristiche di novità sorprendenti.

Purtroppo, alla data della redazione del presente lavoro, è possibile trovare solo in parte qualche risposta, la maggior parte degli aspetti dovrà essere approfondita nei prossimi anni quando, si spera, le costellazioni saranno pienamente operative e aggiornate.

Ci troviamo effettivamente ad una svolta dagli sviluppi futuri difficilmente prevedibili, se non a gradi linee, con un po' di fantasia, ma anche, forse, con un po' di malinconia, si potrebbe ipotizzare, tra qualche anno, la possibilità di avere accuratezze altissime utilizzando un solo

strumento in “point-positioning” e lasciare alle reti permanenti il solo compito di mantenere aggiornato il sistema di riferimento.

In Italia il primo tentativo di generalizzare per l’utenza il rilievo GPS può essere identificato con la realizzazione della rete geodetica GPS IGM95, questo progetto ha avuto il privilegio di essere la prima rete di ordine 0 sul territorio italiano, rappresentando l’unica realizzazione italiana del sistema ETRS; l’IGM95, a nostro parere, ha contribuito alla diffusione della tecnologia satellitare geodetica fra i nostri professionisti del settore; le prime monografie dell’IGM, prima della nascita del software Verto, riportavano indicazioni dei parametri di trasformazione locali fra IGM95 e ROMA40, questo ha permesso agli utilizzatori di “entrare” con il proprio rilievo nel sistema nazionale in maniera, per quanto possibile, univoca.

Alla data odierna il “sistema” IGM95 sembra “mostrare il fianco” agli anni, la rete ha una dozzina d’anni e, vista la profonda mutevolezza del territorio italiano, anche dal punto di vista dell’urbanizzazione, la posizione di molti vertici non è più la stessa, tanto da rendere la rete profondamente deformata.

È stato annunciato, ma al momento non ancora effettuato, un ricalcolo della rete IGM95 con inquadramento in ITRF, questa operazione, a nostro avviso inevitabile, potrebbe dare nuova linfa a questa rete e ad un suo utilizzo più dedicato anche in relazione con le reti di stazioni permanenti.

Inoltre non dobbiamo dimenticare che la rete IGM95 è stata, in molte parti, raffittita grazie al progetto di densificazione a sette km nato dall’Intesa nel 1996; la presenza più capillare di vertici nel territorio è un patrimonio prezioso che dovrebbe essere conservato e tenuto aggiornato per l’utenza.

Le reti di SP in Italia sono nate soprattutto per scopi scientifici e, sebbene ne esistano alcune per scopi professionali, solo poche di esse possono vantarsi di garantire all’utenza un servizio continuo ed esente da malfunzionamenti; le sperimentazioni devono proseguire in molte direzioni, sicuramente possiamo sostenere di aver capito le prestazioni che dobbiamo attenderci per un utilizzo tecnico del posizionamento in tempo reale tramite rete, ma molto è ancora da indagare per esempio per l’utilizzo delle reti per scopi di monitoraggio o sulla realizzazione di reti di stazioni permanenti in situazioni di emergenza.

Molte delle sperimentazioni condotte sono state volte alla comprensione della sostituibilità, o quanto meno dell’integrazione, del rilievo post-processato con il rilievo in RT; i risultati ottenuti sono stati molto incoraggianti tanto da farci sostenere che le precisioni raggiunte con un rilievo NRTK, fermi restando alcuni accorgimenti di carattere tecnico, sono sufficienti per molte applicazioni professionali; ad esempio, la precisione sulle coordinate della rete IGM95

è dichiarata di circa 5 cm ed in molte delle sperimentazioni eseguite le precisione raggiunte dall'approccio NRTK sono state superiori.

Possiamo affermare, globalmente, di essere arrivati nello studio delle reti di SP a poter mettere alcuni punti fermi, per il futuro bisognerebbe cercare di trovare quella serie di soluzioni che permetta ai sistemi di evolversi e diventare sempre più competitivi. La mancanza nel nostro paese di una rete di ordine 0 per le reti di stazioni permanenti inizia a farsi sentire, i vari inquadramenti regionale iniziano a mostrare i propri punti deboli quando si parla di integrazione dei dati fra reti adiacenti.

Se, come abbiamo detto, le reti italiane sono principalmente scientifiche, bisogna che diventino al più presto reti di servizio, in grado di garantire all'utenza informazioni continue e affidabili, in questo contesto si inserisce la necessità di provvedere ad una certificazione delle reti, ma, a nostro avviso, tale certificazione non dovrebbe ridursi ad un insieme di accorgimenti per la realizzazione e la gestione delle reti stesse, né tantomeno potrebbe essere utile un "bollino" di qualità rilasciato da un ente che si occupa di questioni geodetiche (IGM o altro); certificare una rete dovrebbe essere un passo in più, da raggiungere una volta raggiunta la coerenza e la correttezza geodetica, la certificazione, a nostro parere, dovrebbe riguardare principalmente il servizio verso l'utenza, la continuità dello stesso e la qualità finale dei dati forniti.

# **1**

## **Evoluzione e modernizzazione dei sistemi satellitari**

## **1.1 Il Sistema Galileo**

GALILEO ha l'onore di rappresentare il primo sistema di navigazione e posizionamento commerciale nato per scopi civili, inoltre assicurerà un servizio complementare e integrante con l'attuale sistema GPS.

GALILEO avrà una costellazione di 30 satelliti operativi, su tre piani orbitali che copriranno l'intero globo terrestre, in maniera da fornire, attraverso la trasmissione di codici e segnali modulati in tripla frequenza, vari servizi a più livelli eseguendo congiuntamente un continuo monitoraggio globale a terra.

Il progetto dovrebbe essere completamente operativo per il 2012 con la costellazione di 30 satelliti, il sistema opererà in una realizzazione del sistema di riferimento geodetico basato su ITRF ed una versione europea del TAI (Temps Atomique International) per quanto concerne il mantenimento di campioni temporali; GALILEO è sotto il controllo della EU, è fornito da Concessionari privati ed è sottoposto sia a servizi gratuiti che a pagamento, questi ultimi a qualità e integrità garantita.

Secondo le attese, GALILEO dovrebbe fornire un servizio di navigazione satellitare più efficiente e sicurose confrontato con gli attuali sistemi GPS e GLONASS.

Il 26 dicembre 2005 è avvenuto il lancio del primo satellite sperimentale (Giove A), dalla base di Baikonur, nel Kazakistan, il satellite si è attestato su un'orbita quasi circolare ad altezza di 23000 km, inclinata di 56 gradi sull'equatore. Il satellite sperimentale si propone le seguenti finalità:

- assicurare l'uso delle frequenze assegnate dalla ITU (International Telecommunications Union);
- Verificare il funzionamento degli orologi
- Verificare l'integrità del segnale

Il lancio del secondo satellite per la validazione, Giove B, costruito in Europa da “Galileo Industries” previsto per l’aprile 2006 è slittato a fine 2007.

Attraverso questa missione si cercherà di dimostrare il possibile utilizzo di un orologio PHM (Passive Hydrogen Maser) con stabilità migliore di 1 ns al giorno. Sulla costellazione operativa infatti vi saranno due orologi PHM e due orologi al rubidio che subentreranno in caso di avaria in casi di avaria.

Dopo Giove B, nel 2008 secondo il programma, ma forse più probabilmente intorno al 2010, saranno lanciati quattro satelliti completamente operativi (fase In-Orbit Validation: IOV), sia per il segmento spaziale che quello a terra dal punto di vista navigazionale; solo dopo che



sarà terminata questa fase inizieranno, nel 2010, i lanci della fase “Full Operational Capability”: FOC. (Manzino 2006).

Le frequenze riportate in Figura 1.1 vengono modulate con codici, di diversa frequenza, lunghezza del chip e fase.

Nome Banda	MHz	$(f_0^*)$	GPS	GALILEO			
				Open	Commercial	P.Regulated	SoL
L1 (E1)	1575.42	154	X	X	X	X	X
E6	1278,75	125			X	X	
L2	1227.60	120	X				
E5b	1207.14	118		X	X		X
L5 (E5a)	1176.45	115	X	X	X		X

**Figura 1.1 - Frequenze GALILEO e GPS**

Lo spettro di potenza del segnale è modificato dai codici stessi, nella terza colonna è riportato l'intero moltiplicatore della frequenza fondamentale che è di 10.23 MHz, si può affermare che lo spettro rappresenta la potenza del segnale dispersa su tutta la larghezza di banda. Per rendere compatibili segnali sulla stessa frequenza (GPS L1 e Galileo L1 od E1, oppure i codici civili e militari di GPS) i picchi di potenza hanno uno sfasamento più o meno accentuato.

Sia per le nuove generazioni di satelliti GPS che per i nuovi satelliti GALILEO una caratteristica comune è la nuova modulazione dei codici, questi ultimi saranno più precisi, in relazione alla loro lunghezza, al chip rate, e al tipo di modulazione; i valori annunciati riportano un rms di 10, 15 cm contro i 30 cm del codice C/A. Anche le fasi risulteranno più precise, sia per la possibilità di estrarre con procedure codeless, che per la maggior potenza del segnale senza tralasciare, ovviamente, la migliorata tecnologia di satelliti e ricevitori, per tali motivi si possono attendere rumori di circa 1-2 mm. Il miglioramento dei codici e deriva principalmente dal tipo di modulazione dei segnali trasmessi, fra le più note possiamo ricordare la modulazione BOC (Binary Offset Carrier), che consiste nel modulare un codice PRN con un'onda quadra. Il risultato numerico binario è il prodotto dei due codici.

Ad esempio il codice GPS militare M è del tipo BOC(10,5). Significa cioè che ogni chip del codice, in questo caso incognito, che è di 5 Mcps (5 Mega chip al secondo,) è modulato con un'onda quadra di 10 periodi di onda all'interno di 1 chip. Senza questa modulazione, in un secondo, si alternerebbero cinque milioni di segnali binari che non è detto cambino di segno, in quanto un numero binario può avere una successione di zeri o di uno continui per un certo

tratto. Con la modulazione, in un secondo, si è sicuri che questa alternanza avviene almeno cinquanta milioni di volte. (Manzino 2006)

Questa tecnica ha vari vantaggi fra cui possiamo ricordare:

- i codici sono più precisi (errore accidentale minore) e le fasi estraibili con migliore affidabilità;
- la stessa frequenza centrale può essere usata da GPS, Galileo od altre costellazioni diversamente incompatibili;
- hanno uno spettro abbastanza limitato in banda
- i codici BOC sono molto meno sensibili ai multipath;

### **1.1.1 I servizi previsti dal sistema GALILEO**

Una delle novità del sistema GALILEO è il suo carattere commerciale, per tale motivo sono previsti, per l’utenza pubblica e privata, vari servizi:

- Open Service (OS), basato su segnali “aperti” e gratuiti permette in maniera simile al GPS un posizionamento “point positioning” a 4m di precisione, al 95% di probabilità.
- Safety of Life Service (SoL) migliora le performances del servizio OS per mezzo di allarmi all’utenza in caso di mancanza di certi margini di precisione
- Commercial Service (CS) permette l’accesso a due altri segnali, E6b/c che migliorano la precisione del posizionamento (point positioning a 1 m 95%).
- Public Regulated Service (PRS) fornisce posizione e tempo ad utenti che richiedono elevata continuità del servizio con accesso controllato. Sono allo scopo usati due segnali di navigazione con codici crittografati (E6a, E1a).
- Search and Rescue Service (SAR). Il servizio permette di trasmettere su tutto il globo un segnale di allertamento. Permetterà di migliorare il servizio internazionale COSPAS-SARSAT di ricerca e salvataggio.

### **1.2 Modernizzazione dei sistemi satellitari (GPS e GLONASS)**

I sistemi di posizionamento hanno subito, negli ultimi dieci anni, un’evoluzione enorme, tanto che un paragone efficace potrebbe essere effettuato forse solo con il progresso informatico



che ha reso gli strumenti hardware e software, da patrimonio di nicchia, uno strumento comune in tutte le professioni e in svariati contesti sociali ed economici.

Parte di questa evoluzione può essere spiegata con una richiesta sempre crescente dell’utenza di un sistema satellitare che avesse il più possibile caratteristiche e finalità civili, basti pensare all’incremento dei navigatori satellitari, marini prima e automobilistici successivamente.

Per quanto riguarda il sistema GPS, che, benché stiamo assistendo alla nascita di nuovi sistemi, in un modo o nell’altro è ancora il sistema di “riferimento”, tanto da far commettere spesso l’errore “letterario” dell’identificazione dei sistemi GNSS con il sistema GPS, possiamo sottolineare che dal settembre 2005 sono attivi i satelliti di tipo GPS II-R con attiva la frequenza L2C.

Nei prossimi anni sono previste nuove generazioni di satelliti fino ad arrivare, nel 2013, al blocco IIIA, rispetto alla tabella riportata nel seguito, però, dobbiamo evidenziare molti ritardi rispetto alle previsioni annunciate, questo, purtroppo, fa mal sperare che le tempistiche possano essere rispettate nei prossimi anni; i ritardi avvenuti in questi anni sono da relazionarsi con la “scadenza a lungo termine” della costellazione esistente, tanto da portare il numero dei satelliti dai 24 previsti ai 29 operanti dei blocchi II, IIA, IIR, IIR-M, il più datato dei quali è del 1990, da quasi vent’anni in orbita.

Satelliti	Innovazioni rispetto ai Blocchi precedenti	Data di lancio
IIR-M	Secondo segnale civile (L2C) M-code (L1M e L2M); Eliminazione SA Anti-jam con “flex power”	Iniziato a settembre 2005. Previsti 3 lanci all’anno
IIF	Terzo segnale civile (L5) ;2 Ru, 1 Cs Anti-jam con “flex power” (migliore potenza su P e M)	Inizia nel marzo 2008
IIIA	Aumento del potere anti-jam Aumento sicurezza ed accuratezza Navigazione sicura; Integrità controllata Compatibilità con i Blocchi precedenti Quarto segnale civile (L1C)	Inizia nel 2013

**Tabella 1.1 - Tempistiche di evoluzione del sistema GPS**

Le innovazioni principali, previste per marzo 2008 con il blocco IIF possono essere indicate come:

- La terza frequenza L5
- Nuovi codici previsti sulla L2 e L5



Cercando di prevedere le conseguenze di questi cambiamenti possiamo certamente dire che si assisterà ad una riduzione dei tempi per il fissaggio delle ambiguità poiché la disponibilità di una nuova frequenza permetterà la formazione di due nuove combinazioni di frequenze, L1/L5 ( $f=399\text{ MHz}$ ,  $\lambda=75\text{ cm}$ ) e L2/L5 ( $f=51\text{ MHz}$ ,  $\lambda=5,87\text{ m}$ ), chiamate rispettivamente ML (Medium Lane) e XWL (Extra Wide Lane).

La frequenza L5, inoltre, permette di rendere il sistema meno attaccabile grazie ad una maggiore potenza e larghezza di banda e, combinato con le frequenze già presenti apporterà dei vantaggi significativi in termini di stima del ritardo ionosferico.

La piena disponibilità su tutti i satelliti della frequenza L2C sarà completa solo, dopo il 2013, relativamente alla L2C si la modulazione della portante da due codici, CM e CL, e da due messaggi di navigazione, il già presente NAV e il nuovo CNAV.

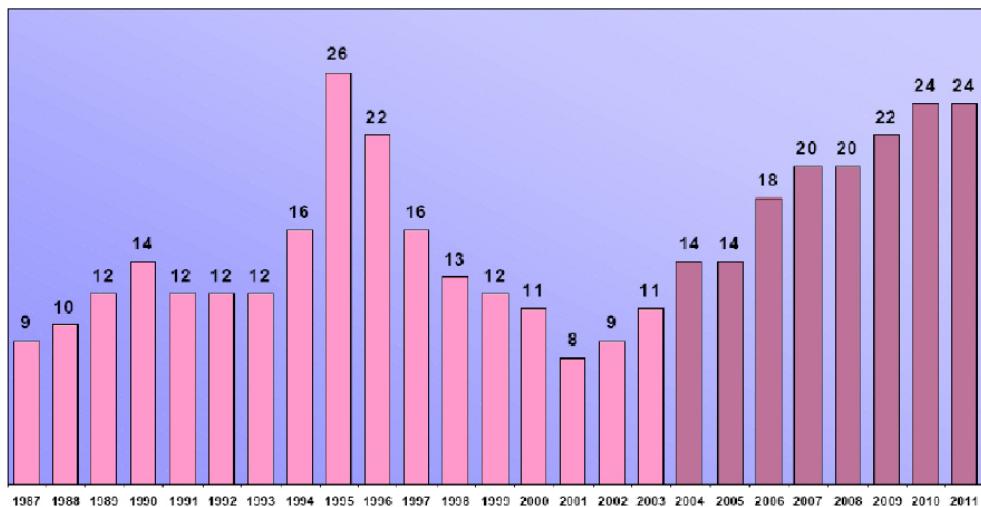
Il nuovo segnale a disposizione è parte del progetto ICE (Improved Clock and Ephemeris), che si propone come scopo, come si può ricavare dal nome stesso, di rendere migliori le prestazioni di orologi, effemeridi e stime ionosferiche e di rendere disponibili questi dati tramite il nuovo messaggio CNAV, tale progetto coinciderà con l’ampliamento del segmento di controllo, in collaborazione con il NGA (National Geospatial Intelligence Agency), tale miglioramento renderà ancora più precise le effemeridi trasmesse, che già sono state migliorate, in termini di precisione, dai 3 m del 1994 ad 1 m nel 2005, si prevede, con la messa in funzione del blocco IIF nel 2008 di arrivare a precisioni decimetriche, valutabile tramite rms fornito dall’URE (User Range Error).

I dati navigazionali saranno trasmessi con parametri Kepleriani, attraverso *Type* dedicati, ma, in base alla conoscenza dei nuovi costanti di fitting, verrà migliorata la precisione finale dei prodotti forniti all’utenza.

Il secondo sistema satellitare per così dire “storico” è il GLONASS, anche quest’ultimo serve a scopi sia civili che militari, e nel 2001 è stato approvato il programma, dal governo federale Russo, per il ripristino e l’ammmodernamento della costellazione.

E’ previsto, entro il 2008, una costellazione di 18/20 satelliti ed entro il 2010 il completamento della costellazione con 24 satelliti, i nuovi satelliti hanno vita prevista di 7 anni, circa il doppio rispetto ai precedenti, e la nuova generazione, denominata con codice K, dovrebbe portare la vita media dei satelliti a 10 anni.





**Figura 1.2 - Tempistiche di evoluzione della costellazione GLONASS**

I satelliti del blocco M, pur essendo più pesanti dei precedenti: 250 kg contro 160 kg, hanno un consumo inferiore di energia, orologi cinque volte più stabili ( $1 \times 10^{-13}$  al giorno), un segnale civile sulla seconda frequenza.

Nel blocco K è prevista una terza frequenza con un segnale di integrità, le effemeridi diventeranno maggiormente precise fino al livello submetrico. Il segmento di controllo a terra sarà ammodernato, ed un sistema di certificazione per applicazioni salvavita sarà attivato, nonché, come per Galileo, l'implementazione di un servizio “Search and Rescue” sarà disponibile per l'utenza.

In questo momento il punto debole del sistema è la precisione delle effemeridi trasmesse che presentano scostamenti addirittura superiori ai 10 m.

Per i satelliti del blocco K è prevista la trasmissione nelle effemeridi di un ritardo tra la costellazione GLONASS e la costellazione GPS. Questo ritardo,  $t_{GPS}$ , già oggi si stima possa essere valutato con precisione di 15ns, pari in lunghezza a circa 4.5m.

Similmente al GPS sarà trasmesso un valore di precisione URA, (User Range Accuracy) attualmente previsto ma non usato. Ricordiamo che da tempo è possibile disporre in un unico sistema di riferimento (IGb00 attualmente) le effemeridi precise di GPS e Glonass, grazie ai calcoli forniti dall'IGS delle numerose stazioni permanenti che, su tutto il globo tracciano entrambe le costellazioni. La precisione finale delle effemeridi, calcolate settimanalmente con latenza quindicinale è migliore od uguale a 10 cm. È possibile disporre di effemeridi rapide, entro 17 ore dalla misura o quelle finali, entro 13 giorni. Non è possibile disporre in questo caso delle effemeridi ultra rapide predette. Per la costellazione K la Russia prevede in ogni caso la coerenza con il sistema di riferimento ITRF anche per le effemeridi broadcast. Il

messaggio di navigazione subirà, con tale costellazione, un ammodernamento. Attualmente la durata di trasmissione di questo segnale è più breve di quella per il GPS: solo 2.5 minuti, ed è diviso in cinque parti dette “superframes”. Contrariamente al sistema GPS le effemeridi consistono in posizioni e velocità nel sistema ECEF PZ-90. Sono fornite anche le accelerazioni causate dalla Luna e dal Sole e vengono usualmente trasmesse ogni 30 minuti. Ricordiamo che le attuali due frequenze portanti variano da satellite a satellite:

$$f_1 = 1602 + 0.5625k \text{ (MHz)}$$

$$f_2 = 1246 + 0.4375k \text{ (MHz)}$$

Il numero k corrisponde al numero del satellite o del canale e, dal 2005, varia tra -7 e +8, anche se i canali +5 e +6 sono usati per scopi di test. Queste nuove frequenze vengono in gergo impropriamente chiamate “negative”. È possibile utilizzare anche più di 24 satelliti in quanto lo stesso canale viene utilizzato sempre da satelliti antipodali, cioè per satelliti sullo stesso piano orbitale ma separati in argomento di latitudine di 180 gradi. In questo modo il rapporto fra le frequenze si mantiene sempre di  $f_1/f_2 = 9/7$ . La terza frequenza, centrata su 1201.5 MHz sarà introdotta con la costellazione K, e sarà utilizzabile con il suo codice anche per scopi civili.

### **1.3 L’integrazione delle osservabili di differenti sistemi GNSS**

Due o più sistemi di navigazione sono compatibili ed interoperabili solo se gli stessi utilizzano un comune sistema di riferimento che viene di fatto trasmesso nelle effemeridi, al giorno d’oggi, con le costellazioni esistenti, questo non è ancora possibile. Il GPS si basa, come noto, sul sistema WGS84 nella sua ultima versione G873, risalente al 1996, coerente con ITRF (International Terrestrial Reference Frame) a circa 10cm.

Per Glonass si utilizza attualmente il sistema PZ90, per Galileo è previsto un GTRF (Galileo Terrestrial Reference Frame) che realizza l’ITRS (International Terrestrial Reference System) ed una versione europea del TAI (Temps Atomique International) per quanto concerne il mantenimento di campioni temporali.

Una domanda da porsi è quale sia, o quale possa essere la soluzione migliore, una possibile risposta potrebbe essere il sistema ITRS, realizzato e mantenuto dal Centro di Produzione ITRS dello IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service). Attualmente l’ultima realizzazione è ITRF2005, molto simile alla precedente ITRF2000. Il sistema è



calcolato attraverso varie tipologie di dati, quindi non solo le misure delle stazioni permanenti GPS, come accade per l'IGB00, ma anche le VLBI (Very Long Base Interferometry), le SLR (Satellite Laser Ranging) e le DORIS (Determination d'Orbite et Radio-positionnement Integre par Satellite).

Non potrà essere completamente coincidente con un sistema definito dalle sole misure GPS o GNSS. Galileo inoltre non potrà adottare lo stesso sistema di riferimento GPS anche per mantenere la relativa indipendenza. Il post processing non dovrebbe comunque rappresentare un problema poichè può essere affrontato e risolto attraverso una trasformazione tra i sistemi di riferimento. Per quanto riguarda l'unità di tempo: Galileo System Time (GST) e GPS time saranno (purtroppo) due realizzazioni dello stesso UTC = Universal Time Coordinated TAI (Atomic Time).

In tempo reale, invece, nascono dei problemi di interoperabilità, e, anche se gli USA, la Russia e l'UE sembrano intenzionati a rendere le effemeridi trasmesse sempre più coerenti con il sistema ITRF, rimangono delle discordanze. Inoltre è previsto nel messaggio navigazionale delle tre costellazioni un valore di ritardo che permetta il collegamento almeno con la scala GPS. In ogni caso la differenza temporale  $t$  tra costellazioni sarà dell'ordine del nanosecondo ( $10^{-9}$  s=30 cm) e potrebbe essere determinata sfruttando un'osservazione da un satellite. Queste differenze non sono tali da interessare le numerosissime applicazioni di bassa precisione. Per quanto riguarda l'accoppiamento GPS e Galileo, Galileo Geodesy Service Provider (GGSP) prevede di rendere compatibile GTRF con ITRF entro 3 cm. Dello stesso ordine di grandezza (3-6 cm), si prevede la coerenza con i sistemi IGBxx o IGcxx.

Alcune peculiarità rendono il GLONASS differente dal più noto GPS. Innanzitutto la costellazione GLONASS conta attualmente 11 satelliti distribuiti sui 3 piani orbitali previsti con una inclinazione di  $64,8^\circ$  (55 nel GPS). Il sistema lavora con la doppia portante, ma in questo caso ciascun satellite occupa un differente *slot*, in termini di frequenza, rispetto agli altri contemporaneamente in vista. Sia la L1 che la L2 prevedono dei valori di frequenza variabili e scalati rispetto ad un valore standard.

	Confronto GLONASS / GPS	
	GLONASS	GPS
Numero di satelliti	24	24
Piani Orbitali	3	6
Inclinazione dell’orbita	64.8°	55°
Quota orbitale	19,130 km	20,180 km
Periodo di rivoluzione	11h15m40s	11h58m00s
Riferimento per le effemeridi	Posizione, velocità e accelerazione in sistema ECEF	Orbita Kepleriana
Datum	PZ-90	WGS-84
Datum Temporale	UTC (Russia)	UTC(NO)
Codifica	FDMA	CDMA
Portanti	L1 L2	1602.0 - 1614.94 MHz (*) 7/9 L1 60/77 L1
		1575.42 MHz

**Figura 1.3 - Alcune caratteristiche delle costellazioni GPS e GLONASS**

Solo i satelliti che si trovano alle estremità di una traiettoria orbitale possono avere la stessa frequenza, non potendo essere ricevuti da nessun utente contemporaneamente. Questa caratteristica introduce un’importante differenza con il GPS dove invece la frequenza nominale è la stessa per ogni satellite, infatti, nell’elaborazione dei dati in modalità statica, non potranno effettuarsi le doppie differenze (DD) miste, ovvero che coinvolgano due satelliti di costellazione differente, in quanto i contributi connessi alle frequenze in gioco, ovvero gli errori di sincronizzazione dei ricevitori, non si elidono. Pertanto il sistema di equazioni alle osservazioni si formerà sommando le DD delle osservabili GPS e quelle GLONASS.

Nel posizionamento differenziale di precisione, le differenze temporali sono praticamente eliminate e, per basi sufficientemente corte, sono insensibili anche le modeste differenze previste nei sistemi di riferimento. Un ruolo fondamentale per questi calcoli è giocato dalla rete di stazioni permanenti, infatti, qualora attrezzate con strumentazioni in grado di tracciare più di una costellazione, possono essere considerato un possibile “*trait d’union*” fra i differenti sistemi di riferimento. In questa direzione si è proceduto nel progetto IGLOS e la stessa strada potrebbe essere ripercorsa anche per Galileo; a tali propositi la IAG (International Association of Geodesy) ha formato un gruppo di studio, assieme alla Commissione IV e all’IGS, con il nome “Use of GNSS for Reference Frames”, fra i suoi scopi, come si evince dal nome stesso, possiamo trovare lo studio potenzialità delle reti di stazioni permanenti GNSS per il mantenimento del sistema di riferimento.



#### **1.4 La nuova generazione di ricevitori GNSS**

Sul mercato sono già disponibili alcuni ricevitori che, almeno in base alle specifiche tecniche fornite, permettono di tracciare le future frequenze Galileo, GPS e Glonass. Fra questi possiamo ricordare:

- Topcon®, che ha annunciato il ricevitore GR3 a 72 canali “universali” in grado di tracciare le tre costellazioni;



**Figura 1.4 - Logo promozionale e nuovo ricevitore Topcon G3**

- Javad® , che ha annunciato il ricevitore GeNiuSS;
- NovAtel® con il ricevitore *15a* in grado di tracciare due frequenze GPS e due Galileo;



**Figura 1.5 - Il ricevitore Novatel GALILEO 15a**

- Septentrio® ha prodotto il ricevitore AsteRx1 in grado di tracciare anch'esso queste due costellazioni.



**Figura 6 – HW del ricevitore GNSS Septentrio ASTERX1**

Non bisogna, ovviamente, dimenticare che le costellazioni non sono ancora ammodernate e, nel caso di GALILEO, non ancora in orbita; inoltre è facile prevedere che il mercato proporrà una vasta fascia di ricevitori per diversi tipi di applicazioni.

Molto probabilmente, comunque, il mercato verrà occupato da ricevitori che rientrano nelle categorie che già conosciamo:

- i ricevitori geodetici di alta precisione, per stazioni permanenti;
- i ricevitori geodetici per applicazioni RTK;
- i ricevitori per applicazioni GIS;
- ricevitori a basso costo per la navigazione (marittima e automobilistica).

È chiaro che i ricevitori più costosi e più precisi saranno in grado di tracciare le tre frequenze GPS, Glonass e le tre frequenze Galileo aperte a tutti. Tali ricevitori sono già tecnicamente disponibili sul mercato a costi, tuttavia, tre volte superiori a quelli di un ricevitore GPS geodetico. L’applicazione ideale è proprio per stazioni permanenti, l’ideale accessorio è un orologio al rubidio e il beneficio che potrà dare alla comunità intera è l’unificazione dei tre sistemi di riferimento spazio temporali GNSS. Ovviamente saranno utilizzati ancora all’interno di reti di stazioni permanenti per il posizionamento in tempo reale. (Manzino, 2006).

Secondo il parere di alcuni studiosi (Verhagen, 2006) i ricevitori per scopi RTK, potrebbero essere più semplici ed economici. poichè potranno essere solo GPS + Galileo. Le tecniche di acquisizione di questi ricevitori a duplice costellazione (CDMA) sono molto simili e più semplici rispetto ai ricevitori Glonass (FDMA) e i ricevitori sono molto più economici.

I segnali Galileo dovrebbero essere migliori degli attuali segnali GPS e, almeno in parte, superiori anche a quelli di GPS ammodernato; ciascun segnale Galileo include un cosiddetto “segnale pilota” che può essere acquisito indipendentemente. Ciò ha un positivo impatto

proprio nelle applicazioni RTK poichè, quando si rilevasse una di perdita di contatto (cycle slip) la riacquisizione della fase, diversamente a quanto succede con il GPS, sarebbe pressoché immediata.

Come visto nei paragrafi precedenti, gli schemi di modulazione delle fasi rendono i codici più precisi e meno soggetti al multipath; economicamente svantaggioso sarebbe invece il numero di frequenze che dovrebbero tracciare, pari a quattro, con due frequenze in comune: L1 con E1 e L5 con E5, ciò comporterebbe aggravi di costo non tanto nei ricevitori quanto nelle antenne.

I nuovi ricevitori non dovrebbero far uso di schemi indiretti di tracciamento della portante L2 (codeless o semicodeless), una possibile soluzione, secondo gli autori citati, sarebbe quella di utilizzare le sole due frequenze comuni GPS e Galileo, queste frequenze sono infatti riservate all’Aeronautica (ARNS Aeronautical Radio Navigation Service) e quindi protette sia per scopi aeronautici che civili; queste bande infine hanno la massima separazione in frequenza e consentono una buona stima della ionosfera all’interno delle distanze tipiche del posizionamento RTK (che potrebbero essere aumentate a una ventina di km).

Le antenne in questo caso sarebbero molto semplici da costruire. Questa strada, seguita da Septentrio, è già stata adottata anche da NovAtel con il ricevitore 15-a. Un vantaggio non trascurabile di questi ricevitori a doppia costellazione rispetto alle attuali due frequenze GPS, è la possibilità di tracciare contemporaneamente un alto numero di satelliti, particolarmente utile in città o in zone boscose, dove i codici Galileo promettono una resa migliore.

Vi sono ragioni per cui i ricevitori di fascia elevata sono già oggi disponibili sul mercato, mentre quelli di fascia minore, salvo due eccezioni, non sono presenti. La prima è questi ricevitori di alta precisione hanno costi che compensano l’alta tecnologia e il basso numero di esemplari prodotti, la seconda è la tecnica di costruzione FPGA (Field Programmable Gate Array). Per spiegare il vantaggio in modo poco corretto ma abbastanza chiaro, questa tecnica permette di costruire ricevitori il cui firmware è completamente programmabile attraverso opportuno software. Ciò consente di costruire ricevitori dotati di “generic / universal channel”, cioè di canali in grado di tracciare un generico segnale di una generica costellazione, quindi già pronto in teoria, a tracciare segnali non ancora disponibili.

Ad esempio, il ricevitore NovAtel 15-a dispone di 16 canali in tutto, ma questi canali possono essere utilizzati, a seconda del desiderio dell’utente, in cinque configurazioni diverse. Nella configurazione numero 4 ad esempio si prevedono 6 canali GPS L1, cinque per Galileo L1 e cinque per Galileo E5a. Rimangono da completare le previsioni inerenti i nuovi ricevitori per applicazioni GIS. Molto probabilmente saranno ricevitori identici o molto simili a quelli



RTK, molto meno costosi grazie solo al fatto di non avere al loro interno grandi capacità di calcolo in grado di ottenere il posizionamento RTK, ma solo quelle necessarie a lasciare i codici con le fasi od, al più, ricavare il posizionamento differenziale “float”, con semplici tecniche di misura. Saranno ricevitori in grado di tracciare entrambe le costellazioni anche per permettere di ricevere un ampio numero di satelliti anche in condizioni sfavorevoli dovute a numerose ostruzioni, dotati al solito di un ampio schermo per visualizzare la cartografia esistente ed inserire in mappa le entità rilevate. La gran parte del mercato dei ricevitori GNSS sarà però costituito da ricevitori in grado di essere inseriti nei telefoni cellulari o nelle automobili. Allo scopo, anche in Italia, all’Istituto Superiore Mario Boella (<http://www.ismb.it/>) si stanno studiando chip di dimensioni adatte ai telefonini, in grado di costare non più di 5 US\$ (alcuni puntano ad avere chip da 2\$!). Per queste applicazioni è privilegiato Galileo, a motivo del fatto che è un sistema civile e che è dotato di un messaggio di integrità sui codici.

**2**

## **Il Rilievo di Reti statiche di Raffittimento**

## **2.1 La rete IGM95**

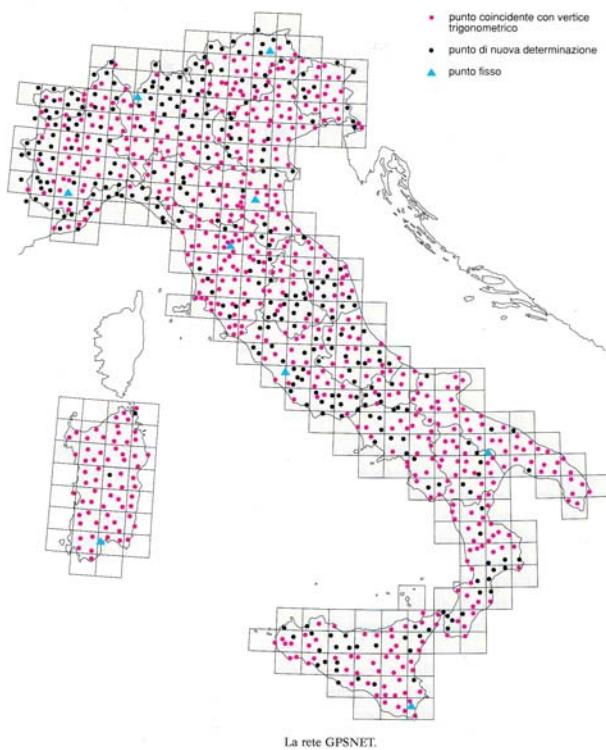
Il progetto IGM95 è stato intrapreso nel 1992 al fine di determinare una nuova rete fondamentale che si estendesse sull’intero territorio nazionale, tale progetto prevedeva la realizzazione, (identificazione, materializzazione e misura) di circa un migliaio di punti, distribuiti omogeneamente ed in posizioni facilmente raggiungibili e buoni dal punto di vista del rilievo con tecnologia GPS, inoltre dovevano essere per quanto possibile collegati alle reti nazionali di triangolazione e livellazione. Il lavoro di misura e successiva rielaborazione è durato quattro anni ed ha prodotto la rete IGM95, la quale può contare, oltre ai 1236 punti del progetto originale, un numero sempre crescente di vertici derivanti dalle successive operazioni di raffittimento a sette chilometri. Il progetto è stato sviluppato in modo da garantire che circa il 66% dei nuovi punti fosse posto in coincidenza, o comunque collegabile, con i punti della rete di triangolazione classica, mentre il 34% circa sono stati quotati e associati alla rete di livellazione geometrica di alta precisione.

Con il progetto si prevedeva di coprire tutto il territorio nazionale con una nuova rete geodetica tridimensionale GPS, che avesse caratteristiche di precisione migliori di 5 cm nelle tre coordinate.

Con questa rete si è quindi riusciti a:

- dare all’utenza la possibilità di effettuare rilievi geotopografici con il GPS e riferire i risultati al sistema di riferimento nazionale con l’applicazione di opportuni parametri di trasformazione;
- determinare le relazioni fra gli vari sistemi geodetici (Roma 40, IGM83, EUREF, WGS 84 );
- contribuire, insieme con una rete associata di stazioni astronomiche, alla definizione del geoide nazionale ed al suo adattamento locale;

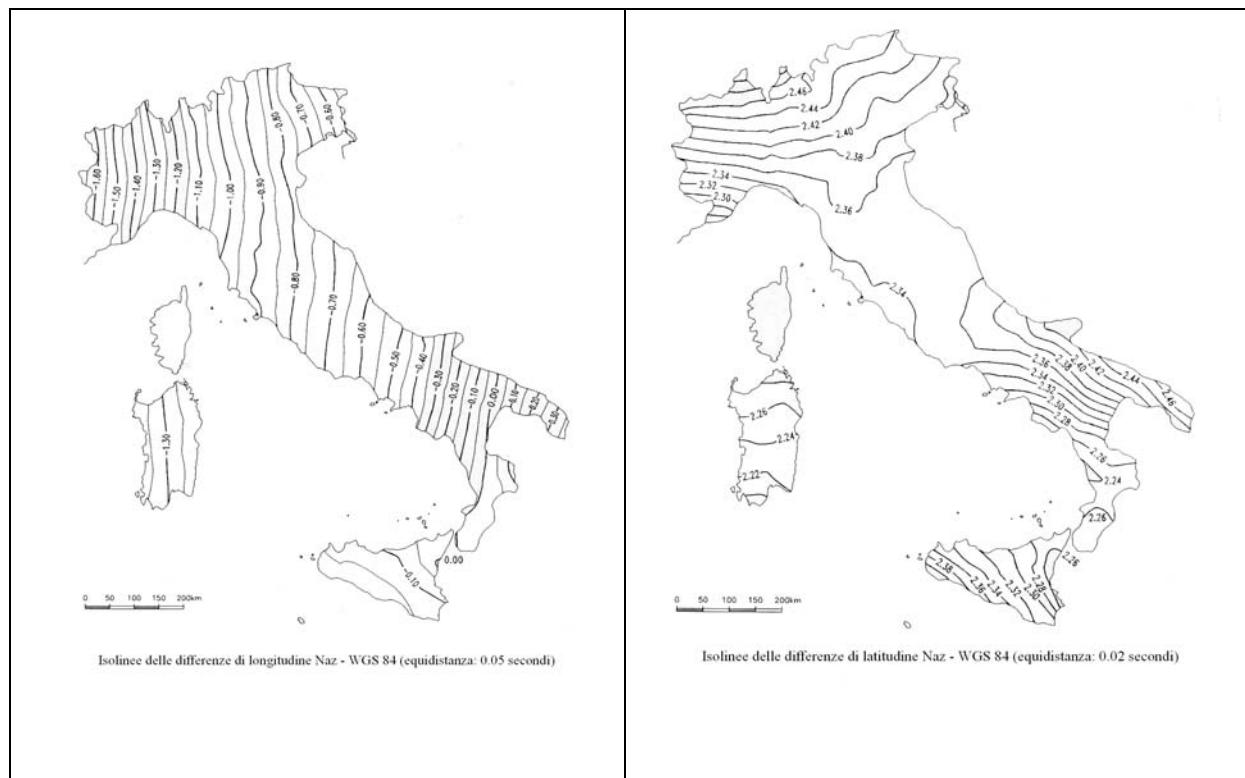




**Figura 2.1 - La rete IGM95**

Considerata l'estensione del territorio le operazioni di campagna del progetto IGM95 sono state pianificate per avere una durata, come già anticipato nell'introduzione, di quattro anni e, tenendo presenti i vari suoi aspetti, è stato diviso in tre sottoprogetti: GPSNET, GEOTRAV ed ASTRONET.

GPSNET è quello con cui più facilmente si identifica l'IGM95, ed è relativo all'istituzione e la determinazione della rete GPS nella sua totalità; al suo interno è stata ricercata la soluzione più adatta ed affidabile al problema del collegamento con la rete trigonometrica fondamentale ed alla produzione di opportuni parametri di trasformazione per il passaggio al sistema nazionale.



**Figura 2.2 - Isolinee delle differenze di Longitudine e Latitudine fra WGS84 e ROMA40**

Il sottoprogetto GEOTRAV, invece, è finalizzato al controllo di quei punti che per la loro vicinanza alle linee di livellazione nazionali possono essere intesi come collegamento col sistema altimetrico classico. ASTRONET non è interessato da misure GPS, si occupa di misure di astronomia geodetica su un sottoinsieme di punti della rete GPS per raccogliere informazioni utili alla definizione della deviazione della verticale da utilizzare per la definizione di un geoide locale migliore.

### 2.1.1. Caratteristiche della rete

I punti della nuova rete GPS, dove possibile, sono stati scelti in coincidenza con vertici trigonometrici di 1°, 2° e 3° ordine della rete di triangolazione preesistente aventi caratteristiche di accessibilità e facilità di stazione,(in mancanza di queste si è preferito materializzare un punto nuovo in prossimità del vertice), inoltre nella rete sono stati inclusi tutti i punti VLBI, SLR ed EUREF compresi nel nostro territorio.

Si è pervenuti così ad una interdistanza media di 20 Km il che significa la presenza di un punto ogni 250 Km<sup>2</sup>.

Il codice di identificazione di ogni vertice è formato da sei cifre, le prime tre indicano il numero del Foglio (1:100000, Serie V) dove ricade il punto, la quarta caratterizza il tipo di punto nella seguente maniera:



- 9, per un punto generico;
- 8, per un punto sul quale è stata eseguita una misura astronomica (sottoprogetto ASTRONET);
- 7, per un punto collegato ad un caposaldo di livellazione della rete altimetrica (sottoprogetto GEOTRAV);

Le ultime due cifre, invece, indicano il numero progressivo che identifica il vertice tra quelli ricadenti nello stesso Foglio, infine ogni punto è accompagnato dal nome della località in cui si trova, così, ad esempio, il vertice “Ravenna 089702 “ indica il vertice 02, di tipo 7 ricadente nel Foglio 089.

Per ognuno dei vertici, l'IGM fornisce una monografia, un esempio viene riportato nella figura 3.4, dove vengono riportate le informazioni necessarie per accedere e riconoscere il punto e le sue coordinate.

A fianco della descrizione della materializzazione sono riportate le coordinate in vari sistemi di riferimento:

- le coordinate geografiche nel sistema nazionale Roma 40;
- la quota ortometrica, non sempre disponibile, e comunque soltanto indicativa;
- le coordinate cartografiche Nazionali, Sistema Gauss-Boaga, nel fuso di appartenenza o in entrambi i fusi per la zona di sovrapposizione;
- le coordinate ellissoidiche nel sistema WGS 84 (realizzazione ETRF 89)
- le coordinate cartografiche piane nella rappresentazione Gaussiana dell'ellissoide WGS 84, con falsa origine di 500 Km (indicate con UTM-WGS 84).

 <b>SAN GIORGIO DI PIANO (Cabina ENEL)</b>		087901	0871 NE
Nazione: ITALIA Provincia: BOLOGNA Comune: SAN GIORGIO DI PIANO  Carabinieri: SAN GIORGIO DI PIANO		Proprietà: ENEL S.p.A. (Zona di Bologna Circondariale)  Indirizzo: Via Matteotti, 31 Comune: BOLOGNA Cap: 41029 Tel: 051 280111 Fax: Provincia: BOLOGNA	
<b>Materializzazione:</b> Centro del tipo "GPS C" fissato presso lo spigolo nord - est della soletta di copertura in cemento armato della cabina dell'ENEL in via Grudi int.4-4/5.		<b>Geografiche (Roma40)</b> <b>Piane (Gauss-Boaga)</b> <b>Geografiche (WGS84)</b> <b>Piane (UTM-WGS84)</b> $\varphi$ : 00°00'28,029"      F: N: 0.000.000,77 $\varphi$ : 00°00'30,398"      F: N: 0.000.000,72 $\lambda$ : -00°00'38,630"      E: 0.000.000,58 $\lambda$ : 00°00'28,876"      E: 0.000.000,03  Quota s.l.m.: 000      F: E: N:      Quota ell.: 00,43      F: E: N: E:	
<b>Accesso:</b>			
<b>Informazioni ausiliarie:</b> È necessario l'uso di una scala per accedere alla copertura della cabina.			
<b>Vertici collegati:</b>	<b>Parametri:</b> Tx: 000,60 Rx: 000,023" Ty: 000,43 Ry: 000,592" K: 000,04 Tz: 000,56 Rz: 000,961"  <b>Stazioni astronomiche:</b>		
Segnalizzato: 29/09/92 G2A92 Gianni Giovannoni Ultimo intervento: Ricognito 15/04/96 G1-96 Giorgio Levoni			

1997

ISTITUTO GEOGRAFICO MILITARE - Direzione Geodetica - via Di Novoli, 93 - 50127 FIRENZE - Tel. 055/227542 Fax: 055/411909

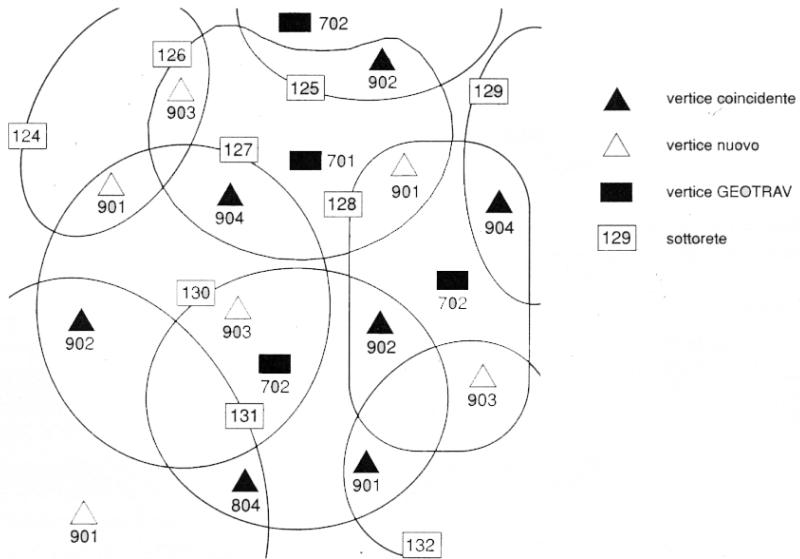
**Figura 2.3 - Monografia IGM95, (le cifre rappresentative sono state sostituite con degli 0)**

Il collegamento altimetrico alla rete di livellazione, che interessa circa il 34% dei punti, consente di effettuare un confronto diretto fra i due sistemi altimetrici (geoidico ed ellissoidico) lungo le linee di livellazione, infatti, per questi punti (serie 700), sono riportate sulle monografie sia le quote ellissoidiche che quelle ortometriche, così da avere la possibilità di una definizione puntuale dell’ondulazione. Ad ogni punto della rete GPS è generalmente associato un punto secondario, ad una distanza massima dell’ordine delle centinaia di metri, con la funzione di sostituire il punto originale nel caso andasse perso, inoltre le coordinate dei punti associati sono determinate rispetto a quelle dei principali, per tale motivo, un utente che abbia necessità di fare misure tradizionali, dispone già di un orientamento iniziale da cui sviluppare le proprie poligonali etc.

Come si è già avuto modo di precisare, le misure sono state effettuate nel corso di quattro anni, al termine di ogni anno di attività di campagna è stata eseguita una compensazione in blocco parziale comprendenti tutti i punti rilevati, le coordinate così compensate sono state caratterizzate da errori quadratici medi intorno ai 3cm.

Tutti i punti sono stati determinati secondo una procedura a sotto-reti, di quattro o cinque punti ciascuna, ed ognuna di esse ha due punti in comune con un’altra come si può vedere dallo schema riportato in Figura 2.4:





**Figura 2.4 - Elaborazione a Sottoreti**

Questo modo di procedere ha garantito la possibilità di misurare ogni vertice almeno due volte in sessioni diverse, offrendo così la possibilità di identificare eventuali errori grossolani; i punti rilevati nel primo anno di misure sono stati rilevati con ricevitori diversi da quelli usati negli anni seguenti, quindi, per evitare errori derivanti da una disomogeneità di acquisizione, nel 1996 sono stati rioccupati allo scopo di avere l'intera rete misurata con un unico parco strumenti.

Di tutti i dati disponibili, è stata effettuata una compensazione in due blocchi, uno formato dalla penisola italiana unitamente con la Sicilia, l'altro formato unicamente dalla Sardegna.

I calcoli sono stati affidati al programma *Geolab* vincolando la rete a nove punti della rete europea EUREF 89: *Monte Generoso, Monte Campiglio, Mondovì, Medicina, IROE-Firenze, Monte Mario, Matera, Noto* per il primo blocco, *Cagliari* per la Sardegna. Le precisioni raggiunte, insieme al numero delle misure e altri dati sono riportate nelle tabelle seguenti:

Dallo statico al Network RTK – L’evoluzione del rilievo satellitare

Summary of result	
No. of stations	1131
Coord. Parameters	3369
Free latitudes	1123
Free longitudes	1123
Free heights	1123
Fixed coordinates	24
3-D coord. diffs.	4938
Total observations	4938
Total parameters	3369
Degrees of freedom	1569
Estimated variance factor	825.518

2-D and 1-D Relative station Confidence Regions [m] - lo					
Mean values					
Semimajor axis		Distance	ppm I		Vertica
0.009		17773.27	0.7		0.018

Maximum values					
From	To	Semi-maj	Distance	ppm	Vertical
67903	67905	0.05	6288.52	7.84	0.092
148901	156904	0.013	65685.43	0.2	0.029
269702	269801	0.011	783.83	13.66	0.018
67903	67905	0.05	6288.52	7.84	0.092

Minimum values					
From	To	Semi-maj	Distance	ppm	Vertical
127903	127904	0.004	6364.51	0.56	0.007
12903	12905	0.006	637.6	8.53	0.012
203902	223902	0.006	48572.72	0.13	0.012
127903	127904	0.004	6364.51	0.56	0.007

Summary of result	
No. of stations	99
Coord. Parameters	294
Free latitudes	98
Free longitudes	98
Free heights	98
Fixed coordinates	3
3-D coord. diffs.	402
Total observations	402
Total parameters	294
Degrees offreedom	108
Estimated variance factor	575.1262

2-D and 1-D Relative station Confidence Regions [m] - la					
Mean values					
Semimajor axis		Distance	ppm	Vertical	
0.006		18191.367	0.46	0.012	

Maximum values					
From	To	Semi-maj	Distance	ppm	Vertical
206902	217702	0.011	26938.99	0.43	0.024
225903	233701	0.007	38500.06	0.18	0.014
169901	169902	0.007	1412.979	5.03	0.014
206902	217702	0.011	26938.99	0.43	0.024

Minimum values					
From	To	Semi-maj	Distance	ppm	Vertical
192701	192901	0.003	2403.86	1.33	0.006
169901	169902	0.007	1412.979	5.03	0.014
217902	218904	0.005	38134.8	0.12	0.01
192701	192901	0.003	2403.86	1.33	0.006

**Tabella 2.1 - Risultati della compensazione**

Dall’analisi dei risultati è possibile affermare che il progetto IGM95 è stato capace di fornire, almeno fino a qualche anno fa, un sistema geodetico nazionale di grande affidabilità, che ha favorito la diffusione dei metodi di rilievo GPS senza tralasciare l’importante aspetto dell’integrazione con il sistema nazionale; molto importanti sono state le operazioni di raffittimento della rete originaria, infatti, l’interdistanza media di 20 Km, sebbene garantisca un’ottima precisione, rappresenta un punto debole per i rilievi, poiché l’organizzazione delle attività di campagna può risultare troppo laboriosa, ed una diminuzione apprezzabile dell’interdistanza media dei vertici garantirebbe un utilizzo più pratico e veloce del GPS in ambito topografico.

Al giorno d’oggi la realizzazione italiana dell’ETRS89 non può essere considerata compatibile con l’ITRF, probabilmente la trasformazione fra ITRF2000 (o IGb00) e IGM95 può essere descritta mediante una trasformazione a 7 parametri di Helmert combinata con un campo di deformazione, caratterizzato da lunghezze d’onda dell’ordine delle decine di chilometri e i parametri della trasformazione e le caratteristiche del campo di deformazione potranno essere calcolati e analizzati solo a valle del rilievo e dell’elaborazione di un numero significativo di basi.

A tal proposito, per garantire una buona consistenza fra i sistemi di riferimento in cui tipicamente sono inquadrate le reti di stazioni permanenti, devono essere stimate periodicamente la trasformazione fra IGb00 e ETRS89 (trasformazione di Helmert), e l’ulteriore deformazione di IGM95, con una frequenza di aggiornamento tale da garantire accuratezza centimetrica nei risultati delle trasformazioni.

## **2.2 Il progetto GPS7**

Dopo l’istituzione dell’Intesa Stato-Regioni – Enti locali per i sistemi informativi, il Comitato Tecnico dell’Intesa ha formato nel 2000 un Gruppo di Lavoro con l’obbiettivo della realizzazione di un Capitolato per reti di “Raffittimento Primario” della rete GPS IGM95, con interdistanza dei vertici di 7 km; per tale motivo, negli ultimi anni, si è assistito ad una crescita del numero delle reti di raffittimento, queste ultime sono state progettate e commissionate da Province e Regioni che, viste le dimensioni medie delle reti stesse, sono gli Enti statali che hanno le competenze necessarie per la creazione e l’affidamento dei relativi bandi di gara.

Sebbene la possibilità di attuare le reti di raffittimento in ambito provinciale o regionale abbia sicuramente contribuito a velocizzare la realizzazione, la mancanza di un progetto unitario, a



livello nazionale, ha impedito una coerente ed uniforme diffusione dei dati aggiornati a sette km.

Per tale motivo, per molte reti di raffettimento, benché portate a compimento da molto tempo, non sono ancora disponibili le monografie definitive dei vertici; inoltre per molte reti realizzate in questi anni, l'IGM si è proposto come garante dell'integrità e della correttezza dei risultati, includendo, di fatto, le coordinate delle reti a 7 km fra i propri dati geodeticci; un approccio di tale genere, sicuramente garantisce un prodotto di qualità coerente con il resto della rete, ma priva, in una certa misura, gli enti appaltanti della proprietà dei dati rilevati, soprattutto per il loro utilizzo futuro per scopi di aggiornamento e ricerca scientifica.

### **2.2.1 Analisi del Capitolato d'appalto**

In questo paragrafo si cercherà di riportare, sinteticamente, le informazioni necessarie e le peculiarità del Capitolato d'appalto sviluppato per la realizzazione.

Nel Capitolato sono state definite le norme relative a:

- ubicazione e materializzazione dei nuovi vertici della rete;
- modalità di rilievo per le misure GPS;
- modalità per il controllo della qualità dei dati GPS;
- istruzioni per il collegamento altimetrico dei nuovi vertici;
- istruzioni per le procedure di collaudo.

Secondo quanto previsto dal Capitolato, un progetto esecutivo di Raffettimento Primario a 7 km della rete Geodetica Fondamentale Nazionale IGM95, deve essere congruente allo “Schema di Rete” fornito unitamente al bando di gara stesso. Lo Schema deve prevedere il numero di vertici da istituire e la consistenza di progetto della rete stessa, da analisi fatte contestualmente alle elaborazioni di svariate reti è risultato utile includere nel progetto anche vertici situati all'esterno della provincia (o della regione), tali vertici sono utili per le interconnessioni con le reti di raffettimento da realizzarsi in futuro.

I vertici costituenti la rete di raffettimento sono:

- pre-esistenti, appartenenti alla rete fondamentale IGM95;
- vertici preesistenti, appartenenti ad altre reti di importanza nazionale;
- vertici di nuova istituzione

Il capitolato prevede che, all'atto della materializzazione, dei vertici siano soddisfatti i seguenti requisiti:



- i vertici di nuova istituzione devono essere: materializzati in modo stabile, facilmente raggiungibili con autovettura e facilmente stazionabili in centro;
- in prossimità di essi non devono essere presenti ostacoli stabili, che impediscano la ricezione dei segnali satellitari, aventi un'elevazione superiore a  $15^\circ$  sul piano dell'orizzonte dell'antenna (considerata posta ad altezza normale sopra un treppiede);
- sino assenti disturbi elettromagnetici tali da rendere impossibile o difficoltosa la ricezione dei segnali satellitari.

Per quanto riguarda le operazioni di misura il capitolato prevede:

- rilievo con ricevitori geodetici d'elevata precisione. Precisione degli apparati non inferiore a 10 mm +1 mm/km sulla misura della lunghezza della baseline;
- metodologia di misura di tipo relativo statico, con intervallo di campionamento non superiore a 15 secondi (per le basi di lunghezza inferiore a 10 km possibilità di rilievo di tipo rapido-statico con intervallo di campionamento non superiore a 5 secondi, nei casi in cui la strumentazione impiegata garantisca comunque le precisioni richieste);

I tempi minimi di acquisizione sono quelli riportati nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**. In merito alla qualità delle misure, è previsto un primo controllo pre-compensazione effettuato verificando, in corso d'opera, che l'errore di chiusura dei poligoni costituenti la rete risulti inferiore ad una tolleranza di 10 cm. In altre parole, per ogni poligono dovrà risultare: dove dx, dy, dz sono le componenti delle singole basi costituenti il poligono. Per le baselines dei poligoni fuori tolleranza è prevista la ripetizione della misura. Nel capitolato, inoltre, sono presenti le prescrizioni riguardanti la precisione della posizione dei vertici della rete.

TEMPI DI STAZIONAMENTO	Con 4+5 satelliti in assenza di cycle slip significativi		Con 6 o più satelliti in assenza di cycle slip significativi		
	Mono Frequenza	Doppia Frequenza	Mono Frequenza	Doppia Frequenza	Rapido Statico
Lunghezza minore di 5 km	60	40	40	30	15
Fra 5 e 10 km	80	50	50	40	20
Fra 10 e 15 km	–	80	75	60	–

**Tabella 2.2 - Tempi minimi di acquisizione in minuti**

La precisione è valutata sulla base dei parametri d’errore delle coordinate che si otterranno nella compensazione a minimi vincoli:

- i valori dei semiassi maggiori delle ellissi standard piane (piano tangente locale) devono risultare inferiori a 4 cm;
- lo scarto quadratico medio in quota deve risultare inferiore a 6 cm. In casi eccezionali sono accettabili, per una percentuale di punti non superiore al 5%, dei valori che oltrepassano tali limiti, ma comunque in nessun caso superiori rispettivamente a 5 cm e 7 cm.

I collegamenti altimetrici dei vertici della Rete di Raffettamento sono necessari per la determinazione delle loro quote pseudo-ortometriche. Nel Capitolato non è richiesto il collegamento di tutti i vertici di nuova istituzione; come previsto dal capitolato, la quota pseudo-ortometrica (riferita al livello medio mare Genova 1942) è da determinarsi tramite collegamento dei vertici GPS a preesistenti reti di livellazione. Per il collegamento altimetrico di ciascun vertice è prevista la livellazione geometrica di precisione, con l’utilizzo di strumenti e modalità operative tali che la discrepanza (in valore assoluto) tra il dislivello misurato in andata e ritorno, da caposaldo a caposaldo, non risulti superiore a 5 v L mm (L indica la lunghezza del tratto tra i capisaldi, in km). Per le operazioni di misura, il Capitolato prevede l’impiego di livelli di precisione dotati di lamina a facce piane e parallele fissa (non inseribile), e stadie con nastro invar; in alternativa, livelli digitali di precisione con stadie codificate non estensibili sempre in invar. È previsto inoltre l’utilizzo contemporaneo di due stadie di due/tre metri, che dovranno essere alla stessa distanza dallo strumento (non superiore ai 40 m) con tolleranza di due metri.

Questo rapido excursus vuole essere solamente un breve riassunto dei concetti principali espressi dal Capitolato, ma comunque ci sembra possibile, in base alle argomentazioni riportate, poter trarre qualche conclusione critica di carattere tecnico; appare opportuno notare che i concetti espressi dal Capitolato, letti al giorno d’oggi (2007), iniziano a “sentire il peso degli anni”; a testimonianza di tale osservazione basti pensare che se al momento della sua stesura è sembrato logico, ad esempio, stabilire i tempi minimi di acquisizione anche per i ricevitori geodetici a singola frequenza, oggi tale approccio appare anacronistico in quanto, visto l’enorme progresso tecnologico dei ricevitori stessi, sembra impensabile poter progettare un rilievo statico GPS con strumenti che non siano ricevitori geodetici doppia frequenza (fra qualche tempo si parlerà di tripla frequenza).



Per quanto riguarda poi i criteri di accettabilità dei risultati delle compensazioni, viene consigliata solamente un’analisi dei risultati in termini di semiassi delle ellissi standard e degli SQM in quota, questo approccio, senza dubbio garantisce un controllo sul prodotto finale, ma, almeno in alcuni casi, ci sarebbe sembrato più opportuna la possibilità di valutare la qualità del dato finale anche in relazione all’analisi dei residui, con valori di esclusione dei risultati basati sui residui stessi.

Per concludere ci sembra necessario affermare che, al giorno d’oggi, se si rendesse necessaria un’eventuale revisione e aggiornamento del Capitolato, sicuramente dovrebbero essere prese in considerazione le numerose reti di stazioni permanenti sul territorio nazionale che potrebbero risultare fondamentali per la valutazione, mediante l’integrazione delle osservazioni provenienti dai rilievi di raffittimento, dei parametri di trasformazione locali fra i sistemi di riferimento IGM95-ETRF-ITRF-IGb00.

### **2.3 I Datum di interesse internazionale**

Con il termine datum, o sistema di riferimento, si intende un insieme di misure (costanti) e di regole per la determinazione della posizione spazio temporale di punti, qualsiasi sia il sistema di coordinate. Compito della Geodesia è ricavare tale insieme di misure-regole che deve bloccare i gradi di libertà lasciati liberi dalle misure vere e proprie.

I sistemi di riferimento possono essere sia fissi, cioè in relazione alle posizioni apparenti di alcune stelle, che “solidali” con la Terra. In questo caso potrebbero essere definiti dal baricentro terrestre e dall’asse di istantanea rotazione oppure, più comunemente, in modo convenzionale, individuando un polo medio ed un equatore medio ricavati ad una data convenzionale, nonché una direzione delle origini convenzionale delle longitudini.

Un sistema di riferimento deve essere realizzato per mezzo di una sua materializzazione, che può essere identificata con una rete, o frame, spetta sempre alla Geodesia, dunque, definire e mantenere un sistema di riferimento globale.

Il sistema di riferimento “fisso” è realizzato da un insieme di coordinate bidimensionali di un gran numero di stelle apparentemente stazionarie, la cui posizione è conosciuta con grande precisione. La realizzazione è nota come International Celestial Reference Frame (ICRF), dal 1988 l’International Earth Rotation Service (IERS), responsabile anche del ITRF, si assume la responsabilità di stabilire e mantenere entrambi i riferimenti, l’inerziale e il convenzionale terrestre.



#### **2.4.1 ITRF**

L’International Terrestrial Reference System è definito e controllato dal Centro ITRS dello IERS, secondo le seguenti condizioni:

- È geocentrico, con origine coincidente con il centro di massa della Terra, calcolato includendo gli oceani e l’atmosfera;
- L’unità di lunghezza è il metro del Sistema Internazionale. Questa scala è consistente con il tempo coordinato per un sistema locale geocentrico (TCG), in accordo con le risoluzioni IAU e IUGG del 1991;
- L’orientamento è dato inizialmente dall’orientamento BIH (Bureau International de l’Heure) riferito al 1984.0. l’IERS Reference Pole (IRP) e l’IERS Reference Meridian (IRM) sono in accordo con le corrispondenti direzioni BIH a meno di 5 mas (milli-arc-second).

L’ITRS è connesso all’ICRS (International Celestial Reference System) per mezzo dei parametri EOP (Earth Orientation Parameters). Il datum ITRF (International Terrestrial Reference Frame) è fissato in base a misure di geodesia spaziale. Il fattore di scala è ricavato da una media pesata di tre soluzioni VLBI e cinque soluzioni SLR. L’origine (traslazioni e velocità) da una media pesata delle sole cinque soluzioni SLR. L’orientamento dipende invece dalle rotazioni ITRF97(97.0) e dalle velocità di rotazione del modello NNR-NUVEL1A, stimate su una selezione di 50 siti, scelti secondo i seguenti criteri:

- disponibilità di osservazioni continue negli ultimi tre anni;
- localizzazione su una zolla rigida e lontano da zone in deformazione;
- errore formale della velocità (risultato delle combinazione ITRF) inferiore a 3 mm/y;
- residui sulle velocità inferiori a 3 mm/y in almeno tre diverse soluzioni.

Ai fini della nostra analisi interessa sottolineare che la realizzazione dell’ITRS, l’ITRF, è basata su stime di posizioni e velocità di un insieme di stazioni a terra, ottenute da misure VLBI, LLR, SLR, GPS e DORIS. Le soluzioni, connesse nei siti di misura detti di co-locazione, in cui sono effettuate misure di geodesia spaziale con più di uno di questi sistemi, non sono tra loro perfettamente coerenti. Tali incoerenze sono presenti nella soluzione combinata ITRF.

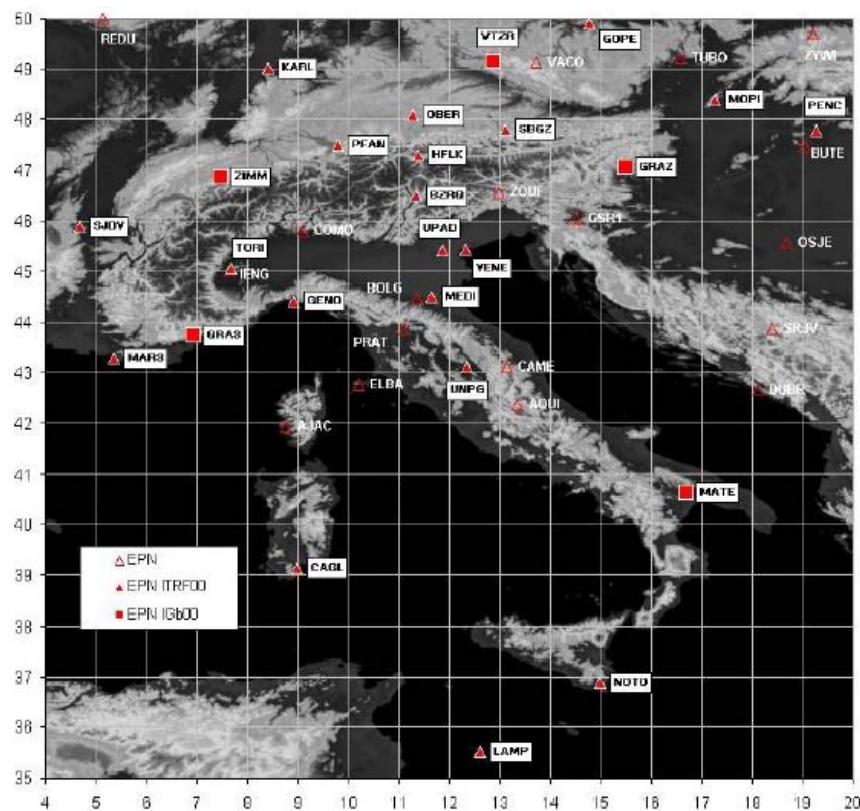
#### **2.4.2 IGS**

La prima realizzazione GPS denominata IGS2000(v1) o semplicemente IGS00 è stata calcolata dopo che nel 2001 l’ITRF2000 fu reso disponibile. Scopo della realizzazione GPS



del sistema di riferimento è migliorare la consistenza interna, non garantita in ITRF2000 dalla combinazione delle soluzioni VLBI, LLR, SLR, GPS e DORIS.

Il datum IGS è stato introdotto come supporto alle sole misure GPS, in quanto intrinsecamente più coerente con queste ultime, per tali motivi agli utenti dei prodotti IGS (soluzioni di ionosfera, troposfera ed effemeridi) è anche raccomandato l'uso delle coordinate IGS00. L'IGS Reference Frame (RF) è costituito da un insieme di stazioni GPS selezionate dall'IGS Reference Frame Working Group (RFWG), sulla base di criteri di qualità (prestazioni, monumentazione, collocazione geografica). Ad ogni aggiornamento della realizzazione del RF, il numero di stazioni selezionate è stato aumentato, al fine di aumentare la qualità generale della realizzazione e di conseguenza i prodotti IGS che da essa dipendono.



**Figura 5 - Le stazioni della rete EPN (EUREF Permanent Network) sul territorio italiano. MATE, GRAS, GRAZ e ZIMM, sono incluse nella realizzazione IGb00.**

La consistenza dei prodotti IGS dipende fortemente dalla scelta delle stazioni di riferimento che realizzano propriamente il RF, per questo il contributo di singola stazione di riferimento alla stabilità della realizzazione può essere valutato mediante l'analisi della stabilità stessa delle sue serie temporali.. Per la realizzazione dell'IGS2000(v1), è stato originariamente scelto un sottoinsieme di 54 stazioni considerate di affidabilità e qualità superiore, nel seguito

il numero è stato gradualmente ridotto a circa 45. L’IGS2000(v2) Reference Frame (RF), più conosciuto con il nome di IGb00 è la realizzazione GPS dell’ITRF00 ufficialmente in uso dall’11 gennaio 2004; comprende 99 stazioni, 47 delle quali già usate per l’ IGS2000(v1), di cui si sono stimate coordinate e velocità in base alla soluzione cumulativa IGS03P33.SNX.

I parametri della trasformazione di Helmert tra ITRF2000 e la realizzazione IGS2000(v2) relativi all’epoca 1998.0 sono stati stimati dall’IGS su 71 stazioni comuni (IGSMAIL-4642).

	$\Delta\phi$ [mm]	$\Delta\lambda$ [mm]	$\Delta h$ [mm]	$\Delta V_\phi$ [mm/y]	$\Delta V_\lambda$ [mm/y]	$\Delta V_h$ [mm/y]
<b>GRAS</b>	-0.8	-0.5	-2.6	-0.2	-0.1	-0.6
<b>GRAZ</b>	-0.4	0.1	0.0	0.2	0.7	-2.1
<b>MATE</b>	-0.1	-0.3	1.8	0.3	-0.8	-1.7
<b>ZIMM</b>	-1.3	0.3	-6.5	0.5	-0.7	2.2
<b>WTZR</b>	-0.2	-0.4	1.5	-0.1	-0.2	-1.2

**Tabella 2.3 - Residui della trasformazione di Helmert fra ITRF2000 e IGb00**

Nella stima dei 14 parametri di trasformazione (7 di posizione e 7 di velocità) si sono assunti pesi unitari. L’RMS dei residui è inferiore al millimetro nella componente planimetrica delle posizioni e velocità, e rispettivamente di 2.6 e 1.5 mm/y nella componente altimetrica di posizione e velocità. I residui sulle stazioni di interesse per l’area italiana indicati in Tabella 2.3, pur essendo estremamente contenuti, possono darci un’idea dei problemi di incoerenza intrinseci in ITRF2000. Si osservino ad esempio i residui sulle coordinate della stazione di Zimmerwald, che è un sito di colocazione, in quanto dispone oltre che della stazione GPS anche del telescopio per misure Satellite Laser Ranging, il residuo in quota, pari a -6.5 mm, non è affatto trascurabile.

## **2.4 Il rilievo di una rete statica GPS-GLONASS per la sperimentazione di misure VRS**

Gli sviluppi e la modernizzazione prevista per i sistemi di navigazione satellitare (GNSS) richiedono alcune ulteriori indagini, soprattutto in relazione all’integrazione fra le osservazioni provenienti da sistemi diversi, come viene riassunto nel capitolo primo di questa tesi i sistemi satellitari, sono in continua evoluzione, sia dal punto di vista della costellazione stessa che, soprattutto, dai servizi quanto più variegati offerti dalle nuove costellazioni, come ad esempio GALILEO. Anche se con qualche ritardo, il risanamento del sistema GLONASS sembra avviato ad una progressione stabile e il sistema satellitare europeo dovrebbe, almeno in parte, essere operativo entro il 2008.

Per l’esecuzione delle sperimentazioni utili a dare qualche risposta agli interrogativi presentati è stata progettata e rilevata una rete, di cui si parlerà più diffusamente, costituita da sei vertici,

di cui 5 IGM95, nell'area dell'Appennino Tosco-Emiliano. Grazie all'utilizzo di strumentazione Topcon e Javad, modelli abilitati alla ricezione di dati GPS e GLONASS, la rete test è stata rilevata acquisendo dati dalle due costellazioni e successivamente elaborata in modalità statica.

Vista la disponibilità di due costellazioni distinte si è deciso di elaborare la rete con due strategie di calcolo differenti, in un primo caso sono stati utilizzati solo dati GPS, mentre nel secondo le osservazioni GPS e GLONASS sono state utilizzate congiuntamente con gli accorgimenti che verranno presentati più avanti. Il confronto fra le due soluzioni ha portato ad alcune considerazioni sull'integrazione di osservazioni "miste" ed ha fornito importanti indicazioni sull'utilizzo dei dati GLONASS, sicuramente meno note agli utilizzatori, dei comuni software di post-processamento. La rete è stata realizzata con lo scopo di fungere da base per ulteriori indagini quali le verifiche di accuratezza di misure cinematiche in tempo reale realizzate utilizzando una esistente infrastruttura di stazioni permanenti nella stessa area. Il tutto nell'ottica di uno studio continuo delle tecniche NRTK.

### **2.5.1 Struttura della rete**

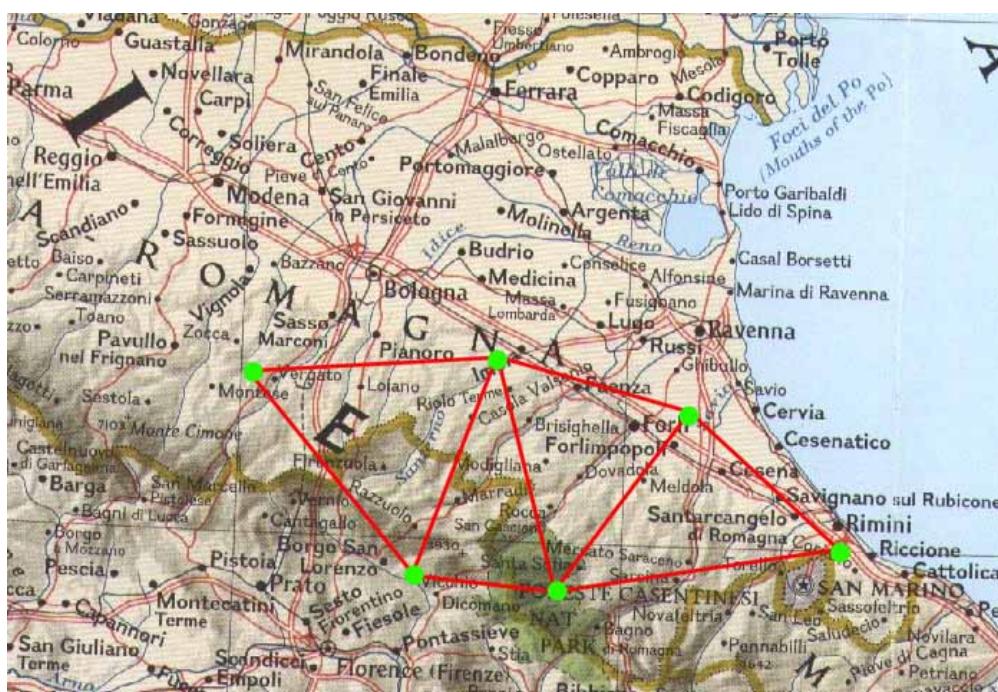
La rete adottata per la sperimentazione è composta da sei vertici distribuiti nell'area dell'Appennino Tosco-Emiliano. Sono stati scelti allo scopo vertici della rete IGM95, sia per la loro buona distribuzione nella zona oggetto di studio che per l'eventuale possibilità di un confronto con coordinate di monografia.

Tra le varie opzioni possibili sono stati scelti quei vertici che hanno permesso, a nostro avviso, la realizzazione della migliore geometria di rete. I vertici scelti sono stati i seguenti:

- *098904*
- *099904*
- *100701*
- *100702*
- *107901*
- *107904*

Vista la difficoltà di accesso al vertice *098904*, in prossimità del punto stesso è stato materializzato uno nuovo vertice denominato “Grizzana” essendo collocato in località

Grizzana Morandi (BO). La figura 1 riassume la geometria della rete e la collocazione geografica dei vertici.



**Figura 2.6 - Distribuzione dei vertici della rete test GPS-GLONASS**

La lunghezza media delle basi risulta essere di poco inferiore ai 40 km, per tale motivo si è scelto di effettuare due sessioni di misura in modalità statica di circa quattro ore ciascuna, con intervallo di acquisizione di 15 secondi, così da poter disporre di un elevato numero di osservazioni e poter elaborare i dati in maniera corretta ed affidabile.

La rete è stata progettata in maniera che le lunghezze delle baselines fossero pressoché omogenee e, al tempo stesso, poter disporre di vertici egualmente distribuiti nell’area test, da utilizzarsi nelle successive fasi del progetto quali punti di controllo per il posizionamento in modalità NRTK.

Le misure sono state precedute da un’accurata fase di planning che ha messo in luce, in contrapposizione ad una copertura continua dei satelliti GPS durante tutto l’arco della giornata, una maggiore disponibilità di satelliti GLONASS nella mattina rispetto al pomeriggio, aspetto peraltro confermato dall’analisi dei dati raccolti in campagna. La situazione della costellazione GLONASS, al momento delle misure (2004) non ha consentito l’esecuzione di misure con un numero elevato e, soprattutto, continuo di satelliti GLONASS.

L’utilizzo contemporaneo di sei ricevitori, in sole due sessioni successive, ha permesso la misurazione di 10 basi indipendenti, (numero doppio delle baselines rispetto a quelle

strettamente sufficienti) e come si potrà osservare nel seguito, il raggiungimento di un buon livello di precisione intrinseca in sede di compensazione a minimi vincoli.

Sono stati utilizzati 3 ricevitori TOPCON equipaggiati con antenne compatte geodetiche PG-A1 ed altrettanti JAVAD modello Legacy E, dotati di antenne Legant E. Per questi modelli di antenna sono stati utilizzati, in fase di elaborazione, i parametri relativi di calibrazione dei centri di fase L1 ed L2 ed i coefficienti polinomiali di modellizzazione della migrazione del centro di fase (relativi all'elevazione dei satelliti) forniti sia dal National Geodetic Survey (USA).

### **2.5.2 Elaborazione dei dati**

I dati sono stati elaborati con il software GeoGenius (Spectra Precision Terrasat, GmbH) conservando nella doppia procedura di elaborazione, solo GPS e GPS-GLONASS, la medesima sequenza di operazioni e gli stessi settaggi dei parametri di post-processing. Questo al fine di garantire l'uniformità nella fase di elaborazione dei dati. La rete, dunque, è stata elaborata in modalità statica utilizzando il principio delle basi indipendenti e compensata ponendo gli stessi vincoli (minimi).

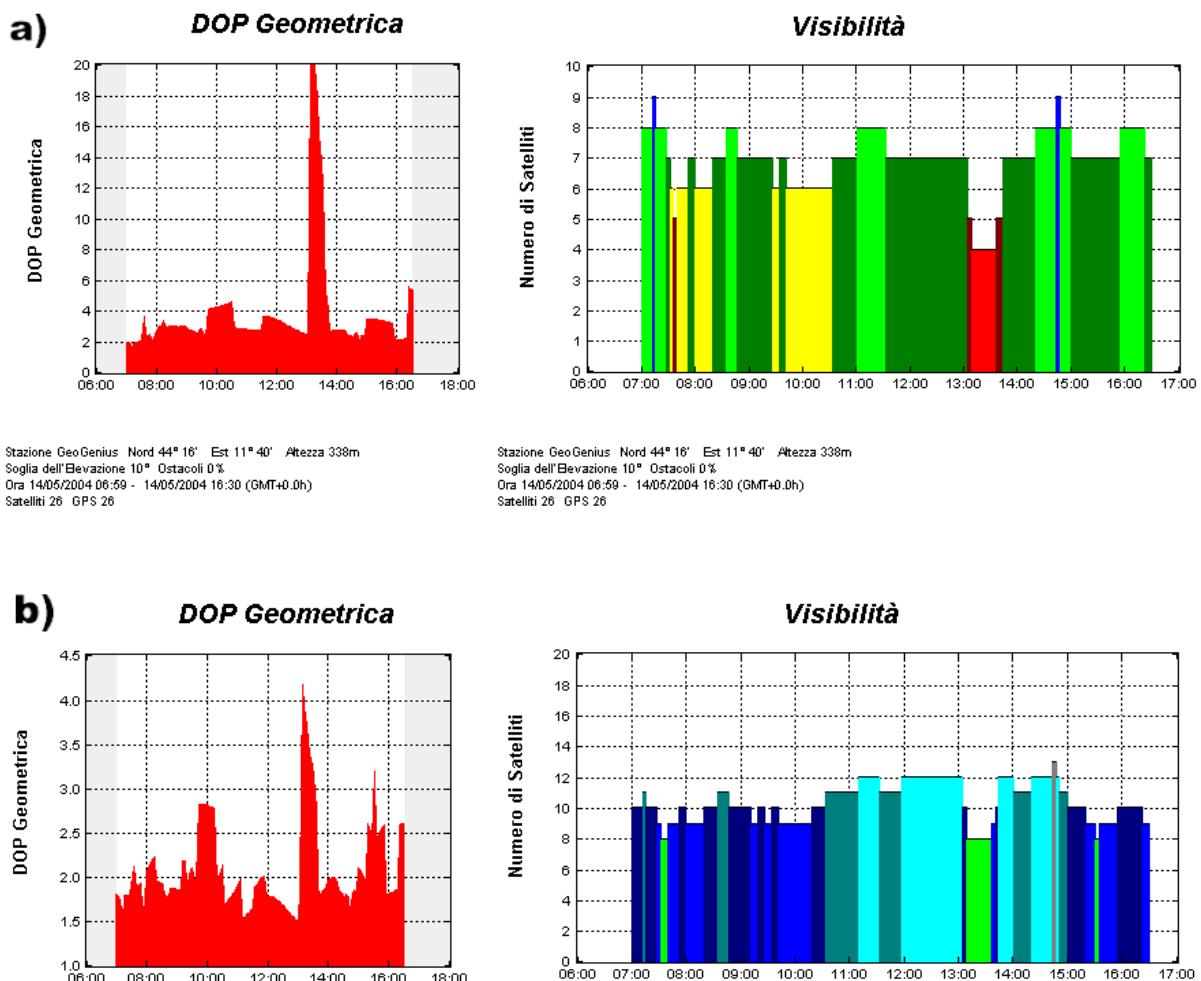
Le 10 basi complessivamente calcolate per raggiungere una robusta geometria della rete sono state suddivise in due sessioni della durata di 4 ore (*sampling rate* 15 sec). Tale durata si considera idonea in relazione alla lunghezza media dei vettori (circa 50km) e in ogni caso sufficiente ai fini della valutazione dei benefici che provengono dall'utilizzo delle osservabili GLONASS. Tra i principali parametri si elencano la combinazione lineare L1/L2, il modello troposferico di Hopfield modificato, cut-off di 10° e l'utilizzo di effemeridi precise. Le effemeridi precise, valide per entrambi i sistemi GNSS, sono fornite nel consueto formato \*.PRE .

Le effemeridi utilizzate nel post-processing sono prodotte dal BKG (Bundesamt f. Kartographie u. Geodäsie, Germany), partner dell'IGLOS Analysis Coordinator titolare del processamento delle orbite. Sono disponibili all'indirizzo web [http://igs.ifag.de/index\\_iglos.htm](http://igs.ifag.de/index_iglos.htm) ed indicate con una denominazione del file segue lo schema BKGWWWD.PRE dove si indica le lettere W la settimana GPS e con D il giorno della settimana. Va anche sottolineato che i due sistemi satellitari utilizzano un riferimento della scala dei tempi non omogeneo. Infatti il sistema GLONASS utilizza il sistema UTC(SU), determinazione del tempo UTC nel Riferimento Nazionale che, nel caso delle effemeridi broadcast relative alle giornate di rilievo, differisce dal tempo standard GPS UTC(NO) di



valori dell'ordine dei 0,3  $\mu$ sec. Tale valore deve essere presente nel file delle effemeridi broadcast e corretto all'interno di quelle precise.

Una prima analisi delle effemeridi mostra il contributo della costellazione GLONASS in termini di DOP geometrica e numero totale di satelliti disponibili (vedi Figura 2.2).

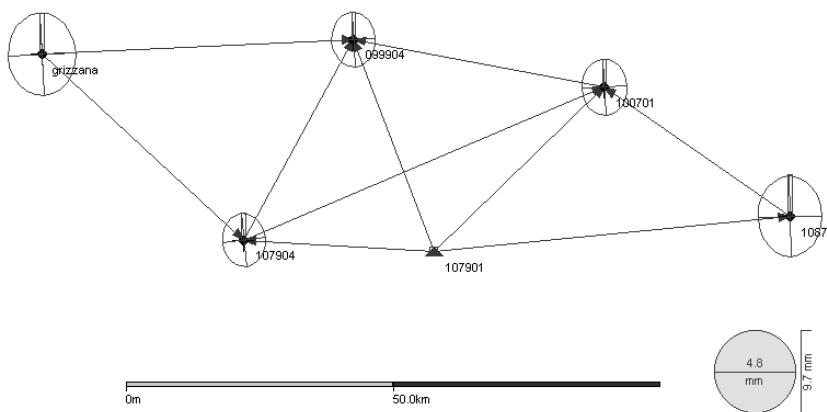


**Figura 2.7 - DOP geometrica e visibilità satellitare a) solo GPS b) GPS+GLONASS**

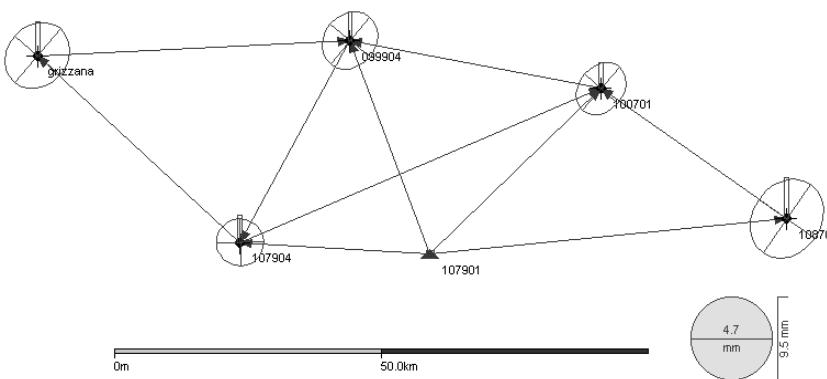
Nel grafico b) si nota ad esempio, con l'introduzione dei satelliti GLONASS, un netto incremento nel numero dei satelliti in corrispondenza delle ore centrali della mattina mentre la disponibilità di satelliti diventa scarsa nelle ore serali.

Dallo stesso grafico si osserva anche che la geometria migliora come indice DOP scendendo frequentemente sotto il valore 2 e superando un periodo critico in corrispondenza delle ore 13.30 dove, nel caso dei soli satelliti GPS disponibili, l'indice DOP mostra valori molto elevati.

Nelle figure 3a e 3b sono rappresentati i risultati ottenuti dalle compensazioni della rete nei distinti casi delle sole osservazioni GPS (figura 3a) e delle osservazioni congiunte GPS-GLOASS (figura 3b). Le ellissi d'errore sono riferite al livello di significatività  $1\sigma$ .



**Figura 2.8 a) - Risultati della compensazione ottenuta utilizzando le sole osservazioni GPS**



**Figura 2.9 b) - Risultati della compensazione ottenuta utilizzando le sole osservazioni GPS**

Nelle tabelle seguenti I e II vengono riportati rispettivamente i risultati (coordinate cartesiane, sigma e parametri dell'ellissi d'errore) della compensazione ottenuta con i soli dati GPS e con le osservazioni GPS-GLOASS.

Punto	X [m]	Y [m]	Z [m]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	A [mm]	B [mm]	Angolo [Deg]
099904	4479440.442	925482.042	4430659.899	5.0	2.9	4.9	3.2	2.6	-2.8
100701	4478391.622	959669.895	4424094.318	5.3	3.0	5.1	3.3	2.7	-2.8
107901	4504716.644	941803.332	4402665.440	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
107904	4507924.545	916274.500	4403771.304	5.0	2.7	4.7	3.1	2.5	-6.1

108702	4489597.381	987647.125	4406793.458	8.0	4.0	7.1	4.7	3.7	-1.0
Grizzana	4489798.951	884953.972	4428838.329	7.6	4.3	7.4	4.8	4.0	-3.0

**Tabella 2.4- Risultati della compensazione utilizzando le sole osservazioni GPS.**

Punto	X [m]	Y [m]	Z [m]	sX [mm]	sY [mm]	sZ [mm]	A [mm]	B [mm]	Angolo [Deg]
099904	4479440.443	925482.041	4430659.905	5.3	3.3	5.1	3.5	2.9	39.6
100701	4478391.625	959669.893	4424094.322	4.8	2.9	4.3	3.2	2.5	41.0
107901	4504716.644	941803.332	4402665.440	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
107904	4507924.544	916274.498	4403771.305	4.7	2.8	4.7	2.7	2.7	88.5
108702	4489597.375	987647.126	4406793.455	8.2	4.0	6.6	4.7	3.9	34.8
Grizzana	4489798.952	884953.971	4428838.332	6.1	3.8	5.9	4.0	3.4	41.0

**Tabella 2.5 – Risultati della compensazione utilizzando osservazioni congiunte GPS e GLONASS.**

Dall'analisi dei risultati della compensazione non emergono sostanziali differenze nelle componenti cartesiane e nei relativi s.q.m. anche se è riscontrabile una lieve riduzione nel caso delle osservazioni miste. Le ellissi d'errore, di forma approssimativamente circolare in entrambi i casi, mostrano un orientamento differente, probabilmente da interpretare in relazione alla differente geometria delle costellazioni. Inoltre i dati GLONASS non evidenziano, nelle nostre acquisizioni effettuate su di un orizzonte libero da ostacoli, la presenza di cycle slip o difficoltà nella risoluzione delle ambiguità a prova di una stabilità complessiva del segnale.

**3**

## **Il Progetto GPS7 in Emilia Romagna**

### **3.1 Le reti provinciali Emiliano-Romagnole**

In Emilia Romagna il progetto di raffettimento della rete IGM95 è stato realizzato a livello provinciale; nel corso degli ultimi sei anni sono state completate le reti di tutte le province ad eccezione di quella di Bologna, della quale il bando di appalto è stato assegnato ed è in fase di realizzazione nei prossimi mesi (dicembre 2006).

Reggio-Emilia è stata la prima provincia a realizzare la propria rete di raffettimento a sette km, ad essa sono seguite, nell’ordine, Rimini, Ferrara, Ravenna, Modena, Parma, Piacenza e Forlì-Cesena.

Tranne che per la provincia di Ferrara le operazioni di collaudo delle reti provinciali sono state affidate al DISTART dell’Università di Bologna.

La molteplicità d’interventi da parte di Ditta diverse, che comporta il rischio di disomogeneità e discontinuità dei prodotti, è stata disciplinata imponendo il rispetto delle le Linee Guida dell’Intesa relative al raffettimento di reti GPS/7.

Gli accorgimenti previsti al momento della realizzazione dei rilievi eseguiti ex-novo per favorire l’omogeneizzazione delle reti parziali dal punto di vista della tecnica topografica sono sostanzialmente due:

- l’uso esclusivo dei vertici della Rete Nazionale GPS per inquadrare il raffettimento, con esclusione quindi dei vertici della vecchia rete trigonometrica o di altri vertici preesistenti. E’ previsto per ciascuna rete l’utilizzo di tutti i punti della Rete IGM95 compresi nel proprio ambito territoriale, nonché dei vertici prossimi esterni al territorio oggetto del rilievo e ricadenti nelle regioni e province limitrofe. Il collegamento a questi vertici dovrebbe fornire la struttura uniforme e omogenea nella quale inserire ogni singola rete locale;
- l’estensione di ciascuna rete al di fuori dell’area da inquadrare (ovvero del limite provinciale), in modo che i punti esterni di nuova istituzione entrino a far parte anche della Rete della provincia adiacente.

Questi due accorgimenti di progettazione dovrebbero garantire la sostanziale omogeneità dell’inquadramento sulla rete nazionale GPS, e anche un buon collegamento tra reti adiacenti, dal punto di vista planimetrico.

Nel seguito sono valutati quantitativamente gli scarti che nascono sulle coordinate dei punti comuni a reti adiacenti, inquadrati autonomamente.

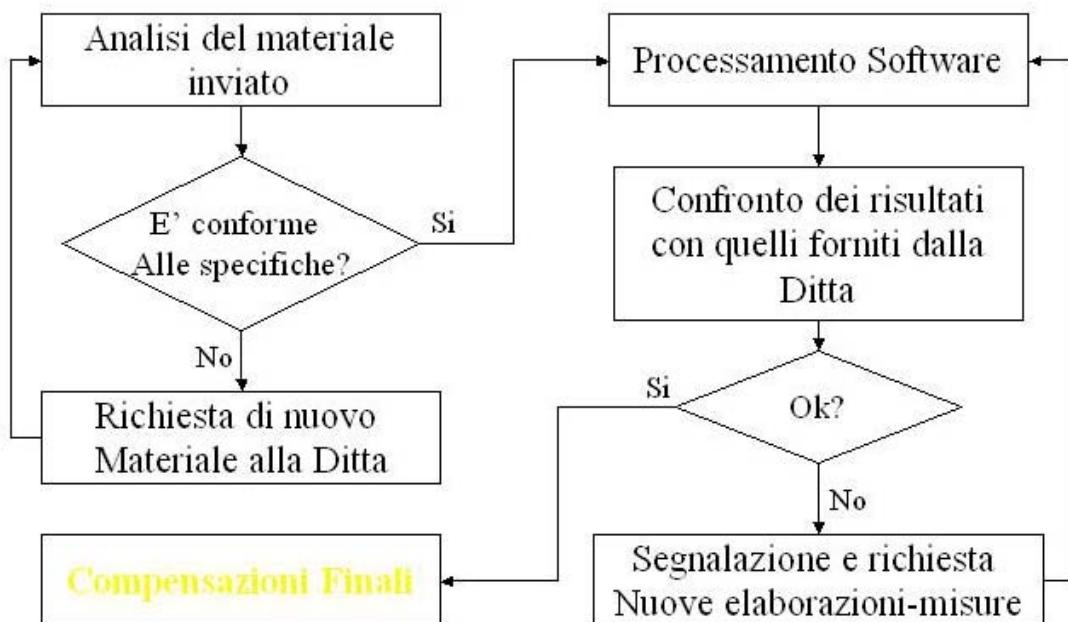
### 3.2 Le sperimentazioni effettuate

Per poter mettere a punto una procedura di collaudo standard, in modo da poter uniformare le operazioni da eseguire su ogni singola rete provinciale, è stato necessario un attento studio delle problematiche tipiche di un rilievo di questo tipo.

Innanzitutto bisogna precisare che le misure sono state effettuate da 5 ditte differenti, questo ha causato delle prevedibili differenze nelle consegne, sebbene queste ultime fossero regolamentate da capitolato, in più le differenti aziende hanno usato in vari casi strumenti differenti, il che ha reso più difficoltosa la reinterpretazione del dato grezzo di ogni singolo caso.

Il capitolato d'appalto ha permesso solo fino ad un certo livello che le operazioni di collaudo potessero seguire dei parametri stabiliti a priori con sufficiente uniformità, si sono resi quindi necessari vari interventi specifici per ogni rete e per ogni ditta per poter arrivare ad un collaudo finale accurato.

La Figura 3.1 riassume il flusso delle operazioni di collaudo effettuate per ogni rete.



**Figura 3.1 - Flusso delle operazioni di collaudo**

Per garantire l'indipendenza dei risultati dal software di calcolo utilizzato, si è deciso di ricalcolare le baselines misurate con un software diverso da quello utilizzato dalla Ditta, i risultati così ottenuti sono stati confrontati con quelli inviati dalla Ditta stessa. In caso di differenze trascurabili, in termini di  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  e  $\Delta Z$ , le basi misurate sono utilizzate per la compensazione finale della rete, in caso contrario le basi “discordanti” vengono fatte

rimisurare dalla Ditta appaltatrice in fase di ripetizione delle misure che, come indicato dal capitolato d’appalto, devono essere fatte in una parte non inferiore al 5% del totale.

Le compensazioni finali, come previsto dalle linee guida dell’Intesa, sono state effettuati attraverso due “step” distinti:

- per l’analisi della qualità del rilievo è stata eseguita, per ogni rete provinciale, una compensazione intrinseca su un vertice IGM95 baricentrico
- per la consegna delle coordinate finale è stata invece eseguita una compensazione vincolata sui vertici IGM95 scelti per realizzare il datum di riferimento della rete.

Prima di procedere con la compensazione vincolata finale si è scelto di eseguire un adattamento locale, tramite trasformazione conforme, delle coordinate ottenute dalla compensazione intrinseca su quelle di monografia dei vertici IGM, tale operazione ha permesso, in alcuni casi, di identificare i vertici IGM95, inseriti nelle varie reti, inconsistenti con le reti di raffittimento misurate; i casi di inconsistenza rilevati sono stati pochissimi e di modesta intensità, dovuti soprattutto a deformazioni locali della rete IGM95.

### **3.3 Lo studio dell’Ondulazione**

Alle operazioni di campagna di rilievo GPS sono state affiancate, come previsto dal Capitolato d’Appalto, anche linee di livellazione di precisione per poter disporre di informazioni sperimentali sull’ondulazione del geoide in ambito locale.

Come indicato nelle Specifiche dell’Intesa e, visto lo scopo, la livellazione è stata eseguita con precisione ( $5\sqrt{L}$  mm) ; che risulta inferiore a quella utilizzata nelle reti di livellazione di alta precisione eseguite, durante varie campagna e per scopi diversi, come ad esempio il controllo della subsidenza.

In Emilia Romagna sono presenti le seguenti linee di livellazione:

- linee IGM
- un raffittimento locale sempre dall’IGM
- la rete ARPA

Quest’ultima si appoggia sulle stesse linee e si sviluppa principalmente verso la parte a nord della vi Emilia. Le linee di livellazione realizzate durante il Raffittimento GPS/7 sono state progettate e realizzate nell’ottica di iniziare e, quando possibile, finire su capisaldi di livellazione dell’IGM o dell’ARPA, disposti lungo la Via Emilia, questo per far sì di creare degli anelli di livellazione, lungo le arterie principali a sud della via Emilia, e avere come



controllo i capisaldi ARPA e IGM che, come già anticipato, sono stati misurati con precisione più elevata.

Inoltre si è scelto di quotare, a partire da queste linee di livellazione, quanti più possibili vertici GPS, in media circa il 20%, delle reti in modo da poterne derivare la quota ortometrica con operazioni di livellazione il più breve e affidabili possibile, sempre tenendo conto della specificità delle varie situazioni incontrate in corso di monumentazione e di misura. Benché in molti casi la congruenza fra i valori dei capisaldi di raffitimento GPS7 e quelli ARPA-IGM sia stata buona, quindi all'interno della tolleranza imposta dal capitolato per le motivazioni anticipate, in alcuni casi si sono osservati notevoli problemi di chiusura, ad alcuni di essi è stato possibile trovare una spiegazione, molto spesso legata alla subsidenza della zona rilevata, in altri le motivazioni potrebbero essere ricercate solo tramite la presenza di errori grossolani nella misure, errori però che, in fase di analisi intrinseca delle misure stesse, sono stati esclusi; per tali motivi restano perciò ancora al momento attuale alcune problematiche da studiare e approfondire al fine di poter disporre, nei prossimi anni, di dati di altimetria coerenti e densi, in modo da poter disporre, almeno localmente, di un numero sufficiente di valori di ondulazione sperimentale nota.

### **3.4 La trasformazione fra Datum diversi**

La compresenza, in Italia, di diversi sistemi di riferimento geodetici, tutti, sebbene in ambiti differenti, di utilizzo comune, si pensi ad esempio alla CTR georeferenziata in ED50, rende necessaria la possibilità di trasformare, mediante vari approcci, le coordinate di un rilievo da un sistema all'altro.

Sono in commercio svariati software in grado di eseguire tali passaggi, inoltre, in quasi tutti i programmi di elaborazione dati topografici e GIS sono presenti delle routine che permettono di trasformare il proprio rilievo, o un set qualunque di coordinate, negli svariati sistemi di utilizzo comune in tutto il mondo; tali software avranno, a seconda dei diversi casi, differenti precisioni e accuratezze finali della trasformazione stessa.

Comunque, qualunque sia il software utilizzato, il passaggio di coordinate viene essere eseguito fondamentalmente, seguendo due metodologie differenti come la trasformazione ad un numero di parametri stabilito, solitamente 7, o l'interpolazione fra un set di valori di correzioni noti a priori.

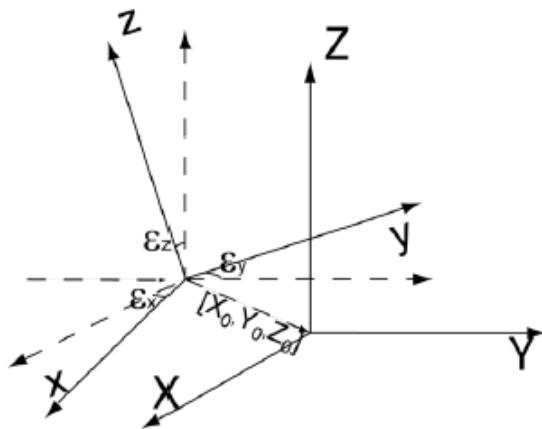
La trasformazione a 7 parametri, rotazione traslazione e scala, può essere applicata previa conoscenza dei parametri da utilizzare propri di ogni zona di territorio e coppia di datum,



altrimenti questi parametri possono essere ricavati mediante la conoscenza di un sufficiente numero di vertici noti in ambedue i sistemi di riferimento.

Il metodo può essere spiegato da semplici relazioni matematiche, analizziamo, ad esempio, la trasformazione completa con fattore di scala :

Prendiamo in considerazione due SR con diverso orientamento, diversa origine e diversa unità di misura delle lunghezze.



Se  $[X_0, Y_0, Z_0]$  sono le coordinate dell’origine di un sistema nell’altro, si può definire una matrice  $R$  che abbia lo scopo di portare gli assi XYZ paralleli a xyz ed un rapporto di scala definito come  $u_1/u_2$  dove  $u_1$  e  $u_2$  sono le unità di misura di lunghezza nei due sistemi; in tale situazione un punto generico, nel primo sistema, avrà le coordinate nel secondo sistema definite dalla relazione:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{P,II} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \lambda \mathbf{R} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{P,I}$$

Poiché la matrice , per come è stata definita, dipende dai tre angoli  $R_{XYZ}$  la trasformazione dipende a sua volta in totale da 7 parametri.

L’utilizzo di tale metodologia deve essere fatto tenendo presente alcune caratteristiche:

- Se non disponibili i parametri devono essere determinati mediante la conoscenza di alcuni vertici noti nei due sistemi
- La scelta soggettiva dei “vertici doppi” rende i risultati finali del metodo dipendenti dall’operatore
- Il prodotto finale, sulla base dell’analisi dei residui ottenuti sui vertici doppi, può essere valutato dal punto di vista statistico

Contrariamente a quanto osservato con il metodo delle trasformazioni a parametri, l’interpolazione fra valori di correzioni noti a priori non permette alcuna scelta dell’operatore, il risultato però, sebbene indipendente dall’operatore stesso, non può essere analizzato statisticamente, lasciando, come uniche indicazioni di qualità, i parametri di precisione dichiarati nella generazione dei valori di correzione stessi.

In Italia, da qualche anno, l’IGM ha introdotto il software Verto, che, in breve tempo, è diventato uno standard, richiesto anche da numerose amministrazioni pubbliche e private come requisito fondamentali nelle gare. Il software effettua il passaggio di Datum e il calcolo dell’ondulazione mediante l’interpolazione bilineare fra valori di correzioni note, tali valori sono venduti all’utenza tramite in forma di grigliati che coprono la stessa porzione di territorio dei fogli a 50.000.

### **3.4.1 Il software Verto**

L’IGM ha reso disponibile anche per l’utenza esterna la nuova metodologia adottata per la trasformazione fra sistemi di riferimento sia planimetrici che altimetrici. Per quanto riguarda i riferimenti planimetrici il nuovo metodo supera i procedimenti utilizzati nel passato, affetti da varie ambiguità, e consente la conversione di coordinate in maniera univoca. Esso si basa essenzialmente sulla definizione di griglie a passo regolare, di valori di differenze in coordinate geografiche, che coprono ampiamente il territorio nazionale.

L’utente può eseguire la trasformazione delle coordinate fra i sistemi ROMA40, ED50 e WGS84, in tutte le possibili combinazioni, ottenendo le quantità necessarie per mezzo di una interpolazione bilineare eseguita fra i valori della griglia. L’interpolazione della griglia può essere realizzata tramite il software “Verto1”, che opera soltanto su coordinate geografiche, o “Verto2” (oggi nella release “Verto2+”) che permette di trattare anche coordinate piane appartenenti ai sistemi cartografici normalmente associati ai sistemi geodetici suddetti: Gauss-Boaga per ROMA40, UTM per ED50 e WGS84. Recentemente è stata resa disponibile una nuova versione del software: “Verto3”. In Verto3, con la stessa logica degli altri Verto, sono



memorizzati solo gli algoritmi necessari ad eseguire le trasformazioni ma non i dati che devono essere acquistati separatamente nella forma di porzioni di grigliato memorizzate in file del tipo “\*.gr”. Nella funzionalità “Conversioni sistemi” di Verto2+ e di Verto3, e più precisamente nei passaggi fra geografiche e piane, è stata aggiunta la possibilità di proiettare ipunti in fusi diversi da quello di appartenenza, ed è stato rimosso, limitatamente alle conversioni all’interno dello stesso sistema di riferimento, il vincolo di operare entro i margini della griglia selezionata. E’ quindi possibile, anche non disponendo dei file “\*.gr”, la trasformazione fra coordinate geografiche e piane nell’ambito dello stesso riferimento su tutto il territorio nazionale. Al sistema WGS84 è stato associato, in aggiunta all’UTM, il “Fuso Italia” un nuovo sistema cartografico recentemente

introdotto al fine di ottenere la proiezione di tutto il territorio nazionale su un unico piano senza le soluzioni di continuità indotte

dalla suddivisione in fusi. Verto3 permette inoltre, disponendo di un adeguato numero di punti noti in due sistemi di riferimento, la determinazione delle relazioni geometriche intercorrenti fra i due sistemi nella forma di parametri di rototraslazione sia spaziali che piani. Sono disponibili infine funzionalità che consentono l’applicazione dei parametri suddetti. Per quanto riguarda l’altimetria è stata approntata un’apposita griglia di valori delle separazioni fra geoide nazionale ed ellissoide

GRS80 (adottato nel sistema ETRS89), che consente, con una procedura analoga a quella della planimetria, di trasformare le quote ellissoidiche WGS84 (ETRS89) in quote geoidiche (sul livello del mare), relative ai riferimenti altimetrici nazionali, e viceversa. Sono attualmente disponibili due modelli di geoide, entrambi realizzati in collaborazione con il Politecnico di Milano e

adattati ai sistemi altimetrici nazionali per mezzo dei punti GEOTRAV (sottoinsieme dell’IGM95): ITALGEO99 e ITALGEO2005, implementati rispettivamente nelle griglie \*.gr1 e \*.gr2, e caratterizzati da uno scostamento medio rispetto alle linee di levellazione di alta precisione di  $\pm 0.16$  e  $\pm 0.04$  m. Tutti i software Verto consentono sia l’input da tastiera, con output su monitor, sia il trattamento di file in formato testo o in formato MS-Excel, (\*.xls), e forniscono risultati identici a quelli ufficialmente adottati dall’IGM.

### **3.4.2 Applicativo per l’utilizzo del dato Verto su aree vaste**

Il software Verto, nella versione 1 e 2, non permette l’utilizzo simultaneo su aree di estensione maggiore di quella di un grigliato (possibile dalla versione 3 in poi), tale limitazione è apparsa, per le numerevoli applicazioni in campo regionale, eseguite prima del



rilascio della versione 3 di Verto, insostenibile ai fini di un processamento rapido ed omogeneo dei rilievi, per tali motivi si è messo a punto un applicativo in grado di ovviare a questo problema.

Il primo aspetto che si è dovuto risolvere è stato lo studio dell’organizzazione dei dati contenuti nei file gr1 per poterli utilizzare in maniera diversa e più fluida.

Dopo un primo periodo di test, il programma è stato utilizzato in una prima fase per le elaborazioni della rete GPS7 delle Province di Parma e Piacenza, successivamente, una volta valutata la sua efficacia, il suo utilizzo è stato preferito a Verto per tutte le elaborazioni eseguite, la sperimentazione si è poi diretta verso l’adattamento locale diretto dei grigliati stessi.

Prima di addentrarci nello specifico della trattazione può risultare utile analizzare nel dettaglio la struttura dei file gr1 che sono alla base dell’interpolazione eseguita da Verto.

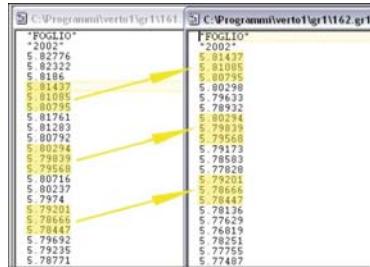
Record 1-2	commento
Record 3-38	correzioni latitudine ED50
Record 39-74	correzioni longitudine ED50
Record 75	commento
Record 76-111	correzioni latitudine WGS84
Record 112-147	correzioni longitudine WGS84
Record 148	latitudine di riferimento correzioni
Record 149	longitudine di riferimento correzioni
Record 150	commento
Record 151-290	ondulazioni
Record 291	latitudine di riferimento ondulazioni
Record 292	longitudine di riferimento ondulazioni
Record 293	commento

Il dato Verto è perciò diviso due sezioni distinte, la prima contenente le informazioni per il passaggio fra datum (record 1 – 149), la seconda comprendente le indicazioni per il calcolo delle ondulazioni secondo il modello ITALGEO99 (record 150 – 293).

Analizzando la sezione contenente le correzioni osserviamo che ciascun file riporta 36 valori di correzione, rispettivamente per la latitudine e la longitudine, per il passaggio da Roma40 a ED50 e da Roma40 a WGS84, quindi 4 blocchi da 36 valori per un totale di 144 dati.

La seconda sezione contiene invece di 140 valori, georeferenziati in coordinate WGS84, per il calcolo dell’ondulazione.

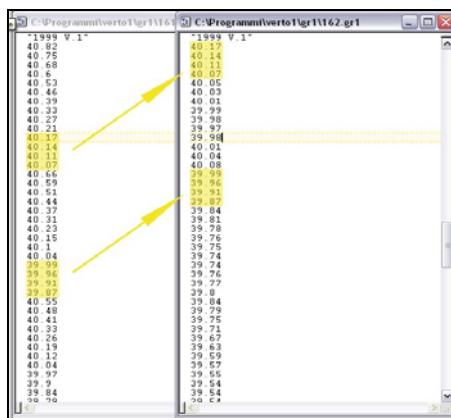
Alcuni dei valori di correzione di un file sono ripetuti in quello contiguo secondo un pattern regolare, osservando la Figura 3.2, che riporta gli estratti di due fogli adiacenti in longitudine, possiamo chiarire meglio questo aspetto:



The screenshot shows two windows side-by-side. Both windows have a title bar 'C:\Programmi\vertointerf\gr1\1161.gr1' and 'C:\Programmi\vertointerf\gr1\1162.gr1'. The left window contains a list of values starting with 'FOGLIO 1' and ending with 'S 76771'. The right window contains a similar list starting with 'FOGLIO 2' and ending with 'S 77467'. Three yellow arrows point from specific values in the first column of the left window to the second column of the right window, illustrating the overlap of values between adjacent files.

**Figura 3.2 - Grado di sovrapposizione dei valori di correzione**

Il grado di sovrapposizione rimane inalterato per ciascuno dei quattro blocchi di correzioni. Anche i valori delle ondulazioni risultano sovrapposti, vediamo in che maniera:



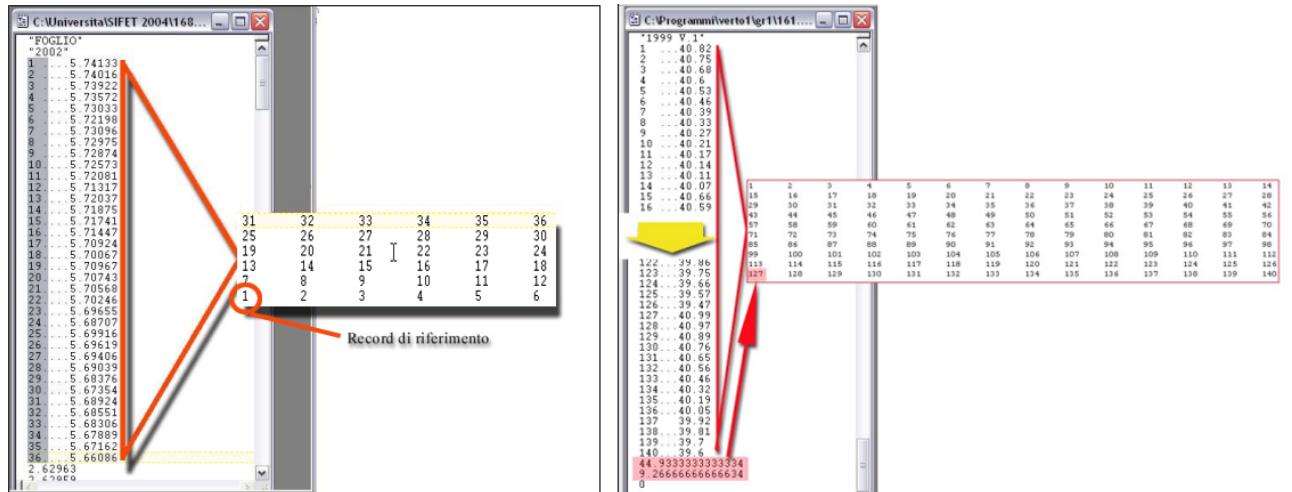
The screenshot shows two windows side-by-side. Both windows have a title bar 'C:\Programmi\vertointerf\gr1\1161.gr1' and 'C:\Programmi\vertointerf\gr1\1162.gr1'. The left window contains a list of values starting with '1999 V 1' and ending with '90 90'. The right window contains a similar list starting with '1999 V 1' and ending with '90 C1'. Three yellow arrows point from specific values in the first column of the left window to the second column of the right window, illustrating the overlap of values between adjacent files.

**Figura 3.3 - Grado di sovrapposizione dei valori di ondulazione**

Allo stesso modo, analizzando una coppia di file adiacenti in latitudine, emerge un costante grado di sovrapposizione fra i dati, anch’esso secondo un pattern costante.

Da queste analisi si evince che i dati sono organizzati in griglie 6x6, per ogni blocco di correzioni, in maniera che il primo dei 36 record abbia come coordinate quelle di riferimento e gli altri seguano per formare i nodi della griglia della griglia con passo 7,30' in longitudine e 5' in latitudine; una volta riorganizzati i dati in questo modo, appare evidente che la sovrapposizione si realizza fra le ultime tre colonne, per i file adiacenti lungo la longitudine (in alcuni casi tale numero cala a 2), e le ultime tre righe per i file adiacenti lungo la latitudine.

I valori delle ondulazioni, invece, sono organizzati in modo da formare una griglia 14x10, con passo costante di 2', nella quale i record 291 e 292 esprimono il riferimento del valore di ondulazione riportato nel record 277, in questo caso la sovrapposizione interessa le ultime 4 colonne e le ultime 4 righe di ogni file, come sintetizzato nella figura 3:



**Figura 3.4 - Struttura dei dati in un file \*.gr1**

Nota l'organizzazione dei dati, e ovviamente il passo delle griglie, è stato possibile passare alla georeferenziazione di ogni singolo valore, inoltre, al fine di evitare dati sovrabbondanti, stati eliminati i valori doppi derivanti dalla sovrapposizione dei file gr1, si noti che tale operazione potrebbe essere trascurata senza problemi, poiché la presenza di valori ripetuti non ha alcuna influenza sul funzionamento del software interpolatore.

lat	long	DlatED50	DlongEd50	DlatWgs84	DlongWgs84
44.916666667	9.202333333	5.827760	2.493550	2.379550	-1.199170
44.916666667	9.327333333	5.823220	2.503360	2.377420	-1.172290
44.916666667	9.452333333	5.818600	2.512440	2.380230	-1.156780
44.916666667	9.577333333	5.814370	2.520830	2.383760	-1.141040
44.916666667	9.702333333	5.810850	2.529590	2.387640	-1.124370
44.916666667	9.827333333	5.807950	2.540340	2.385240	-1.095020
45.000000002	9.202333333	5.817610	2.499640	2.390150	-1.200650
45.000000002	9.327333333	5.812830	2.509170	2.386320	-1.175470
45.000000002	9.452333333	5.807920	2.517540	2.386790	-1.158930
45.000000002	9.577333333	5.802940	2.524790	2.388160	-1.141670
45.000000002	9.702333333	5.798390	2.532280	2.389550	-1.122240
45.000000002	9.827333333	5.795680	2.543280	2.389080	-1.096060
45.083333338	9.202333333	5.807160	2.506600	2.397310	-1.201610

**Figura 3.5 - Grigliato delle Correzioni**



lat	long	N99
43.53333333	11.73333333	46.34
43.53333333	11.76666667	46.29
43.53333333	11.80000000	46.22
43.53333333	11.83333333	46.15
43.53333333	11.86666667	46.1
43.53333333	11.90000000	46.07
43.53333333	11.93333333	46.04
43.53333333	11.96666667	45.99
43.53333333	12.00000000	45.89
43.53333333	12.03333333	45.75
43.53333333	12.06666667	45.63
43.53333333	12.10000000	45.51
43.53333333	12.13333333	45.41
43.53333333	12.16666667	45.33
43.53333333	12.20000000	45.27
43.53333333	12.23333333	45.21
43.53333333	12.26666667	45.15
43.53333333	12.30000000	45.1
43.53333333	12.33333333	45.03
43.53333333	12.36666667	44.93

**Figura 6 - Grigliato delle ondulazioni**

La costruzione delle griglie viene eseguita in automatico da un software specifico creato appositamente; le due griglie prodotte contengono i dati in formato Verto, provenienti da un qualsivoglia numero di file \*.gr1, in un unico set, offrendo così la possibilità di editarli in maniera semplice ed efficace in relazione alle situazioni di utilizzo, ad esempio è possibile restringere o allargare la nostra zona di interesse senza apportare alcuna modifica al software e alla metodologia di calcolo.

Riportiamo in questa sede i risultati delle sperimentazioni effettuate durante le fasi di collaudo della rete GPS7 della Provincia di Parma.

A puro scopo esemplificativo viene riportata una tabella dei tempi che mette in evidenza come l’utilizzo del software Verto abbia richiesto molto più tempo poiché ha richiesto 15 diverse elaborazioni e il conseguente lavoro di pulizia dei dati doppi, derivanti dai vertici ricadenti nelle zone di sovrapposizione, difficilmente quantificabile in generale in termini di tempo.

	Rerry1.0	Verto1
<i>N° elab.</i>	1	15
<i>Tempo elab.</i>	5 sec	15 sec
<i>Punti Ripetuti</i>	0	116*
<i>Pulitura dati</i>	0 sec	15 min (circa)
<i>Tempo Totale</i>	5 sec	18 min circa
<i>* su un totale di 113 vertici processati</i>		

**Tabella 1 - Tempi medi di utilizzo dei software testati**



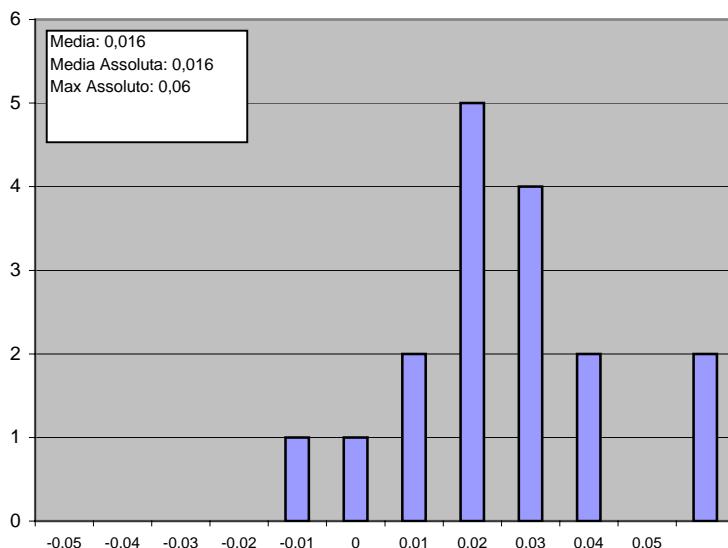
I valori espressi in tabella sono evidentemente valori medi, ma indicativi per elaborazioni di reti di estensione provinciale; occorre inoltre precisare che, nell’ambito del calcolo di una rete GPS, risulta molto più faticoso concatenare la fase del computo delle ondulazioni con le altre analisi, se questa deve essere svolta in più passaggi, come risulta inevitabile con l’utilizzo del programma Verto1.

Il modello ITALGEO99, può essere ulteriormente raffinato tramite l’adattamento dei valori sulla scorta di vertici ad ondulazione sperimentale nota, tale adattamento può essere eseguito in varie modalità, durante la sperimentazione sono stati seguiti due metodi distinti:

-Adattamento delle ondulazioni di modello sulle ondulazioni sperimentali tramite trasformazione conforme

-Adattamento dei nodi della griglia costituita dall’unione dei file \*.gr1 relativi ai fogli al 50000

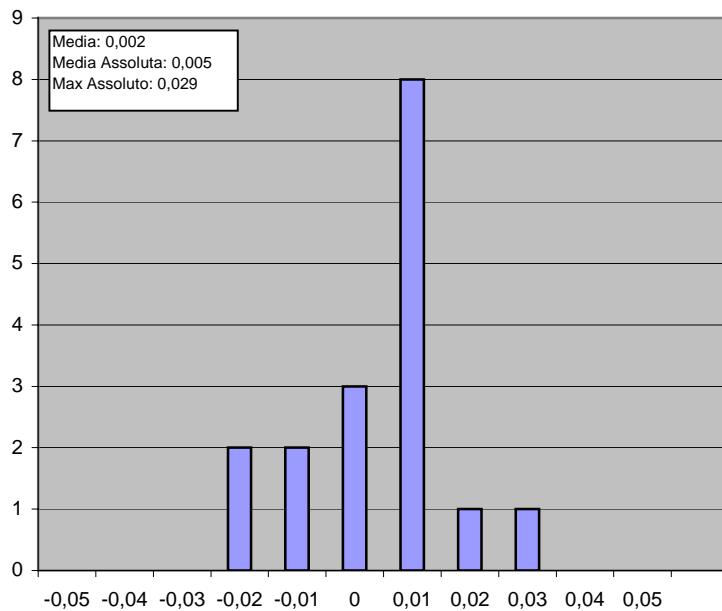
Il grafico riportato in figura 7 riporta le differenze fra ondulazione sperimentale e ondulazione di modello ITALGEO99:



**Figura 3.7 - Differenze ondulazione di modello con sperimentale**

Il modello rispecchia bene la situazione reale in quest’area, infatti il valore massimo di scostamento è pari, in valore assoluto, a 6 cm.

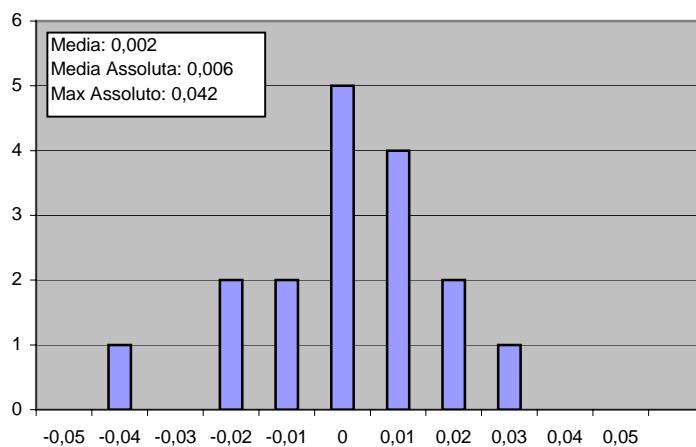
In seguito all’adattamento locale delle ondulazioni c’è un miglioramento dei risultati come mostrato in figura 8.



**Figura 3.8 - Differenze ondulazione adattata con sperimentale**

A questo punto si è proceduto ad adattare il grigliato ricavato da tutti i fogli della Provincia di Parma, sugli stessi punti ad ondulazione nota, tale griglia adattata è stata utilizzata come base per l’interpolazione dei dati con il software Rerry 1.0.

Si sono confrontati i risultati con quelli precedenti, come possiamo vedere dal grafico riportato in figura 9, tale confronto ha dato scostamenti equivalenti a quelli ottenuti con la trasformazione a 7 parametri, risultato soddisfacente anche in considerazione del ristretto numero di “punti doppi” utilizzati in fase di adattamento, che corrispondono a meno del 7% del totale dei vertici della rete.



**Figura 3.9 - Differenze ondulazione sperimentale con modello adattato tramite griglia**

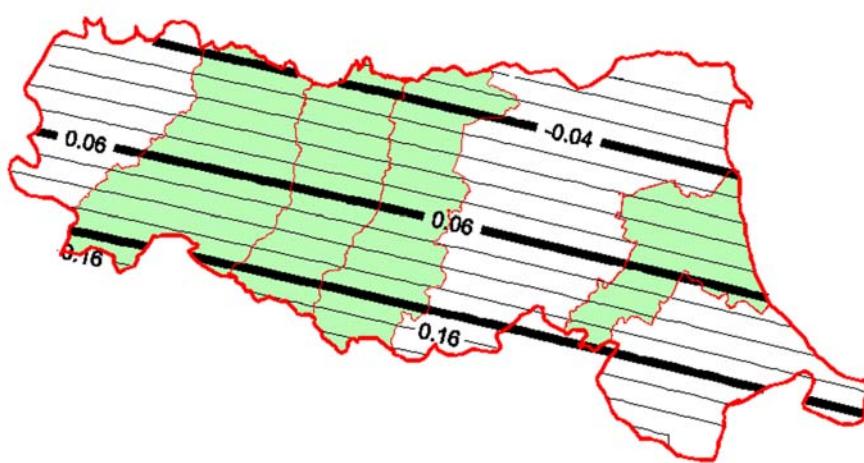
Risulta quindi evidente che l'adattamento del grigliato e il suo successivo utilizzo come base per l'interpolazione fornisce dei risultati sostanzialmente in linea con l'adattamento delle ondulazioni.

Incoraggiati dai buoni risultati ottenuti a livello provinciale si è deciso di valutare la possibilità di un'estensione della procedura seguita anche a livello regionale, a tale scopo si è provveduto all'adattamento della griglia costituita da tutti i fogli ricoprenti la Regione Emilia Romagna su tutti i dati sperimentali a disposizione.

Tale procedimento ha prodotto dei risultati peggiori in termini di differenze con l'ondulazione sperimentale, queste ultime sono più marcate rispetto agli altri casi analizzati, con una valore di scostamento massimo, in valore assoluto, pari a 7 cm ed una media dei valori assoluti superiore al centimetro.

Sono state analizzate le differenze, apportate dall'adattamento, sui nodi della griglia del modello ITALGEO99, nella figura 11 è riportato l'andamento di tali differenze.

Tali spostamenti crescono da circa -8cm fino ad un valore di circa 18cm verso i rilievi appenninici.



**Figura 3.10 - Differenze sui nodi della griglia fra valori di modello e valori adattati**

La scala regionale sembra essere il limite massimo per la trasformazione conforme, tale aspetto è stato in parte confermato anche dalle analisi effettuate in ambito di inquadramento della rete si SP del DISTART (Capitolo 4); sebbene la trasformazione sia stata effettuata su un set di dati concentrato solo su alcune province, come mostrato in Figura 3.10, alcune

sperimentazioni successive non fanno pensare ad un miglioramento dei risultati anche avendo a disposizione i valori delle province mancanti.

### **3.5 Giunzione di reti provinciali**

Il progetto di raffittimento a sette chilometri della rete IGM95 nella Regione Emilia Romagna è stato portato avanti, come già detto all’inizio del capitolo, su base provinciale; sono state realizzate a cura di diversi soggetti le Reti di raffittimento GPS/7. Per quanto le Specifiche seguite dalle diverse Ditte che nei vari anni sono state incaricate dei rilievi siano state omogenee in quanto desunte da quelle promosse dal Comitato Tecnico dell’Intesa Stato – Regioni – Enti Locali, si è ritenuto necessario un ulteriore processo di omogeneizzazione per connettere tra loro le varie reti, pur sempre eseguite da Ditte diverse e, soprattutto, in tempi diversi.

In questo lavoro si sono considerate le reti provinciali contigue di Modena, Reggio Emilia, Parma e Piacenza, e si è tentato di integrarle fra loro al fine di realizzare un’unica struttura.

L’operazione è stata eseguita per individuare alcune delle problematiche che si potrebbero presentare se si volesse realizzare una rete regionale, una volta completato il rilievo di tutte le province: problemi che possono andare da quelli più formali come le codifiche dei vertici e la omogeneizzazione completa delle monografie, ad altri più delicati, come il grado di interconnessione tra le sottoreti e l’eventuale integrazione di ulteriori dati che si rendessero utili o addirittura necessari per una efficace interconnessione.

Le sotto-reti sono state analizzate a due a due per individuare i vertici e le basi comuni, tale operazione è stata automatizzata tramite la creazione di utility specifiche, che permettono inoltre l’omogeneizzazione delle codifiche dei vertici.

Il confronto delle quattro reti provinciali ha messo in evidenza la presenza di un totale di 40 vertici comuni (di cui 3 capisaldi ARPA e 7 vertici della rete IGM95) e di 15 basi comuni.

L’individuazione dei vertici comuni, anche se codificati, all’inizio, in modo differente, è stata fatta tramite il confronto fra le coordinate provenienti dalla compensazione vincolata su tutti i vertici d’inquadramento di ogni rete, le seguenti tabelle riportano le differenze (espresso in UTM WGS84) fra le coordinate risultanti dalle elaborazioni di due reti adiacenti, non sono riportate le differenze sugli IGM95 in quanto tenuti vincolati in entrambe le reti.

Modena – Reggio Emilia				Reggio Emilia – Parma			Parma - Piacenza				
	$\Delta N$	$\Delta E$	$\Delta H$		$\Delta N$	$\Delta E$	$\Delta H$		$\Delta N$	$\Delta E$	$\Delta H$
ARPA012	0,008	0,007	0,004	ARPA006	-0,019	0,036	0,091	ARPA054	-0,008	0,000	-0,080
RE604	-0,007	0,003	0,064	ARPA010	-0,027	0,004	0,064	ARPA057	0,013	0,014	-0,019
RE608	-0,023	0,010	-0,093	RE610	-0,019	0,036	0,145	PR001	0,004	-0,013	-0,068
RE621	-0,007	-0,010	-0,091	RE614	-0,017	0,009	0,049	PR010	-0,010	0,006	-0,092
RE622	-0,021	0,004	-0,068	RE633	-0,029	0,009	0,081	PR028	0,002	-0,001	-0,014
RE630	-0,002	0,016	-0,056	RE661	-0,058	0,139	0,091	PR039	0,009	-0,007	-0,018
RE645	-0,012	-0,011	-0,045	RE676	0,002	0,030	0,081	PR040	-0,002	0,003	0,008
RE646	-0,005	0,009	-0,027					PR041	0,011	-0,019	0,042
RE670	0,023	0,013	0,005					PR042	0,000	-0,008	0,080
RE671	-0,004	-0,001	0,051					PR045	-0,018	0,000	0,052
RE672	0,011	-0,009	0,044					PR067	-0,023	-0,026	0,063
RE674	-0,005	0,016	0,004								
RE675	0,024	0,005	-0,016								
RE701	0,009	0,001	0,035								

**Tabella 3.2. Differenze tra le coordinate calcolate in due reti adiacenti (sistema UTM – WGS84)**

Gli scostamenti più importanti sono apprezzabili in altimetria, mentre in planimetria le differenze fra le coordinate si mantengono basse per le coppie Modena-Reggio e Parma-Piacenza e più sensibili per la coppia Reggio-Parma, in questo caso, infatti, si ha una media dei valori  $\Delta N$  pari a 2 cm e  $\Delta E$  pari a 4 cm, la media degli scarti nella componente  $\Delta h$  arriva addirittura a 9 cm e si osserva un massimo di 14 cm nella componente Est sul vertice RE661. Le basi comuni sono state individuate tramite il confronto dei file di input per la compensazione delle quattro reti provinciali, tramite l'identificazione del codice comune degli estremi. In tabella sono riportate le differenze nelle componenti e nella lunghezza della base, e il valore della precisione richiesta da Capitolato nell'esecuzione della misura della base (1 cm + 1 mm per km).

Solo una base mostra differenze significative nella lunghezza (circa 3 cm).

	DX	DY	DZ	Dlungh	Toll
ARPA010-RE033	-0,018	-0,004	-0,033	0,009	0,019
RE076-RE010	-0,048	-0,015	-0,031	0,009	0,016
PR045-PR042	0,011	0,008	-0,024	0,001	0,016
PR042-72903	0,029	0,011	0,019	0,006	0,018
<b>PR040-PR041</b>	<b>-0,004</b>	<b>0,028</b>	<b>-0,013</b>	<b>0,030</b>	<b>0,014</b>
PR040-PR039	0,026	0,014	0,008	0,002	0,016
PR028-PR041	-0,027	0,011	-0,053	0,001	0,018
PR028-72902	-0,029	-0,004	-0,025	0,003	0,017
PR010-ARPA054	0,006	0,007	0,007	0,000	0,016
PR010-73701	-0,037	-0,001	-0,036	0,004	0,014



PR001-73901	-0,047	-0,018	-0,050	0,002	0,014
ARPA057-73701	-0,021	0,015	0,006	0,014	0,012
ARPA057-72902	-0,052	-0,025	-0,024	0,001	0,016
ARPA054-73901	-0,043	-0,005	-0,060	0,000	0,013
72904-PR042	-0,075	0,013	-0,077	0,019	0,019

**Tabella 3.3 - Differenze tra le basi comuni**

Decisamente superiori sono invece le differenze nelle singole componenti, con medie, rispettivamente in X, Y e Z, pari a 2 cm, 2 mm e 3 cm, le medie dei valori assoluti sono rispettivamente 3 cm, 1 cm e 3 cm.

Nel blocco dati generale si è tenuto conto del valore più plausibile della base, ottenuto a partire dalle due determinazioni indipendenti.

Gli scostamenti, in termini di componenti  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$  sono stati analizzati per la scelta delle componenti da inserire nella compensazione della rete finale, avendo a disposizione due determinazioni della stessa base.

La procedura seguita prevede l’inserimento in compensazione di una media pesata delle realizzazioni delle baselines comuni, sulla base delle matrici di varianza e covarianza associate.

Questo approccio può essere considerato rigoroso poiché scaturisce dall’applicazione di una stima ai minimi quadrati per osservazioni indirette della medesima grandezza.

A tal fine siano  $\Delta X^a$  e  $\Delta X^b$  due repliche, della medesima baseline, comuni a due reti limitrofe; il modello funzionale alla base della stima si schematizza come segue:

$$\begin{cases} \Delta X - \Delta X^a = v_a \\ \Delta X - \Delta X^b = v_b \end{cases}$$

laddove  $\Delta X$  esprime la stima della grandezza cercata.

Se si definiscono  $\Sigma_{\Delta X}^a$  e  $\Sigma_{\Delta X}^b$  come matrici di dispersione delle baselines osservate, la struttura del modello statistico associato diventa, sulla base della notazione matriciale a blocchi:

$\Sigma = \begin{bmatrix} \Sigma_{\Delta X}^a & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Sigma_{\Delta X}^b \end{bmatrix}$ ; si precisa che i termini diagonali hanno la seguente struttura:

$$\Sigma_{\Delta X}^a = \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta X}^2 & \sigma_{\Delta X \Delta Y}^2 & \sigma_{\Delta X \Delta Z}^2 \\ \sigma_{\Delta X \Delta Y}^2 & \sigma_{\Delta Y}^2 & \sigma_{\Delta Y \Delta Z}^2 \\ \sigma_{\Delta X \Delta Z}^2 & \sigma_{\Delta Y \Delta Z}^2 & \sigma_{\Delta Z}^2 \end{bmatrix};$$

L'applicazione del criterio di stima ai minimi quadrati conduce alla stesura del sistema normale che assume, nella fattispecie del caso, la seguente forma:

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}' \mathbf{P} \mathbf{A};$$

dove, ovviamente, la matrice  $\mathbf{A}$  può essere espressa come segue

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}^a \\ \mathbf{I}^b \end{bmatrix}$$

in cui  $\mathbf{I}$  indica la matrice identica di ordine 3 e  $\mathbf{P}$  la struttura di peso legata alla matrice di dispersione sulla base della seguente relazione:

$$\mathbf{P} = \sigma_0^2 \Sigma^{-1}$$

la soluzione cercata può essere determinata per inversione del sistema normale:

$$\sigma_0^2 \left[ \left( \Sigma_{\alpha X}^a \right)^{-1} + \left( \Sigma_{\alpha X}^b \right)^{-1} \right] \cdot \Delta \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}^a & \mathbf{I}^b \end{bmatrix} - \sigma_0^2 \Sigma^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{X}^a \\ \Delta \mathbf{X}^b \end{bmatrix};$$

da cui:

$$\Delta \mathbf{X} = \left[ \left( \Sigma_{\alpha X}^a \right)^{-1} + \left( \Sigma_{\alpha X}^b \right)^{-1} \right]^{-1} \left[ \left( \Sigma_{\alpha X}^a \right)^{-1} \Delta \mathbf{X}^a + \left( \Sigma_{\alpha X}^b \right)^{-1} \Delta \mathbf{X}^b \right].$$

Ciò testimonia che la stima ai minimi quadrati di osservazioni dirette della stessa grandezza equivale alla media pesata sulla base delle matrici di dispersione associate.

A tal punto si valuti la seguente statistica, che fornisce una stima a posteriori della varianza dell'unità di peso:

$$s_0^2 = \frac{\mathbf{v}' \mathbf{P} \mathbf{v}}{r} \quad \text{laddove } r \text{ esprime la ridondanza globale del problema, che in questo caso vale 3.}$$

Contestualizzando l'espressione al caso in esame si ottiene che:

$$s_0^2 = \sigma_0^2 \left\{ \left[ \mathbf{v}_a^t (\Sigma_{ax}^a)^{-1} \mathbf{v}_a \right] + \left[ \mathbf{v}_b^t (\Sigma_{ax}^b)^{-1} \mathbf{v}_b \right] \right\}.$$

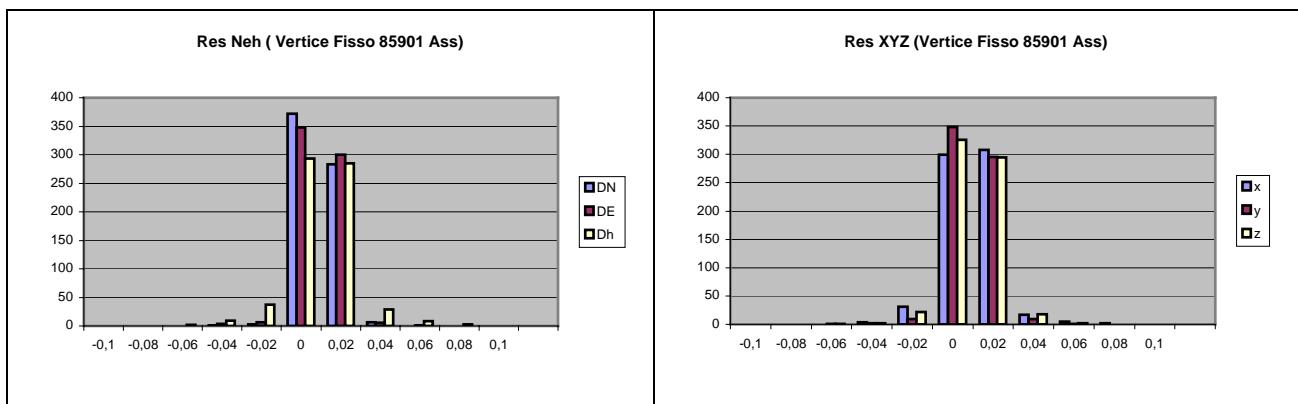
Le operazioni di giunzione delle quattro reti provinciali hanno permesso di arrivare alla configurazione finale, la rete unificata è costituita da 391 vertici, di cui 47 IGM95, 20 vertici associati a capisaldi di livellazione ARPA e 9 vertici della rete di raffettimento della Regione Lombardia, collegati da 666 basi indipendenti misurate.

Le caratteristiche di precisione intrinseca della rete finale sono state analizzate attraverso l'esecuzione di una compensazione a minimi vincoli, nella quale si è ritenuto di fissare un vertice IGM95 (85901 Associato) del quale sono state assegnate le coordinate di monografia, perché baricentrico rispetto l'intera rete.

L'analisi dei residui è stata effettuata sulle componenti cartesiane e su quelle riferite al sistema geodetico locale nel primo estremo, Nord, Est e Quota.

I valori ottenuti possono essere ritenuti soddisfacenti, in quanto in accordo con le specifiche tecniche imposte e confrontabili con quelli ottenuti nelle analisi delle singole reti separate.

Si riportano gli andamenti di tali residui.



**Figura 3.11 - Residui della compensazione Intrinseca**

In planimetria si osserva un residuo massimo di 56 mm la base associata ad esso è stata eliminata dal set di dati a disposizione ed è stata ripetuta la compensazione, ma l'operazione non ha portato ad un miglioramento dal punto di vista del valore dei residui, inoltre, confrontando le coordinate ottenute dalle due diverse compensazioni non si sono notate differenze degne di nota.

Si sono confrontate le coordinate così ottenute con quelle di monografia, il confronto è stato effettuato sulle coordinate Nord, Est UTM WGS84, Fuso 32; tale comparazione ha messo in evidenza una differenza di parecchi metri sul vertice 74902 Associato, molto probabilmente, questo scostamento è da imputare ad un errore nella trascrizione della coordinata di monografia, non essendo presenti altri elementi, nella procedura di calcolo e compensazione, che possano giustificare una simile incongruenza.

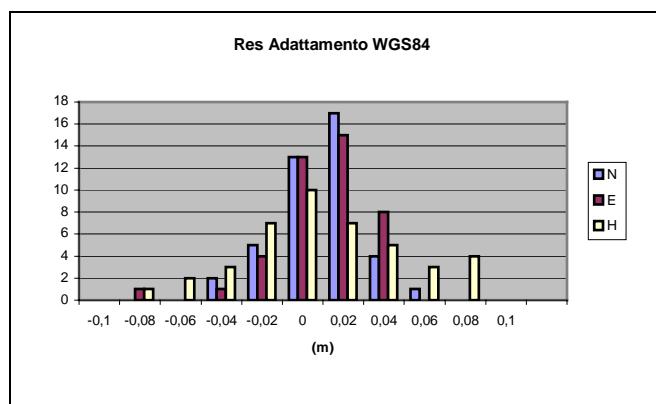
Una volta eliminato questo errore grossolano la media delle differenze si attesta intorno ai 2 cm nella componente Nord 3 cm in Est, un discorso a parte merita la componente altimetrica che presenta scostamenti più marcati, infatti è stata riscontrata una media di 7 cm ed una deviazione standard pari a 5 cm.

Vista la buona coerenza intrinseca delle misure si è passati al calcolo della compensazione vincolata, tale operazione è stata preceduta da una trasformazione a sette parametri (rototraslazione con variazione di scala) sui vertici IGM95, in ambito WGS84, in modo così da verificare la congruenza della rete con i vertici da tenere fissi.

L'analisi della trasformazione è stata condotta tramite i residui sui "punti doppi" utilizzati e sullo SQM delle coordinate trasformate così ottenute.

Sono stati eliminati 3 vertici IGM95 (72902, 85902, 96901), dei 47 a disposizione, come vincoli della trasformazione, poiché presentavano residui inaccettabili ed incoerenti con gli altri, rispettivamente di 13 cm, 28 cm e 11 cm, inoltre non è stato considerato come punto doppio il vertice 74902 Associato per i motivi esposti in precedenza.

Il grafico seguente riporta l'andamento dei residui sui punti doppi.



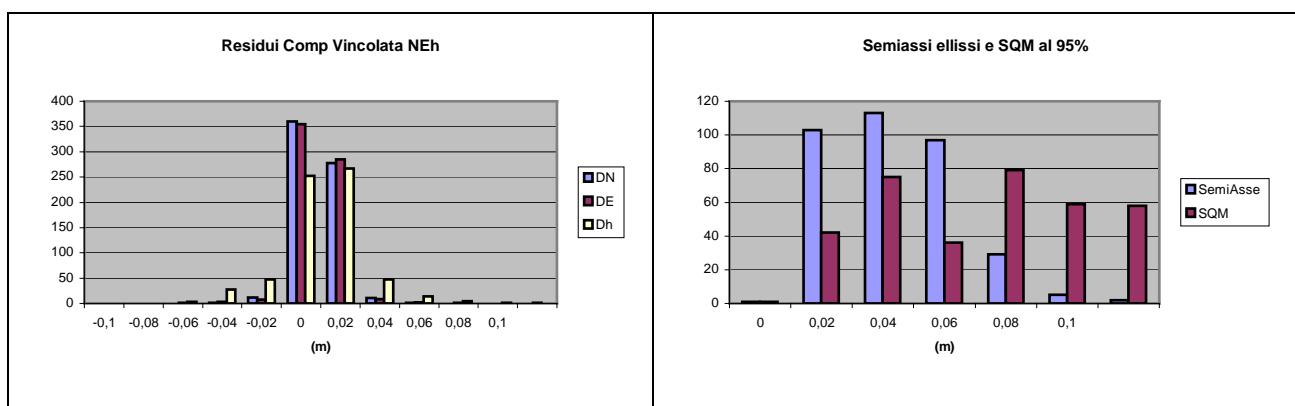
**Figura 3.12 - Residui dell'adattamento in WGS84**

Il residuo più alto, in valore assoluto, è pari a 9 cm nella componente Est sul vertice IGM95 96904; gli SQM delle coordinate trasformate sono in media attorno ai 5 mm, con un valore massimo pari a 11 mm in quota

Tali analisi hanno permesso di rilevare una buona corrispondenza fra le coordinate di monografia e le coordinate calcolate a minimi vincoli e adattate alla rete d'inquadramento, eccezion fatta per i 3 vertici eliminati in sede di adattamento tenendo comunque presente che i residui su questi ultimi non erano, in termini assoluti, elevati, ma incongruenti con quelli sugli altri vertici.

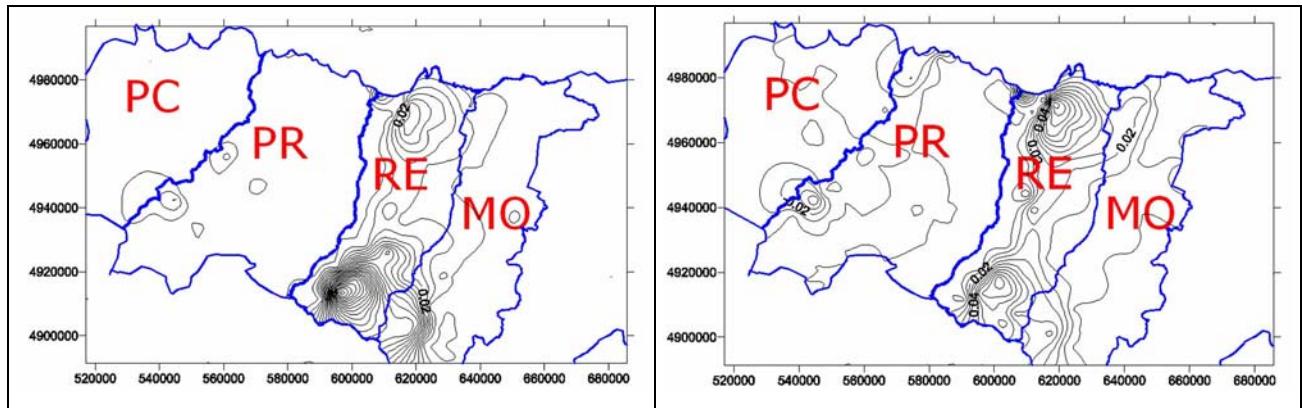
Le coordinate finali della rete unificata sono state calcolate tramite una compensazione vincolata sui 43 IGM95 ritenuti, in base alle analisi precedenti, più adatti ad essere tenuti fissi; inoltre, dal set di dati per la compensazione, sono state eliminate le basi misurate fra vertici IGM95, per tale motivo il numero di basi utilizzate nella compensazione finale è di 663.

I parametri di qualità delle coordinate così ottenute risultano soddisfacenti, vengono riportati nei grafici in Figura 3.13 l'andamento dei residui Nord, Est e Quota e i valori dei semiassi maggiori delle ellissi d'errore e gli SQM in quota alla probabilità del 95%.



La compensazione vincolata della rete globale è stata confrontata con lo stesso tipo di soluzioni ottenute per le singole reti, come era da attendersi le differenze sono modeste, anche per l'alto numero dei punti di inquadramento.

Le figure seguenti riportano l'andamento del modulo delle differenze planimetriche, espresse in UTM WGS84, e degli scostamenti in quota, si vede come tali differenze siano più marcate nella provincia di Reggio Emilia, tale aspetto era stato anche anticipato dal confronto delle coordinate dei vertici comuni con la rete di Parma fatto in precedenza.



**Figura 3.14 - Andamento del modulo vettore spostamento e della differenza di quota**

Il valore massimo del modulo delle differenze planimetriche è pari a 14 cm, mentre la media di tali scostamenti si attesta intorno a 8 mm; per quanto riguarda l'aspetto altimetrico si osserva una valoare massimo di 12 cm ed una media di 6 mm.

Un problema delicato e dalla soluzione non necessariamente univoca è quello che si è dovuto affrontate per l'inserimento della rete nel Sistema Gauss Boaga.

Tale inquadramento, infatti, può essere eseguito tramite due metodi:

- l'utilizzo dei grigliati di trasformazione tramite il software Verto prodotto dall'IGM o altri codici.
- mediante una trasformazione conforme sulla scorta delle coordinate ROMA40 dei vertici IGM95 inclusi nella rete.

Si è scelto di seguire la seconda ipotesi, in modo da poter effettuare un confronto con le coordinate ottenute dalla trasformazione conforme delle singole reti eseguita contestualmente al calcolo di queste ultime.

I residui della trasformazione presentano una media dei valori assoluti pari a 15 cm nella componente Nord e 12 cm nella Est, con un valore massimo pari a 49 cm in Est.

Le differenze osservate con le precedenti trasformazioni provinciali, in termini di componenti Nord ed Est nel Sistema Gauss – Boaga, presentano una media dei valori assoluti pari a 8 cm in Nord e 6 cm in Est, e una Deviazione Standard pari a 12 cm in Nord e 8 cm in Est.

I valori di tali differenze non risultano trascurabili, infatti la trasformazione delle coordinate tramite rototraslazione con variazione di scala, benché permetta di trarre considerazioni di tipo statistico sulla qualità delle coordinate ottenute, risente notevolmente dell'estensione del rilievo, portando quindi a risultati diversi per gli stessi vertici, quando questi ultimi si trovino in reti con estensioni diverse.

L’utilizzo di dati di correzione contenuti nei nodi di grigliati, e la loro successiva interpolazione sui punti di interesse, permette invece il calcolo di coordinate univoche, senza poter valutare però puntualmente il livello di precisione di tali coordinate.

Sono state confrontati i valori ottenute mediante trasformazione conforme con quelle ottenute tramite interpolazione, le differenze osservate sono notevoli, dell’ordine della decina di centimetri.

La disponibilità di un considerevole numero di vertici livellato ha reso interessante lo studio dell’adattamento del geoide; per il calcolo dell’ondulazione di modello (ITALGEO99) è stato utilizzato il software Rerry 1.0 che è stato sviluppato con la funzionalità di processare rilievi di aree vaste.

I valori di ondulazione di modello sono stati adattati, mediante trasformazione a sette parametri, sulla base dei punti a quota nota a disposizione, cioè i vertici di raffittimento livellati, i capisaldi delle linee di livellazione presenti nella regione e i vertici IGM95 della serie 700.

Il risultato di tale adattamento ha messo in luce le stesse problematiche riscontrate nella fase di inquadramento nel Sistema Nazionale, infatti i valori di ondulazione adattata, calcolati per la rete generale, differiscono in maniera sostanziale da quelli calcolati per le varie sottoreti; inoltre il confronto dei dati adattati con quelli sperimentali a disposizione ha dimostrato una minore capacità dei primi a riprodurre l’andamento reale del geoide rispetto a quanto accadeva nel caso delle reti provinciali, analizzate singolarmente, con differenze in media dell’ordine dei 10 cm.

Tali risultati, considerando l’intero territorio ricoperto dalle quattro reti provinciali, permettono di supporre che la procedura di adattamento scelta, per quanto riguarda le ondulazioni puntuali, è risultata troppo “rigida” e ha quindi portato a dei residui, sui punti doppi, più elevati rispetto al caso delle singole province.

## **4**

### **Il posizionamento mediante reti di stazioni permanenti GNSS**

#### **4.1 Informazioni generali**

Le reti di Stazioni GNSS permanenti ormai da anni costituiscono una solida base per vari tipi di applicazione tra cui possiamo ricordare:

- definizione di sistemi di riferimento globale
- studi di carattere geofisico (deformazioni corstali, geodinamica)
- inquadramento di reti geodetiche locali di raffettimento.

Recentemente i servizi di posizionamento basati su reti permanenti di ricevitori GPS (e più in generale GNSS) sono diventati una realtà in ambito internazionale, in Italia, purtroppo, la situazione pare più complessa poiché lo sviluppo di tali strutture e, di conseguenza, dei servizi offerti, segue un andamento caotico poiché viene lasciato all'iniziativa di singole unità (Università, Regioni, Enti e Collegi locali, ecc..) senza, almeno fino ad oggi (2006), un progetto unico ed omogeneo.

Una delle naturali evoluzioni dell'utilizzo di una rete di stazioni permanenti può essere riconosciuta nel loro utilizzo per il posizionamento di precisione in tempo reale, a tal proposito possiamo notare che numerose sono le esperienze che in Italia vanno realizzandosi, visti anche i considerevoli vantaggi che queste strutture consegnano ad un'utenza tecnica.

Le varie applicazioni della tecnologia GPS e satellitare in generale nel campo professionale sono ovviamente molto variabili e, la disponibilità di una struttura di stazioni permanenti, può in molti casi coadiuvare il lavoro dei tecnici sul territorio rendendolo più rapido ed economico.

Per tali motivi l'utenza tecnica ha la necessità di comprendere quali siano i limiti, i benefici e le problematiche legate all'utilizzo di tali sistemi che, indiscutibilmente, hanno come vantaggio diretto una riduzione dei costi dei rilievi. Se omogeneamente dislocate sul territorio e dotate di sistemi di comunicazione dati adeguati, le reti di stazioni permanenti possono costituire il supporto ideale per chi opera in tempo reale e, in alcuni casi, per applicazioni statiche su vaste aree.

Per la realizzazione di tali servizi sono state sviluppate diverse soluzioni, nel corso degli anni, che si differenziano da un lato per la metodologia con cui vengono stimati i modelli di correzione (approcci differenziati, approcci non differenziati) e dall'altro per il modo in cui sono inviate le correzioni al ricevitore mobile (Modello a griglia delle correzioni, Stazioni master e stazioni ausiliari, Stazioni Virtuali, ecc.).

Una peculiarità delle reti di stazioni permanenti, principalmente legata al rilievo in tempo reale, è che tali strutture riferiscono tutti i rilievi che utilizzano quel servizio all'interno del



sistema di riferimento definito dal gestore della rete; resta il problema di provvedere alla fornitura dei parametri per la trasformazione dei dati misurati nel sistema di riferimento nazionale.

Peraltro il mantenimento in funzione delle reti NRTK non è affatto banale e non è ancora del tutto chiaro il livello di precisione e di attendibilità dei risultati che possono essere ottenuti in tempo reale in rilievi di tipo professionale, che hanno da un lato il dovere di essere accurati al livello necessario dal lavoro intrapreso, dall'altro devono dare garanzie di convenienza economica e di efficacia.

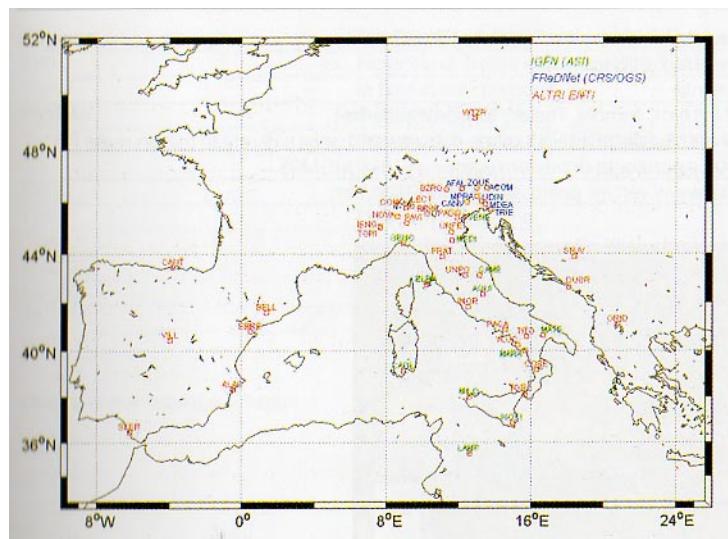
Tutte le sperimentazioni, in campagna e in laboratorio, riportate nel presente lavoro sono state effettuate tramite l'utilizzo della rete di stazioni permanenti realizzata dall'Università di Bologna (NRTK/BO).

#### **4.2 Lo stato dell'arte in Italia**

Le principali reti di stazioni permanenti italiane sono tre: la rete ASI (Agenzia Spaziale Italiana), la rete TIM e la rete dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. La rete ASI, comprendente anche alcuni vertici della rete TIM, al momento attuale distribuisce servizi e prodotti ad è formata da 44 stazioni permanenti di cui 13 gestite direttamente dall'ASI. In figura X viene presentata la rete nella sua configurazione attuale.

Sebbene la rete gestita dall'ASI abbia un importante ruolo a livello internazionale, si può osservare che manca di un piano di sviluppo a carattere nazionale, infatti la distribuzione delle SP non segue un andamento troppo omogeneo sulla nazione e comunque la rete non rincorre gli scopi propri di un servizio a scala nazionale.

Il centro di controllo si trova presso il Centro di Geodesia Spaziale (CGS) a Matera e fornisce, tramite il sito [http://geodaf.mt.asi.it/html\\_old/browse.html](http://geodaf.mt.asi.it/html_old/browse.html), all'utenza i dati grezzi e le soluzioni della rete.



**Figura 4.1 - La rete Geodaf**

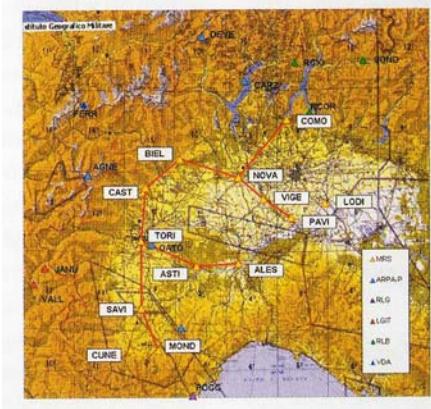
La mancanza, in Italia, di un organismo centrale come una Commissione Geodetica Nazionale ha fatto sì che la realtà principale in cui sviluppare i progetti per l’installazione di reti di stazioni permanenti fosse il livello regionale. E’ infatti a tale livello che si trovano molti esempi di strutture di stazioni permanenti che sono diventate operative nel corso degli ultimi anni in Italia.

Un altro campo, certamente di non minore interesse, è quello universitario che ha visto lo sviluppo e l’installazione di molte reti di SP soprattutto per scopi di ricerca.

Inoltre in Italia sono presenti varie reti di Enti e Ditte privati che gestiscono reti di SP di varia estensione e che forniscono, a vario titolo, servizi all’utenza professionale.

La situazione attuale degli Enti Regione nel nostro Paese ha garantito una buona autonomia di questi ultimi, poiché le Regioni sono coinvolte in prima persona nelle attività proprie del rilievo e del monitoraggio del territorio; inoltre l’Intesa fra Stato e Regioni per la realizzazione dei Sistemi Informativi Geografici ha permesso l’intervento delle Regioni stesse nei problemi normativi nazionali.

Vogliamo riportare nel seguito alcune delle reti di SP permanenti a scala regionale (Biagi et al. 2006) che, già attive o in fase di prossima attivazione, possono essere trovate sul territorio nazionale.



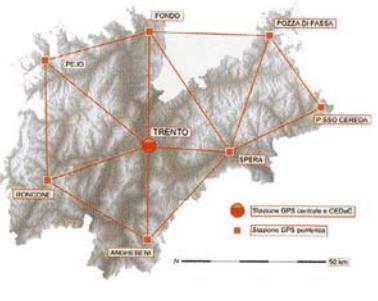
Gestita da:	Politecnico di Torino
Attiva:	Sì
HW/SW:	13SP Leica, Trimble, Thales, Topcon/SpiderNet
Servizi	Posizionamento RT, Dati grezzi (fino a 1 sec)
Inquadramento:	IGb00 e parametri di trasformazione per ETRF89
Sito web:	<a href="http://www.vercelli.polito.it/civili/topo0103.htm">www.vercelli.polito.it/civili/topo0103.htm</a>

**Figura 4.2 - Rete del Politecnico di Torino**



Gestita da:	Regione Lombardia, IREALP
Attiva:	Sì
HW/SW:	18SP Topcon/GEO++
Servizi:	Posizionamento RT, Dati grezzi (fino a 1 sec), PostProc.
Inquadramento:	4 SP per il controllo geodinamico
Sito web:	IGb00 e parametri di trasformazione per ETRF89 <a href="http://www.gpslombardia.it">www.gpslombardia.it</a>

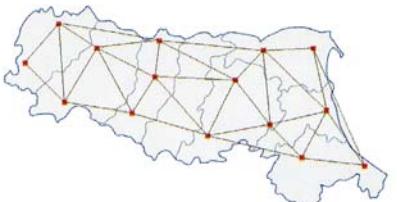
**Figura 4.3 - Rete IREALP**

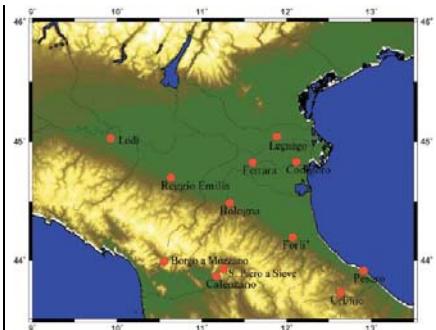


Gestita da:	Provincia e Università di Trento
Attiva:	No
HW/SW:	8SP Leica/SpiderNet
Servizi:	Posizionamento RT, Dati grezzi, PostProc.
Inquadramento:	ND
Sito web:	ND

**Figura 4.4 - Rete Trentino**

## Dallo statico al Network RTK – L’evoluzione del rilievo satellitare

	<p>Gestita da: Regione Friuli          Attiva: Sì          HW/SW: 5 SP Trimble/VRS          Servizi: Dati grezzi (fino a 1 sec.)          Inquadramento: ND          Sito web: <a href="http://www.regione.fvg.it/asp/gps/gps.htm">www.regione.fvg.it/asp/gps/gps.htm</a></p>
	<p>Gestita da: Osservatorio Geofisico sperimentale          Attiva: Sì          HW/SW: 7SP Ashtech/ND          Servizi: Dati grezzi (fino a 1 sec.)          Inquadramento: ITRF2000          Sito web: <a href="http://www.crs.inogs.it/frednet">www.crs.inogs.it/frednet</a></p>
<b>Figura 4.5 - Reti Friuli</b>	
	<p>Gestita da: Assogeo          Attiva: Sì          HW/SW: 11SP(solo in EmiliaRomagna) Trimble/VRS          Servizi: Posizionamento RT, Dati grezzi          Inquadramento: ITRF2000          Sito web: <a href="http://85.37.105.60/">http://85.37.105.60/</a></p>
	<p>Gestita da: Regione, Società dei Geometri          Attiva: No          HW/SW: 15SP Topcon/GEO++          Servizi: Posizionamento RT, Dati grezzi          Inquadramento: ND          Sito web: ND</p>



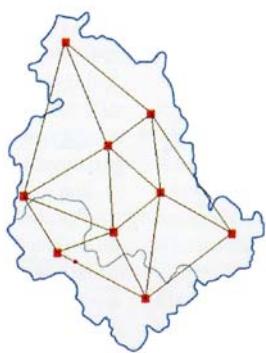
Gestita da:	DISTART Università di Bologna
Attiva:	Sì
HW/SW:	12SP Leica, Topcon/SpiderNet
Servizi:	Posizionamento RT.
Inquadramento:	ITRF2000 e parametri di trasformazione per
Sito web:	ETRF89
	ND

**Figura 4.6 - Reti Emilia Romagna**



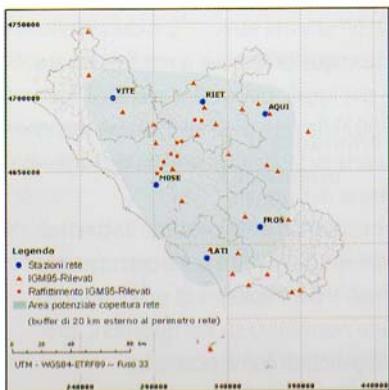
Gestita da:	Comitato regionale dei Geometri
Attiva:	No
HW/SW:	11SP Leica/SpiderNet
Servizi:	Posizionamento RT, Dati grezzi, PostProc.
Inquadramento:	ETRF89-IGM95
Sito web:	ND

**Figura 4.7 - Rete Toscana**



Gestita da:	Regione Umbria, Università di Perugia
Attiva:	Sì, ma in fase di completamento
HW/SW:	9 SP Topcon/GEO++
Servizi:	Posizionamento RT, Dati grezzi, PostProc.
Inquadramento:	ETRF89-IGM95
Sito web:	<a href="http://gpsumbria.tk">http://gpsumbria.tk</a>

**Figura 4.8 - Rete Umbria**



Gestita da:	Università di Roma "La Sapienza"
Attiva:	Sì
HW/SW:	6 SP Trimble,Leica,Topcon,Javad/SpiderNet
Servizi:	Posizionamento RT, Dati grezzi.
Inquadramento:	IGb00e parametri di trasformazione per
Sito web:	ETRF89 <a href="http://w3.uniroma1.it/resnap-gps/index.asp">http://w3.uniroma1.it/resnap-gps/index.asp</a>

**Figura 4.9 - Rete Lazio**



Gestita da:	ARIT, Regione Abruzzo
Attiva:	No
HW/SW:	16 SP Trimble/VRS
Servizi:	Posizionamento RT, Dati grezzi.
Inquadramento:	ND
Sito web:	ND

**Figura 4.10 - Rete Lazio**

Oltre a queste reti, sono attive alcune altre a forte carattere sperimentale e che quindi, almeno per il momento, non si pongono l'obiettivo di fornire un servizio, nel senso più stretto del termine, all'utenza, fra queste citiamo la rete dell'Università di Brescia (Lanzi et al. 2002) la rete dell'Università di Cagliari

#### **4.3 La rete NRTK/BO dell'Università di Bologna**

La rete di stazioni permanenti per il posizionamento in tempo reale, gestita dal DISTART dell'Università di Bologna, nasce nel 2003 per lo studio delle problematiche connesse alla realizzazione di un servizio di posizionamento basato sull'approccio Network Real Time Kinematic. Tali sistemi sono già attivi in vari paesi, tra cui l'Italia, in alcuni casi gestiti da enti statali, in altri da enti privati, e sono, in ambito italiano, al centro di sperimentazione da alcuni anni.

Nella sua configurazione iniziale la rete è formata da sole 4 stazioni permanenti (Bologna, Reggio Emilia, Ferrara e Forlì) rapidamente, nel corso di questi 3 anni, tale numero è salito alle attuali 11 stazioni operative (totali 12) che coprono zone dell'Emilia romagna Romagna, del nord delle Marche, della Toscana e una piccola parte della Lombardia.

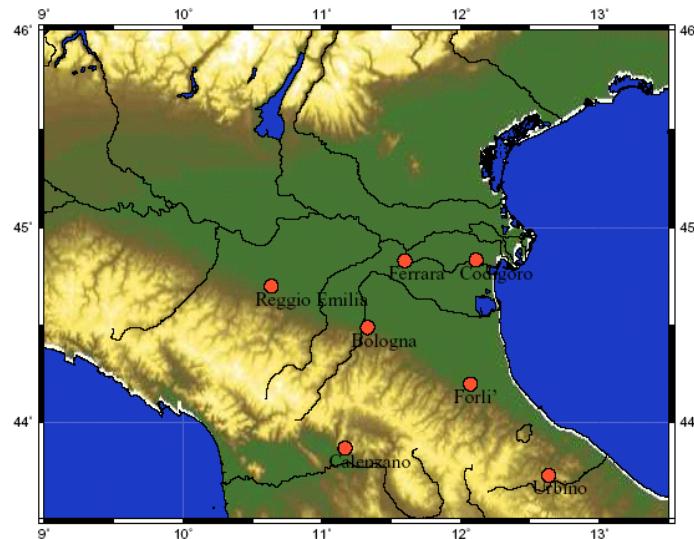
L'ampliamento è stato realizzato sia per ottenere un miglior funzionamento, sia per meglio comprendere aspetti differenti del sistema, anche non spiccatamente topografici: l'impianto di una struttura NRTK richiede di affrontare differenti problematiche, sia dal lato del gestore (tecnologico e geodetico) sia dal lato dell'utenza (Barbarella et al., 2004).

La materializzazione delle stazioni è stata effettuata sia su edifici pubblici che privati. I ricevitori GPS in dotazione sono di differenti modelli, LEICA (GX1230, GRX1200 PRO, RS500, SR530), TOPCON (TPS GB-1000), JAVAD (JPS LEGACY), TRIMBLE (RS).

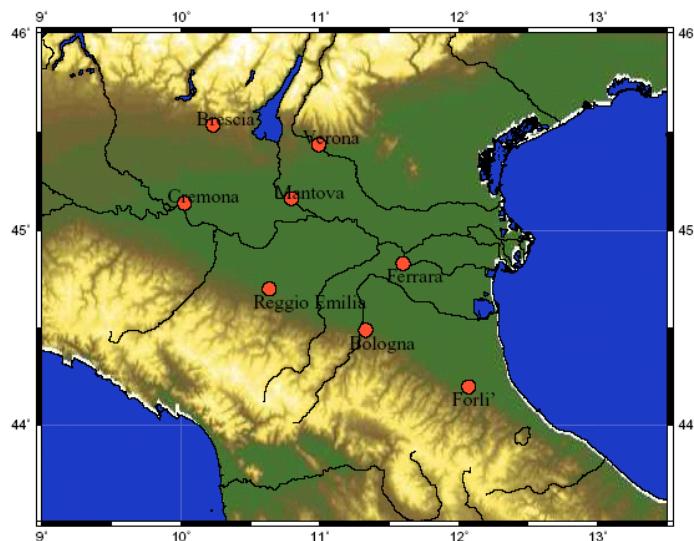
La trasmissione dati tra Stazioni di Riferimento e Centro di Controllo, ubicato presso il DISTART di Bologna, viene realizzata usando sia la rete di trasmissione universitaria (GARR) che i collegamenti di tipo commerciale (ADSL).

Nel corso di questi sono stati testati, mediante varie sperimentazioni, tre software di gestione della rete, netGPS di Trimble (nel periodo settembre 2003 – Marzo 2004), GNSMART GNNS Network di Geo++® (nel periodo Marzo 2004 – Marzo 2005) e SPIDER Net di Leica Geosystems (da Marzo 2005 al momento attuale Ottobre 2006).

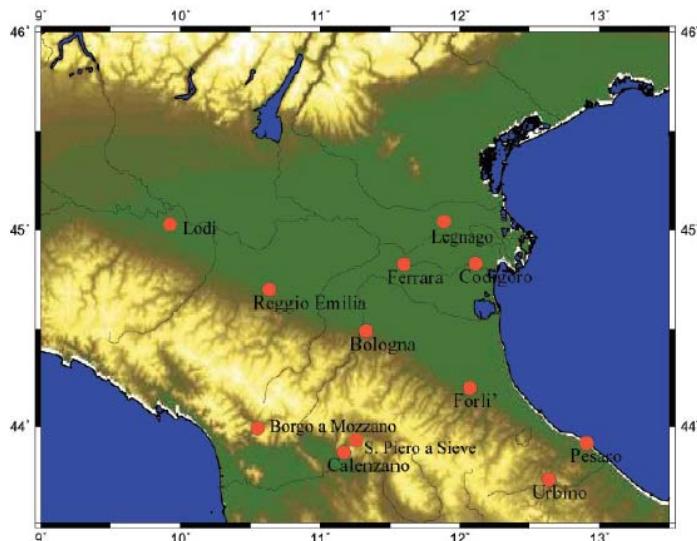
Nelle figure seguenti sono riportate le configurazioni assunte dalla rete durante la sperimentazione con i diversi software.



**Figura 4.11 - Configurazione della rete al momento della sperimentazione GEO++**



**Figura 4.12 - Configurazione della rete al momento della sperimentazione GPSNet**



**Figura 4.13 - Configurazione della rete al momento della sperimentazione SPIDER Net**

Ci sembra necessario osservare, in questo contesto, che le interdistanze tra le Stazioni prossime, nella configurazione attuale, sono piuttosto elevate, variabili tra 50 e 80 km, e quindi la rete costituisce un test severo per le sperimentazioni effettuate, rispetto a reti con maggior densità di vertici.

#### **4.3.1 L’inquadramento in ITRF2000**

L’inquadramento di una rete di stazioni permanenti in un sistema di riferimento globale è un problema fondamentale da risolvere per fornire all’utenza esterna un servizio di posizionamento il più possibile coerente, sia per quanto attiene al tempo reale ma anche per il postprocessamento.

Inquadrare una rete in un datum significa fissare le effemeridi e i parametri di orientamento terrestre in relazione all’inclusione di alcune stazioni di riferimento IGS nella rete di stazioni permanenti stessa. L’IGS mette a disposizione dell’utenza le coordinate delle proprie stazioni permanenti in vari sistemi di riferimento fra cui ITRF2000, nel prossimo futuro ITRF2005, e IGB00.

Le metodologie per vincolare le coordinate delle stazioni di riferimento e di tutti i parametri relativi sono varie, per l’inquadramento della rete dell’Università di Bologna si è utilizzata la procedura standard di calcolo del software BERNSE 5.0, implementate di concerto dall’AIUB (Astronomisches Institut Universität Bern) dal CODE (Center for Orbit Determination in Europe) e dalle procedure diffuse per i centri di calcolo dalla rete EPN (EUREF Permanent Network).

La rete NRTK/BO è stata inquadrata in ITRF2000 seguendo la procedura, inclusa nel software BERNSE 5.0, RNX2SNX e cioè il file in formato PCF che funge da input per le operazioni di calcolo condotte dal BPE (Bernese Processing Engine) per l'esecuzione dei passaggi che permettono di ottenere la soluzione della rete, in formato SINEX, a partire dall'analisi dei dati grezzi in formato RINEX.

La rete definitiva è stata compensata includendo le osservazioni e i parametri di 3 stazioni di riferimento IGS, Venezia, Medicina e Perugia; sicuramente, visto il continuo aggiornamento e la variazione, sia in termini di numero di stazioni che di distribuzione sul territorio, della rete dell'Università di Bologna, si osserveranno nel futuro scelte diverse di tali vincoli, in modo da andare verso una configurazione definitiva e stabile per l'implementazione dei calcoli automatici delle soluzioni della rete stessa.

Prima di passare al calcolo vero e proprio delle coordinate della rete si è resa necessaria una strutturazione più radicale nella denominazione dei file RINEX e, di conseguenza del nome delle stazioni, prodotti dal software di gestione della rete (SPIDET Net di Leica Geosystems) in modo da avere un set di dati coerenti sia con le specifiche del programma Bernese che con quelle delle stazioni IGS utilizzate per l'inquadramento.

I dati utilizzati sono relativi a 11 giorni continuativi di misura, con sessioni giornaliere, per un totale di 14 stazioni (11 stazioni della rete e 3 stazioni per l'inquadramento).

Nel seguito riportiamo la sintesi delle operazioni di calcolo: il pretrattamento dei RINEX utilizzati tramite il modulo RNXSMT che rileva i cycle slips presenti nelle osservazioni di codice e fase basandosi sulle combinazioni lineari di fase e codice di *Melbourne-Wübbena*, *Geometry free* e *Iono free*, il calcolo dei bias degli orologi dei ricevitori, con precisione non inferiore a  $1\mu\text{s}$ , tramite il modulo CODSPP, la formazione delle basi è stata eseguita in automatico, con l'opzione OBS-Max, tramite l'utilizzo del modulo SNGDIF, il calcolo delle differenze di fase e delle soluzioni giornaliere è stato effettuato con il modulo GPSEST ed infine la combinazione lineare delle soluzioni è stata affidata al modulo ADDNEQ2.

La rete così determinata adotta coordinate ITRF2000 all'epoca 2006.3, coincidente con l'ultimo giorno delle registrazioni utilizzate per il calcolo, le coordinate così ottenute sono state inserite nel software SPIDER Net per il calcolo delle correzioni della rete stessa, tali determinazioni per le Stazioni definiscono il Datum nel quale vengono realizzati i rilievi e fornite le coordinate.

#### **4.3.2 L’inquadramento in ETRF89 (IGM95)**

La situazione italiana, per quanto concerne il posizionamento e il rilievo in generale, deve tener conto anche dell’esistenza di un altro sistema di riferimento, concretizzato dai vertici della rete IGM95 che rappresenta una realizzazione italiana di ETRS89.

Il sistema ETRS89, adottato in Europa a fini topo-cartografici, è definito coincidente con il sistema ITRS all’epoca 1989.0, esso, inoltre, s’intende definito solidale con la placca centrale europea.

Lo IAG EUREF si occupa della realizzazione e definizione del sistema stesso e la realizzazione del sistema di riferimento europeo è effettuata tramite le registrazioni della rete di stazioni permanenti EPN.

La quasi totalità dei rilievi eseguiti in Italia, principalmente per scopi tecnici e catastali, necessita dell’inserimento in IGM95, tale passaggio, se per una rete statica di piccole dimensioni o per un rilievo RTK tradizionale si riduce al vincolo di coordinate di alcuni vertici IGM95, diviene più complicato nell’ambito del posizionamento in tempo reale mediante una rete di stazioni permanenti.

Le reti di stazioni permanenti sono inquadrate in ITRF o IGb00 ed il passaggio al sistema ETRF89 non è affatto banale a causa delle significative deformazioni di quest’ultimo rispetto alla realtà fisica del nostro territorio; sebbene esistano, pubblicati, i parametri per il passaggio da ogni realizzazione ITRFY YY di ITRS alla relativa realizzazione ERTFY YY di ETRS89, tramite una propagazione di coordinate e velocità, questi ultimi sono di difficile applicazione poiché necessitano della conoscenza della velocità geodinamica del punto di calcolo (Biagi et al. 2006).

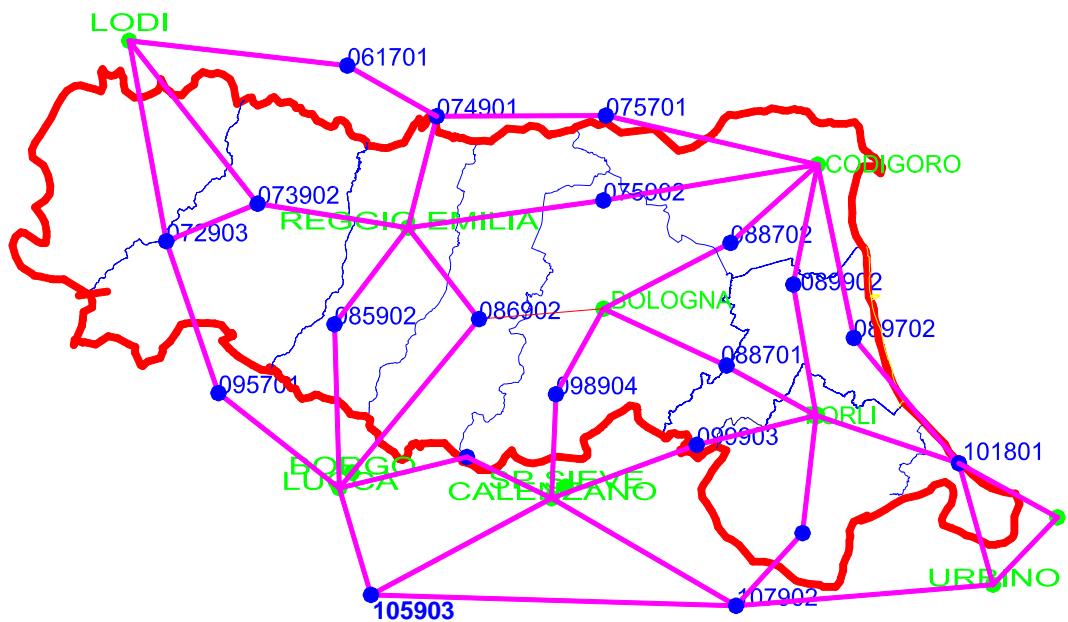
Fatte queste premesse, valide in generale e sicuramente su scala nazionale, si può ipotizzare che, almeno a livello regionale, un trasformazione a 7 parametri può garantire una buona accuratezza, almeno dell’ordine dei centimetri, nella trasformazione di coordinate, che, in definitiva, è la stessa che ci aspettiamo da un rilievo in tempo reale.

Alla luce di ciò la progettazione della campagna di misura per l’inquadramento in IGM95 della rete di stazioni permanenti dell’Università di Bologna è stata eseguita cercando di seguire i seguenti principali scopi:

- Realizzare una rete di forma omogenea costituita dalle SP e da un numero congruo di vertici IGM95.
- Ottenere, su scala regionale, ovvero per l’estensione della rete di SP stessa, i parametri della trasformazione fra ITRF2000 e ETRF89-IGM95
- Testare i parametri ottenuti attraverso sperimentazioni ad hoc.



Per l'inquadramento delle 11 SP della rete NRTK/BO si è scelto di stazionare 20 vertici della rete IGM95, i rilievi sono stati condotti con sessioni statiche di 6 ore con campionamento delle acquisizioni a 15 secondi. La rete misurata è riportata in Figura 4.14.



**Figura 4.14 - Vertici della rete di inquadramento in IGM95**

Nella Figura 4.14 sono inoltre indicate le basi reciproche misurate fra IGM95 in varie sessioni.

I dati grezzi raccolti sono stati processati con il software di calcolo BERNSE 5.0, seguendo la medesima strategia utilizzata per l'inserimento della rete in ITRF2000. Le SP della rete sono state utilizzate per creare il datum della rete, le coordinate dei vertici IGM95, così ottenute, sono state poi utilizzate per il calcolo dei parametri di trasformazione ITRF2000-IGM95.

Senza entrare troppo nel merito delle compensazioni e dei calcoli eseguiti si riporta, in Tabella 4.1, il risultato della trasformazione conforme espresso in termini di residui in Nord Est e quota sui vertici IGM95 utilizzati come punti doppi

Vertice	Nord	Est	Quota
ADRI	-0,03	-0,01	0,01
FELL	-0,04	0,01	0,03
FGAT	-0,03	0,02	0,01
GIAG	0,03	0,01	0,05
LAGR	0,00	-0,01	0,00
MCOR	-0,02	0,01	0,02

MEDE	0,00	0,05	0,06
MROM	0,01	0,04	-0,10
PUIA	0,02	0,01	0,01
RAVE	0,01	0,02	0,00
SANB	0,01	0,01	0,04
SETE	0,00	-0,01	0,01
SGIO	0,02	-0,01	-0,14
TAGL	-0,01	-0,02	-0,01
TARS	-0,02	-0,06	-0,10
TIZZ	0,00	-0,05	-0,01
VICC	0,04	-0,02	0,05
VILL	0,00	0,00	0,07

**Tabella 4.1 - Residui in Nord, Est e quota della trasformazione conforme**

Come si evince dall’analisi delle figure precedenti la precisione finale della rete può essere paragonabile a quella della rete IGM95, alcune incongruenze puntuali sono dovute a condizioni particolari riscontrate nel corso delle operazioni di campagna come la cattiva stazionabilità di alcuni vertici o la loro posizione, a causa di costruzioni successive alla monumentazione, in zone dove si è evidenziata una forte presenza di multipath.

La trasformazione a 7 parametri ha fornito i risultati attesi, almeno per la planimetria si osservano residui dell’ordine di qualche cm, in quota, invece, si notano dei valori di residuo più alto su due vertici, al momento non sono ancora chiari i motivi che possano spiegare tale situazione.

E’ in corso d’opera lo sviluppo e l’utilizzo di un’utility software in grado di effettuare il passaggio dal sistema di riferimento adottato dalla rete di SP al sistema IGM95 – ETRF89, mediante l’utilizzo di grigliati di correzioni, ricavati dallo studio delle differenze di coordinate tra i due sistemi sull’area della regione Emilia Romagna.

Lo scopo di questo studio è di proporre agli operatori uno strumento di lavoro semplice, sulla scia del principio di funzionamento del software VERTO dell’IGM, per ottenere il prodotto finale del proprio rilievo nel sistema nazionale e, pertanto, di incentivare maggiormente l’utilizzo delle reti di stazioni permanenti per il posizionamento in tempo reale.

#### 4.4 Modalità di trasmissione delle correzioni

Le reti di stazioni permanenti, possono fornire le correzioni differenziali del segnale GPS (e quando disponibile GLONASS o di altri futuri sistemi satellitari), modellabili nella posizione del ricevitore mobile. Le principali sorgenti d’errore modellizzate (bias ionosferici, troposferici e di effemeridi) sono fortemente correlate nello spazio. Nel corso degli anni sono state proposte diverse soluzioni, che si differenziano fondamentalmente per la maniera in cui

forniscono le correzioni al ricevitore rover, sono oggi disponibili più SW di rete; prescindendo dagli algoritmi implementati per il calcolo di rete, ovviamente differenti fra i diversi SW, allo stato attuale vengono proposti tre tipi di prodotti di rete per il tempo reale:

1. dati di una SP e parametri d'area per i disturbi spazialmente correlati (il cosiddetto approccio FKP, Wübbena, Bagge, 2002);
2. dati di una stazione virtuale in prossimità del ricevitore dell'utente (il cosiddetto approccio VRS, Vollath et al., 2000);
3. correzioni relative a tutte le SP della cella circostante l'utente (il cosiddetto approccio MAC o MAX, Euler et al., 2001).

Si ricorda che ciascuno dei SW di rete oggi disponibili ha legato la sua nascita ad uno specifico prodotto fra i tre citati: peraltro ogni SW implementa e fornisce almeno uno fra gli altri prodotti. Allo stato attuale, sulle diverse reti oggi operative, è già stata condotta attività di sperimentazione comparativa sui diversi prodotti di rete. Tali test hanno in generale dimostrato buone affidabilità e accuratezze; se non per minime sfumature, affidabilità e accuratezze sono sembrate omogenee per i diversi prodotti: ovvero non esistono elementi attuali per ritenere un prodotto migliore rispetto agli altri (Benciolini, Biagi 2005).

Diverse sono le metodologie proposte sia riguardanti l'impiego delle correzioni calcolate con l'ausilio di una rete di stazioni permanenti, sia inerenti le modalità di trasferimento verso i singoli utenti. Tra queste troviamo le modalità Multi Reference Station e Virtual Reference Station. (Roggero 2004).

#### 4.4.1 VRS

La realizzazione di stazioni virtuali può essere eseguita in due modi differenti, sia nella modalità di realizzazione che di precisioni raggiungibili:

- Un centro di controllo (master), note le osservazioni nelle stazioni permanenti della rete, interpola le correzioni nella posizione approssimata del ricevitore mobile (rover), ovvero in una stazione virtuale teoricamente molto vicina alla sua posizione reale. Questo sistema richiede una comunicazione a due vie tra il rover e il master: il rover invia al master la sua posizione approssimata (via messaggi NMEA), e dal master riceve delle correzioni “personalizzate”.
- Il master, note le osservazioni nelle stazioni permanenti della rete, interpola le correzioni in un numero limitato di stazioni virtuali, disposte sul territorio in modo da infittire la rete. Il rover applica le correzioni della stazione di riferimento (reale o virtuale) più vicina.

Questo sistema è di più semplice gestione, non essendo più necessario conoscere nel master la posizione approssimata del rover. Le precisioni raggiunte sono tuttavia inferiori.

Le VRS utilizzano gli standard RTCM per la trasmissione delle correzioni. La modalità a due vie è, almeno al momento attuale, la più diffusa, il meccanismo di funzionamento può essere spiegato come segue:

- Il rover invia al centro di controllo un messaggio NMEA con la propria posizione.
- Per avere una corretta modellazione dei parametri troposferici per la quota della stazione rover e, al tempo stesso, ottenere una rapida inizializzazione, è necessario il posizionamento differenziale del rover, quindi il server trasmette in questa prima fase le correzioni di codice.
- Il rover calcola la propria posizione in DGPS e, tramite NMEA la invia al centro di controllo.
- Avendo così definito la posizione della stazione virtuale, ha inizio la spedizione dei dati in continuo utilizzando il formato RTCM (messaggi Type 20 e 21).
- Risoluzione della ambiguità OTF su una base iniziale di pochi metri.
- La posizione della stazione virtuale viene nuovamente inizializzata in prossimità del rover, qualora la distanza fra VRS e rover superi una soglia prefissata,

In particolare il firmware presente presso la stazione rover deve essere in grado di trasmettere, su richiesta del server, la propria posizione attraverso il formato standard NMEA. Qualora venga gestito dal centro di controllo anche il monitoraggio dell'inizializzazione presso il rover e della distanza presente tra la stazione virtuale e l'utente (es. sistema Trimble GPSNet®), il firmware del rover deve fornire durante tutto il rilievo la propria posizione che avrà nelle varie fasi precisioni diverse (point positioning, DGPS, float, fixed). In questo caso il centro di controllo potrebbe fornire all'utente una certificazione circa lo stato raggiunto (float e fixed) nelle inizializzazioni effettuate. Un ulteriore aspetto da considerare circa la compatibilità del firmware strumentale, riguarda le strategie di inizializzazione e di posizionamento adottate dal rover. In particolare il rover non deve essere influenzato nella scelta delle combinazioni lineari di fase e di codice, dalla distanza (fittizia) estremamente ridotta rispetto alla stazione virtuale. Alcuni ricevitori, infatti, in presenza di brevissime distanze optano per soluzioni basate sulla combinazione narrow lane, che non è idonea nelle reali condizioni di impiego su ampie aree tipiche dell'approccio VRS. La correzione viene stimata per una posizione molto vicina all'utente e quindi normalmente le correzioni sono piccole e il carico trasmissivo, ridotto. Il sistema VRS si basa su protocolli di comunicazione standard, ma la gestione

personalizzata delle correzioni richiede opportune infrastrutture per la diffusione del dato. La seconda modalità operativa, che consiste nel definire una serie di stazioni virtuali di raffettimento di posizione rimane fissa, è di più semplice realizzazione e non richiede una comunicazione a due vie. In questo caso il rover impiega le correzioni fornite dalla stazione reale o 65 virtuale più vicina ed effettua un rilievo RTK in modalità standard. In questo caso le risorse computazionali e trasmissive richieste al server GPS sono complessivamente inferiori rispetto alla modalità VRS basata sulla definizione di una stazione virtuale per ciascun utente, ma a causa di un inevitabile peggioramento nella qualità delle correzioni, non più ottimizzate per la posizione del punto di misura, si osserva un peggioramento in termini di precisione e nei tempi di inizializzazione.

#### 4.4.2 MRS

In tempo reale le correzioni differenziali possono essere modellate da un centro di controllo sull'intera area coperta dalla rete di stazioni di riferimento. Il centro di controllo provvede poi all'invio delle correzioni di rete e dei relativi parametri di modello, che saranno utilizzati dal rover per ricostruire il valore delle correzioni nella sua posizione approssimata.

Il posizionamento Multi Reference Station Può essere applicato sia in tempo reale che in post processamento, utilizza un modello di correzione del segnale GPS ricavato dalle osservazioni di una rete di stazioni di riferimento. Questo sistema, che chiameremo Network RTK, non richiede comunicazione a due vie, ma purtroppo si adatta con difficoltà all'impiego degli attuali standard di trasmissione RTCM. La struttura del messaggio, infatti, non prevede l'invio di correzioni e parametri di rete. Questi possono venire impacchettati nel record 59, riservato dall'RTCM alla trasmissione d'informazioni proprietarie; si perde tuttavia la completa standardizzazione del messaggio. In alternativa l'estrapolazione delle correzioni dal modello può essere fatta direttamente dal centro di controllo, in corrispondenza di stazioni virtuali opportunamente disposte (modalità Virtual Reference Station). Attualmente sono già disponibili da alcuni anni sul mercato soluzioni MRS del tipo VRS o NRTK, che tuttavia nella maggior parte dei casi sono proprietarie, quindi vincolate all'uso di un particolare marca di ricevitori e di software su tutta la rete interessata. L'utilizzo di un formato standard per la trasmissione di dati e correzioni, sia tra le stazioni di una rete che verso l'utente mobile, permetterebbe una totale interconnessione tra ricevitori prodotti da case costruttrici diverse, semplificando inoltre la gestione delle reti stesse. Proprio per questo motivo è allo studio una nuova versione del formato RTCM, che supporterebbe la trasmissione di correzioni differenziali in un ambito di rete. I concetti di MRS, VRS e NRTK sono concepiti (e percepiti



dall’utenza) per un impiego nel posizionamento rapido-statico o RTK, tuttavia potrebbero essere vantaggiosamente applicati anche nel post-processamento delle osservazioni (posizionamento PPK) in alternativa al posizionamento multi - base. Si pensi ad esempio al tracciamento di traiettorie, problema di fondamentale importanza nella fotogrammetria diretta o nel LIDAR, o ad applicazioni di mobile mapping come la realizzazione del catasto strade. (Roggero 2002)

#### **4.4.3 I protocolli di trasmissione**

La comunicazione delle stazioni permanenti con il centro di controllo, e con l’utente finale avviene con metodi che dipendono da vari fattori tra cui sicuramente la quantità dei dati da trasmettere, dal tipo di comunicazione richiesta (bi o monodirezionale).

Molte reti di stazioni permanenti, per il loro funzionamento, possono integrare vari sistemi di trasmissione, a seconda delle necessità specifiche dei propri utenti e del territorio servito.

Le stazioni permanenti e il centro di controllo comunicano sostanzialmente in due modalità:

- con connessione diretta via rete telefonica
- con connessione intranet o internet.

Al momento attuale la scelta più logica sembra essere quella della connessione via intranet o internet, chiaramente tale scelta ha dei vantaggi e svantaggi che possono essere ritrovati, ad esempio, nella velocità e stabilità della connessione, ma anche nella necessità di dover attingere di una comunicazione di rete veloce e di un gestore specifico della rete stessa.

La trasmissione verso l’utente finale, che fondamentalmente è quella che ci permette di ottenere le posizioni finali del rilievo, può avvenire attraverso varie metodologie.

Nel corso degli anni si sono applicati e studiati vari metodi per la comunicazione centrodì controllo-rover, riportiamo nel seguito alcune delle possibilità offerte dalla tecnologia, analizzando brevemente i punti di forza e di debolezza di ognuna di esse.

- **GSM** - La trasmissione via modem GSM (o quando disponibile GPRS o UMTS) si appoggia alla rete di telefonia mobile privata che in Italia è gestita da diversi operatori con diversi piani tariffari. La copertura telefonica, se non per qualche rara eccezione sul territorio, è garantita dai vari gestori ma rimane lo svantaggio del costo poiché non sempre sono disponibili delle tariffe “flat” relativamente economiche. Da qualche tempo, con l’introduzione del GPRS e UMTS tali costi possono essere abbattuti poiché sono previste maggiori tariffe a prezzo fisso e, comunque, con tali metodologie la tariffazione si basa sugli effettivi bytes di traffico utilizzati.



- **INTERNET** - Nella trasmissione attraverso internet si distingue tra la modalità con cui l'utente si connette alla rete e la modalità in cui i dati vengono distribuiti e trattati dall'utente. L'accesso al Mobile IP oggi è possibile attraverso il sistema GSM, il GPRS (11.5 kbps), UMTS (144 kbps). Anche in questo caso, sebbene tra queste varie possibilità ci siano differenze in termini di velocità teoriche raggiungibili, la scelta è deve essere fatta in base alla copertura della rete e al costo. Le correzioni RTCM, per viaggiare in internet vengono suddivise in pacchetti, ad ognuno dei quali vengono associate informazioni che consentono al pacchetto di raggiungere la destinazione finale ed al destinatario di ricomporre il messaggio originale. L'EUREF ha sviluppato un protocollo di trasmissione chiamato Ntrip (Networked transport of RTCM via internet protocol), basato sul protocollo HTTP/1.1 migliorato per supportare lo streaming di dati GNSS. Il sistema è sviluppato in tre programmi denominati NtripServer, NtripClient, e NtripCaster. Il software NtripServer gira sul computer collegato alla sorgente di dati (stazione permanente o software che genera stazioni virtuali) e si comporta da client che si connette sulla porta 80 (assegnata ai server http) dell'NtripCaster. I dati delle singole stazioni possono essere immessi in rete senza alcuna modifica, o passare attraverso un network RTK e successivamente andare in rete, per mezzo dell'NtripCaster. L'NtripCaster è un server HTTP basato sul software Icecast, sviluppato sotto licenza GNU (open source) ed impiegato per diffondere via Internet file MP3. La peculiarità di questo software è quella di duplicare la sorgente dei dati per migliaia di utenti collegati contemporaneamente. L'NtripCaster, ridisegnato per trasmettere dati DGNSS, mantiene aggiornata una tabella, chiamata source table, con l'elenco delle stazioni permanenti attive dalle quali possono essere attinte le correzioni RTCM. La source table indica se i dati trasmessi provengono da una stazione isolata o da un network RTK. L'NtripClient è una radio GNSS ricevente su Internet che gira su palmare con sistema operativo WinCE, o su computer con sistema operativo Win98/2000/Xp o Linux, collegato al ricevitore. Il software, letta la source table, sceglie la stazione di cui vuole ricevere le correzioni RTCM. Fa parte integrante della radio la gestione della porta che invia le correzioni al ricevitore rover. Direttamente collegato al sistema è il NABU (Notice Advisory to Broadcaster Users) che invia in tempo reale tutte le informazioni sullo stato della rete, segnalando principalmente le condizioni di funzionamento (spegnimento e riaccensione) delle stazioni collegate. Il sistema è ottimizzato relativamente ai principali problemi di internet: sicurezza e controllo degli accessi, latenza. La figura 3 - parte I, mostra il comportamento della connessione ad internet con diverse modalità di accesso alla rete, in cui si evidenzia l'ottimo comportamento della connessione via GPRS. Al momento l'EUREF trasmette i dati di 110 stazioni disseminate in Europa e negli USA



## Dallo statico al Network RTK – L’evoluzione del rilievo satellitare

appartenenti alle reti IGS, EPN, ASCOS (network RTK), SAPOS (Network RTK), GREF, SCIGN. Nel 2003 è stato istituito un nuovo Working Group su "Internet Protocol" che coordina il lavoro della RTCM SC-104 e quello dell'Ntrip.

## **5**

### **La sperimentazione condotta con la rete di stazioni permanenti NRTK/BO**

## **5.1 La raccolta e l’organizzazione dei dati**

Nella prima fase della sperimentazione sul posizionamento in tempo reale mediante reti di stazioni permanenti, che può essere inteso coincidente con gli anni che vanno dal 2003 al 2005, sono state condotte molte campagne di misura volte ad analizzare i tanti e nuovi aspetti propri di tali tecnologie.

Sebbene l’obiettivo primario fosse quello dello studio della precisione del metodo e della sua stabilità, durante le sperimentazioni sul campo sono state raccolte tutte quelle informazioni che, in qualche maniera, potessero risultare utili per la comprensione più profonda di una tecnica, quella del posizionamento in real time, che, basata su rete, lasciava ancora scoperti molti interrogativi.

Le campagne di misura, come verrà spiegato più in dettaglio nel seguito, sono state condotte mediante stazionamenti successivi su siti di coordinate note seguendo differenti modalità di misura, sia in termini di modalità di invio delle correzioni che di parametri utilizzati durante l’esecuzione stessa delle misure, come, ad esempio, il numero di epoche utilizzate per la memorizzazione e la strumentazione utilizzata.

I dati raccolti, per i motivi analizzati fino a questo punto, sono risultati molto numerosi e, inevitabilmente, molto variabili nella tipologia; per essere in grado di eseguire delle analisi affidabili, utilizzando dati scelti da ogni possibile incongruenza, è stata necessaria una fase di riorganizzazione delle misure effettuate, a tale scopo i dati sono stati completamente riorganizzati e strutturati in maniera da rendere identificabili, senza errori, le seguenti informazioni:

- luogo della sperimentazione
- data
- tipologia di posizionamento
- protocollo di trasmissione dati
- epoche utilizzate per la memorizzazione
- intervallo di campionamento
- strumento di misura
- operatore

Purtroppo, seppur per una modesta parte dei dati collezionati in circa tre anni di sperimentazione, alcune informazioni sono mancanti, in tali situazioni si è scelto comunque,

per quanto possibile, di salvare il dato, ma di rendere evidente quale, fra le varie informazioni stimate importanti per le analisi, fosse mancante, diverso, infatti, è il caso in cui non sia disponibile l'informazione sull'esecutore materiale della misura rispetto a quello in cui non si conosca la tipologia di posizionamento o il numero di epochhe utilizzate.

Per portare a termine tali operazioni è stato necessario consultare svariati documenti prodotti da persone differenti durante un periodo di attività abbastanza lungo, la riorganizzazione dei dati è stata anche molto più difficoltosa a causa della mancanza di standard da seguire per l'archiviazione delle analisi sulle stesse, infatti, le tabelle contenenti i risultati delle varie campagne sono state compilate e strutturate secondo le esigenze specifiche di ogni campagna senza un quadro unitario; per ovviare a questa situazione è stato studiato un foglio di campagna, specifico per misure NRTK, in modo da rendere uniformi, per i rilievi a seguire, le informazioni da raccogliere durante la misura, così da poter disporre di un set di dati omogeneo e, soprattutto, dotato di tutte quelle informazioni utili ad una sua valida analisi ed interpretazione.

## **5.2 Il database per le misure NRTK**

La prima fase della sperimentazione sulle reti di stazioni permanenti ha visto il concentrarsi delle attività di campagna non lontano dalla sede del DISTART, tutti i siti utilizzati in questa fase sono all'interno della provincia di Bologna e i vertici oggetto delle misure sono tutti facenti parte di reti misurate in passato dall'Università di Bologna.

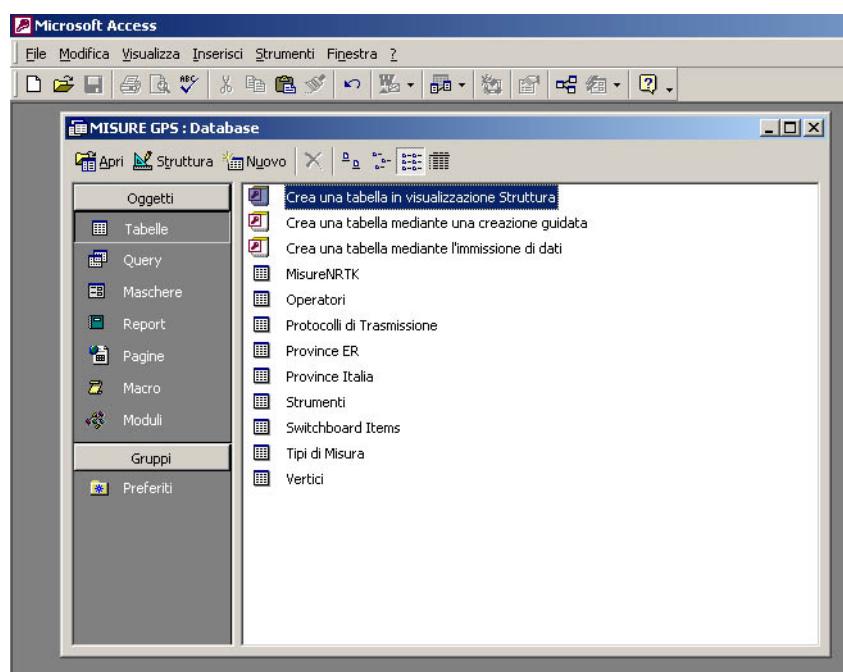
Con il prosieguo della sperimentazione è stato necessario allargare la zona dei rilievi, questa espansione può essere vista a due livelli, il primo in relazione alla collocazione delle stazioni permanenti stesse, il secondo in relazione con i siti di esecuzione delle misure; alla rete di stazioni permanenti, infatti, sono state aggiunte nuove stazioni collocate sia nel territorio regionale che al di fuori dello stesso e si sono utilizzati, per le sperimentazioni, siti in altre Province delle Emilia-Romagna.

Inoltre, nell'ultima fase della sperimentazione, è stata variata anche l'architettura hardware software del centro di controllo mediante il passaggio al software SpiderNet della Leica Geosystems e l'utilizzo del protocollo di trasmissione NTRIP.

Vista perciò la strutturazione più complessa e variabile dei dati, compresi quelli rilevati durante le fasi precedenti, si è presentata la necessità di un'archiviazione degli stessi basata su metadati, in modo da rendere semplice e rapida una loro futura consultazione.

A tal proposito è stato sviluppato un Database interno, basato, viste le applicazioni necessarie e le dimensioni previste, su Microsoft Access; tale strumento è stato pensato principalmente per la gestione dei dati di campagna delle sperimentazioni Real Time, ma la sua realizzazione è stata eseguita senza tralasciare la possibilità, in futuro, di un suo eventuale utilizzo differente come, ad esempio, la consultazione in remoto tramite internet o l’archiviazione e la distribuzione dei dati grezzi delle stazioni permanenti della rete.

Per garantire la protezione dei dati registrati e la correttezza degli inserimenti le varie tabelle sono state predisposte in modo da avere, fra di esse, relazioni che soddisfino l’integrità relazionale; la struttura madre del DB prevede la presenza di nove tabelle e sei Query di base.



**Figura 5.1 - Struttura del DB**

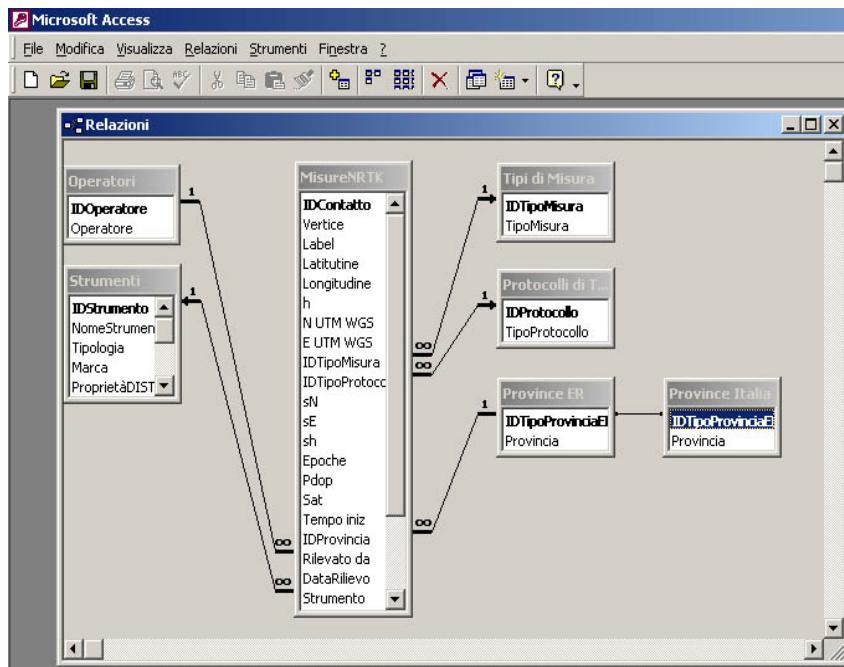


Figura 2 - Relazioni fra le Tabelle

Sebbene si sia cercato, nella realizzazione del DB, di creare una struttura che seguisse il più possibile gli standard, occorre precisare che il prodotto nasce sulla base di esigenze specifiche derivanti dalla tipologia della sperimentazione e, benché a nostro avviso può essere considerato un buon strumento per l'archiviazione e la consultazione delle misure, non vuole avere la pretesa di rappresentare un modello, ma solo di mettere in luce le esigenze proprie di un DB dedicato alle misure NRTK e le scelte operate per soddisfarle.

## 5.2. Studio sulla ripetibilità delle misure

Prima di entrare nello specifico della trattazione del presente paragrafo può essere utile riportare alcune considerazioni introduttive alla sperimentazione presentata.

L'apparato che realizza il posizionamento di precisione in tempo reale mediante tecniche di rete GPS può essere così schematizzato:

- segmento delle stazioni: costituito da tutte le stazioni permanenti GNSS, con compiti di generazione ed invio o delle osservazioni, o delle relative correzioni di fase;
- segmento di trasmissione dati dalle Stazioni GNSS al centro di controllo;
- centro di controllo: che raccoglie i dati forniti dal segmento delle stazioni, li memorizza, li elabora e li invia all'utente;
- segmento di trasmissione dati all'utente;
- segmento utente: costituito dagli utilizzatori del sistema, ossia da ricevitori GNSS in grado di gestire i messaggi provenienti dal centro di controllo.



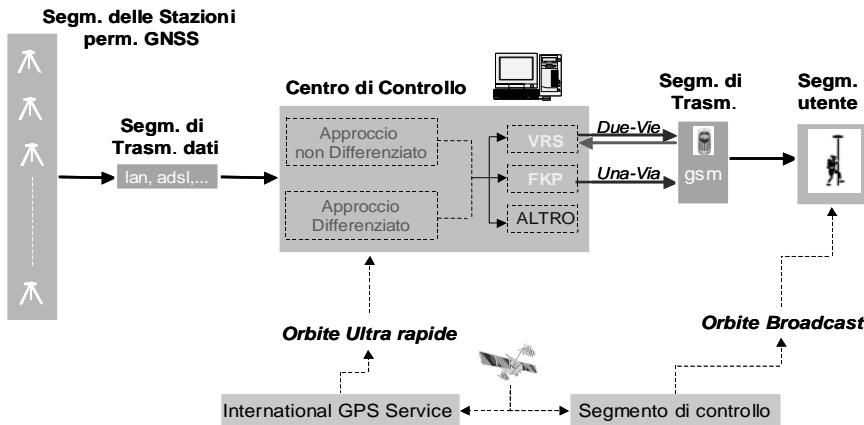


Figura 5.3 - Schema logico per la struttura di una rete NRTK

I vari software presenti sul mercato scelgono differenti strategie sia nella fase di generazione dei modelli di correzione dei parametri spazialmente correlati sia nella fase di diffusione verso l’utenza dei parametri stessi.

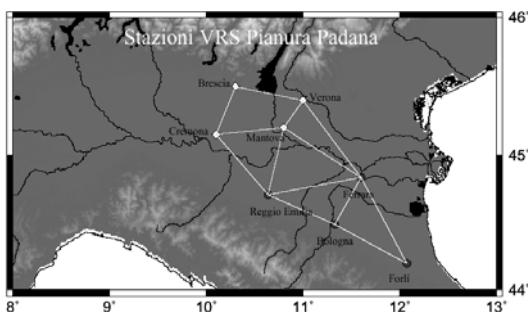
I risultati riportati sono relativi alle esperienze condotte con due dei Software più diffusi:

- GPSnet di Trimble
- GNSMART GNNS Network di Geo

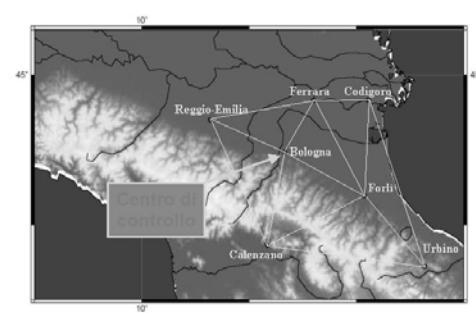
I test sono stati eseguiti per verificare le reali potenzialità del sistema *rete di stazioni permanenti* sia in termini di precisione/accuratezza che in termini di utilizzabilità, nei suoi vari aspetti, del sistema stesso.

Preme a questo punto sottolineare che, in ogni caso e in ogni esperienza condotta, alla base del problema rimane comunque fondamentale l’inquadramento geodetico della rete che si trasferisce in modo integrale anche sulle stime di posizione dell’utente. Al fine di verificare gli aspetti legati alla precisione ed accuratezza delle soluzioni *Real Time* è stato quindi necessario eseguire test ripetuti su vertici materializzati accuratamente (occasionalmente anche della rete IGM95) ma, ai fini della valutazione dell’accuratezza, è stata necessaria una determinazione delle coordinate dei vertici utilizzati nel test anche nel *frame* di inquadramento delle stazioni permanenti mediante una campagna di misure statiche *ad hoc*, operando in tale maniera è stato possibile isolare i problemi legati all’approccio NRTK da quelli legati all’utilizzo di datum geodetici differenti (vedi Capitolo 3). Le problematiche di interesse per l’utenza, come l’utilizzabilità e la continuità del servizio di posizionamento, sono state affrontate tramite uno studio dei tempi di inizializzazione del sistema e della continuità della stabilità della soluzione raggiunta

Per entrambe le sperimentazioni il centro di controllo (software di raccolta ed elaborazione dei dati) è stato collocato presso il DISTART dell’Università di Bologna.



**Figura 5.4 -La rete utilizzata per la sperimentazione GEO++**



**Figura 5.5 - La rete utilizzata per la sperimentazione GNSSMART**

I siti utilizzati per le esperienze GPSnet sono stati poi utilizzati anche per le esperienze GNSMART.

I due sistemi in oggetto presentano alcune caratteristiche differenti soprattutto per quanto riguarda la generazione dei modelli di correzione e il metodo “preferito” per il trasferimento di queste ultime. Il sistema GPSnet si basa su un approccio di tipo differenziato che individua la migliore configurazione di rete e calcola le basi per poter fissare le ambiguità di fase iniziali, mentre il sistema GNSSMART preferisce un approccio di tipo non differenziato. Sebbene entrambi i software permettano differenti modalità di invio delle correzioni, il sistema GPSnet è stato inizialmente associato, in Italia, alla tecnica delle Virtual Reference Station mentre il sistema GNSSMART alla tecnica FKP.

In realtà è difficile entrare nel merito di quali siano i punti di forza di un sistema rispetto all’altro e la filosofia che ha accompagnato la sperimentazione è stata quella di osservare le differenze in termini di utilizzabilità vista dalla parte dell’utente.



**Figura 5.6 - I siti utilizzati per le sperimentazioni**

Al fine di analizzare meglio i risultati ottenuti, oltre alle informazioni contenute nel file di registrazione del ricevitore mobile (che variano da ricevitore a ricevitore), in fase di sperimentazione si sono riportati sul foglio di campagna gli elementi che sembravano essere caratterizzanti l’esperimento.

Numero di Satelliti, PDOP, tempo necessario per inizializzare il sistema, numero di epoche utilizzate per il rilievo del punto, sono solo alcuni dei parametri che si è cercato di memorizzare. Col progredire della sperimentazione si è ritenuto utile impiegare un operatore nel monitoraggio continuo del centro di controllo (verifica dei ritardi dei dati dalle stazioni permanenti, controllo sul numero di satelliti ad ambiguità fissate, etc...) contribuendo al completamento delle informazioni legate alla sperimentazione. Per questi rilievi sono stati utilizzati ricevitori Leica system 1200, Topcon GB1000 e Trimble 5700 e 5800.

### **5.3. Il rilievo NRTK della rete GPS7 della Provincia di Forlì-Cesena**

La sperimentazione condotta ha tentato di analizzare in modo critico il funzionamento di una rete di stazioni permanenti per il posizionamento di precisione in tempo reale, focalizzando l’attenzione su aspetti legati alle precisioni ed accuratezze raggiungibili nonché alla stabilità sulla precisione del posizionamento. Non si sono però osservate solo le reali potenzialità di queste strutture ma anche se, in caso di posizionamenti risultati a posteriori errati, esistessero parametri indicatori della reale qualità del dato memorizzato; uno degli aspetti più delicati infatti è legato alla reale qualità del rilievo in tempo reale.

Scopo della sperimentazione è di analizzare prima di tutto i seguenti aspetti:

- Ripetibilità delle misure a breve e lungo termine
- Identificabilità degli errori di misura

- Accuratezze e precisioni ottenute

Per ottenere tali risultati è stata scelta un'area di prova con punti materializzati in modo stabile e quindi rioccupabili con accuratezza. Sui punti del poligono di prova sono stati eseguite tre diverse campagne di misura a qualche mese di distanza tra di loro, una in estate, una in autunno e una in inverno, come garanzia di indipendenza delle prove.

Per valutare l'affidabilità generale del risultato la posizione dei punti è stata rilevata in modo indipendente tramite una ulteriore campagna di rilievi relativi statici, che ha seguito le procedure suggerite dall'intesa stato regioni enti locali per il raffettimento della rete GPS nazionale.

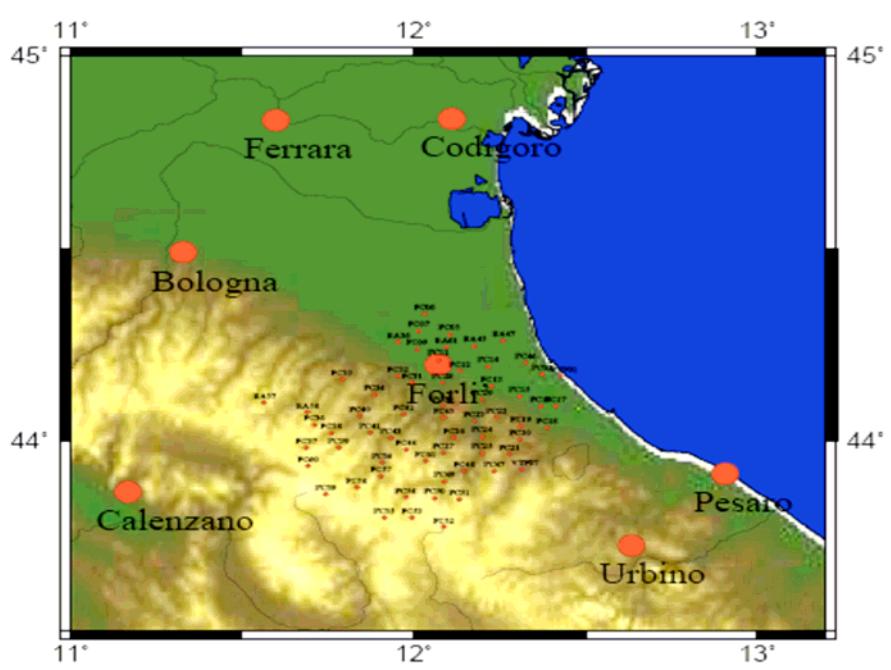
Si è cioè utilizzato il rilievo di raffettimento a 7 km eseguito in provincia di Forlì-Cesena, collegando alcuni punti alle Stazioni di Riferimento e ricalcolando la rete GPS/7 nello stesso riferimento delle Stazioni della rete NRTK.

### **5.3.1 Rete test**

La rete utilizzata come campo di test è stata la Rete di Raffettimento a 7km della provincia di Forlì-Cesena. La scelta è ricaduta su tale rete per i seguenti motivi:

- Distribuzione omogenea dei vertici su una porzione di territorio interamente coperta dal servizio utilizzato.
- Varietà della morfologia territoriale, tale provincia, infatti, ha sia zone montuose che di pianura.
- Recente misurazione della rete con modalità di rilievo statico, le misure sono state eseguite nella seconda metà del 2005, quindi appena dopo l'inizio delle operazioni NRTK.





**Figura 5.7 – Vertici misurati della rete GPS 7 della Provincia di Forlì-Cesena (pallini piccoli) e rete NRTK del DISTART attiva al momento delle misure (pallini grandi)**

Le misure statiche sono state effettuate dalla Ditta aggiudicatrice dell'appalto nello stesso periodo del test NRTK. Questa concomitanza può consentire un confronto diretto fra le due tecniche utilizzate (NRTK vs Statico relativo); tale confronto ha fornito utili indicazioni sulle accuratezze raggiungibili dal posizionamento in tempo reale.

Al momento dell'inizio del primo rilievo in tempo reale la rete GPS7 non era stata ancora materializzata completamente, perciò sono stati presi in considerazione e misurati soltanto i 49 vertici di nuova istituzione già materializzati.

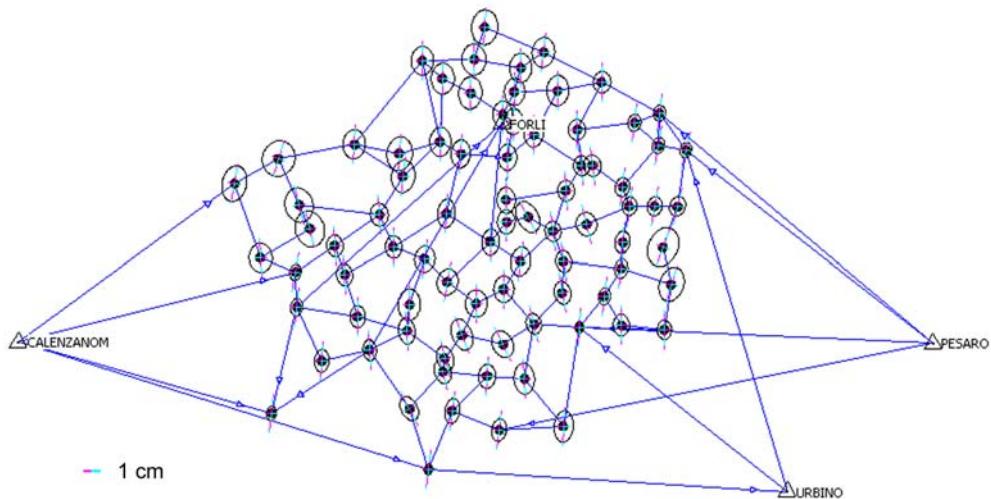
La rete consta quindi, in totale, di 82 vertici, di cui 19 IGM95, collegati da 126 basi indipendenti misurate in 47 sessioni di misura, la lunghezza media di tali basi è di circa 6,5 km. Le procedure di rilievo sono quelle standard per il raffettimento primario della rete GPS nazionale.

I vertici oggetto del test della rete di Forlì-Cesena sono riportati in figura 1.

Per poter effettuare dei confronti fra coordinate coerenti fra loro è stato necessario inquadrare il rilievo statico nello stesso Datum della rete di stazioni permanenti utilizzato per le sperimentazioni.

La rete GPS7 di Forlì-Cesena è collocata nella parte sud-est dell'area coperta dalla rete di stazioni permanenti, le stazioni più vicine, utilizzate per l'inquadramento, sono state Pesaro, Urbino, Calenzano e Forlì, in tutto sono state utilizzate 12 basi indipendenti per

l'inquadramento, 3 per stazione. L'inquadramento è stato realizzato con il software Trimble Geomatics Office.



**Figura 5.9 - Compensazione della rete di raffittimento di Forlì-Cesena vincolata alle stazioni permanenti del network RTK**

L'asse maggiore medio delle ellissi d'errore della compensazione è pari a 16 mm, mentre il massimo osservato vale 24 mm, la media degli SQM in quota si attesta sui 30 mm ed il valore massimo osservato è pari a 54 mm.

### **5.3.2 Modalità di esecuzione dei rilievi in tempo reale**

Le misure in campagna sono state effettuate con ricevitori Leica Geosystems 1200 equipaggiati con antenna Leica Ax1202 e radiomodem GSM integrato con il ricevitore per la comunicazione con il centro di controllo; nel corso di questa sperimentazione non è stata mai utilizzata la tecnica di comunicazione basata sul sistema NTRIP. Il posizionamento sui vertici, per rispecchiare sufficientemente la stessa modalità operativa di un rilievo di carattere tecnico, è stato eseguito su palina tenuta in bolla da un tripode con pinza a molla.

Su ognuno dei vertici, per ogni campagna di misura, si è stabilito di eseguire almeno 2 acquisizioni, ottenute come media di almeno 30 secondi di registrazione, e tutte eseguite previa reinizializzazione del sistema con relativa nuova chiamata al centro di calcolo mantenendo però il ricevitore fisicamente acceso. In realtà solo la prima ripetizione è stata realizzata ripetendo le inizializzazioni due volte mentre per la seconda e la terza si è passati alle tre. Tale variazione della pianificazione è stata adottata sulla base dell'esperienza e dei dati provenienti dalla prima ripetizione.

Poter disporre di almeno due ripetizioni, effettuate nell’arco di qualche minuto, ha fornito utili informazioni sui tempi d’inizializzazione, sulla ripetibilità delle misure nel breve periodo e sulla stabilità operativa di tale sistema.

Il vantaggio di ripetere le sessioni in momenti diversi dell’anno è stato, sicuramente, quello di poter trarre delle conclusioni attendibili sulla reale ripetibilità delle misure.

Per analizzare le eventuali differenze di comportamento fra i vari protocolli di trasmissione dati utilizzati si è scelto di operare principalmente in RTCM 2.3 (type 20/21) nelle prime due campagne e, nella terza, in RTCM 3.0.

La sintesi delle tre campagne è riportata in Tabella 1

<i>Periodo</i>	<i>Numero di vertici misurati</i>	<i>Numero di ripetizioni per punto</i>	<i>Protocollo</i>	<i>Totale misure</i>
Luglio-Settembre	48 (di cui 4 IGMI)	2/3	RTCM2.3 RTCM3.0 (9 misure)	109
Ottobre-Novembre	40	3	RTCM2.3	125
Dicembre	29	3	RTCM3	83

**Tabella 5.1 – Parametri caratterizzanti le tre ripetizioni in tempo reale della rete GPS7 FC.**

La terza campagna di misura è stata eseguita nel periodo invernale, questo giustifica l’inferiore consistenza del test che è stata causata dalle cattive condizioni meteorologiche che causa neve hanno impedito di raggiungere molti dei vertici localizzati nella zona appenninica. In questa campagna di misura si è deciso di verificare il comportamento del sistema con l’utilizzo del nuovo protocollo di trasmissione RTCM versione 3.0 e metodologia MAX (si è deciso comunque, qualora non fosse stato possibile ottenere una soluzione ad ambiguità fissata, di provare ad utilizzare anche il protocollo RTCM v.2.3 già testato in modalità i-MAX), in modo da rendere possibile un confronto non solo sulle coordinate dei vertici, ma anche sulle possibili differenze con il protocollo RTCM2.3 precedentemente utilizzato.

Alla luce delle tre ripetizioni eseguite è possibile trarre considerazioni di varia natura sui vari aspetti che si volevano analizzare e riportate precedentemente. Nell’analisi dei risultati è importante premettere come il sistema sia fondamentalmente stabile ed affidabile, anche se in alcuni casi abbia fornito risultati non in linea con le precisioni attese.



La sperimentazione condotta ha consentito di allargare lo spettro di conoscenza legato a tali sistemi di posizionamento in tempo reale ed è stato possibile dunque individuare elementi significativi che possono incidere in modo più evidente sul funzionamento di tali sistemi.

Prima di mostrare le cifre di sintesi della sperimentazione, che costituiscono un aspetto oggettivo dell'esperienza, è comunque utile riportare alcune considerazioni:

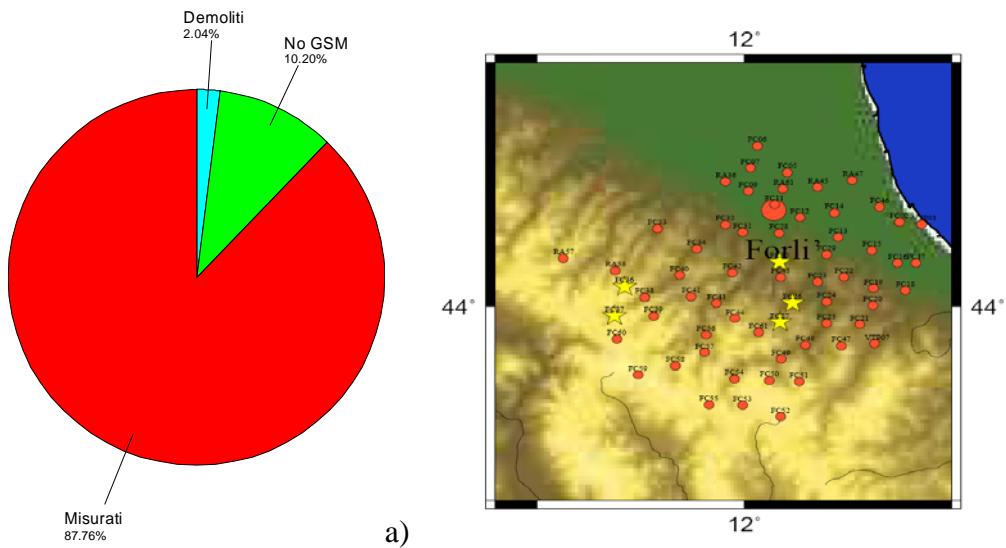
1) la rete utilizzata è di natura sperimentale, non ridondante e di caratteristiche geometriche (interdistanza tra le stazioni) quasi al limite del consentito.

2) In alcuni siti il tempo impiegato per poter eseguire il posizionamento in tempo reale è stato a volte superiore alla diecina di minuti. Tale condizione si è verificata o per uno scarso numero di satelliti comuni (zone montuose) o per un'instabilità nel fissaggio delle ambiguità di fase iniziali nel software di controllo (che attualmente sembra essere stata risolta).

Ciò premesso i dati analizzati non considerano tali aspetti e dunque i problemi riscontrati nel corso della sperimentazione sono stati principalmente legati alla comunicazione “operatore-centro di calcolo”, riconducibili principalmente alla mancanza di segnale GSM.

Si ricorda anche che tali apparati non possono prescindere da sistemi di comunicazione mobile che costituiscono un vincolo per chi opera sul territorio. La copertura di telefonia mobile è differente da operatore ad operatore e tende a coprire zone popolate, anche se in un prossimo futuro è pensabile che possa esserci un sostanziale allineamento ed una copertura sempre più soddisfacente. I problemi di copertura telefonica riguardano principalmente zone montuose dove le attività di rilievo è pensabile che siano statisticamente meno frequenti.

La figura 5 riporta la percentuale di vertici misurati rispetto a quelli misurabili nelle tre campagne, uno dei vertici, misurato nella prima campagna (FC34) è stato spostato prima dell'esecuzione della seconda campagna, per cui non è stato possibile ripetere la misura.



**Figura 5.10 - Percentuale vertici misurati a) e ubicazione dei vertici dove non vi era copertura telefonica b).**

Come si vede dalla figura 3 (a), per circa il 10% dei vertici, non è stato possibile eseguire il posizionamento a causa della mancanza di copertura di rete GSM (l’operatore scelto è stato WIND), questo è accaduto quasi esclusivamente in zone di montagna (Figura 3 (b)), ma rimane comunque molto importante notare che, almeno con alcuni operatori telefonici, alcune zone della rete non possono essere misurate, questo è un aspetto che dovrebbe essere sempre tenuto in considerazione al momento della progettazione di un rilievo NRTK.

Durante la sperimentazione si scelto di annotare per ogni rilievo il tempo necessario per giungere alla determinazione dell’ambiguità di fase iniziale (soluzione Fixed), al fine di comprendere l’utilizzabilità del sistema. In tabella 4 si riporta un riepilogo relativo a tale parametro.

Periodo	Numero di vertici misurati	Protocollo	Tempo per inizializzare il sistema		
			$t < 1 \text{ min}$	$1 \text{ min.} < t < 3 \text{ min.}$	$t > 3 \text{ min}$
Luglio-Settembre 2005 (totale di 7 giorni)	48 (di cui 4 IGMI)	RTCM2.3	87%	11%	2%
Ottobre-Novembre (4 giorni)	40	RTCM2.3	90%	10%	
Dicembre	29	RTCM3	16%	70%	14%

**Tabella 5.2 - Tabella relativa ai tempi di inizializzazione durante le tre ripetizioni.**

Come è evidente dalla tabella 2 i tempi di inizializzazione risultano essere relativamente bassi e indipendenti dalla posizione del rover all'interno della rete.

L'utilizzo del protocollo di trasmissione RTCM2.3 per le prime due ripetizioni e del protocollo RTCM3.0 per la terza non consente un'analisi esaustiva in merito al funzionamento del sistema nelle due modalità.

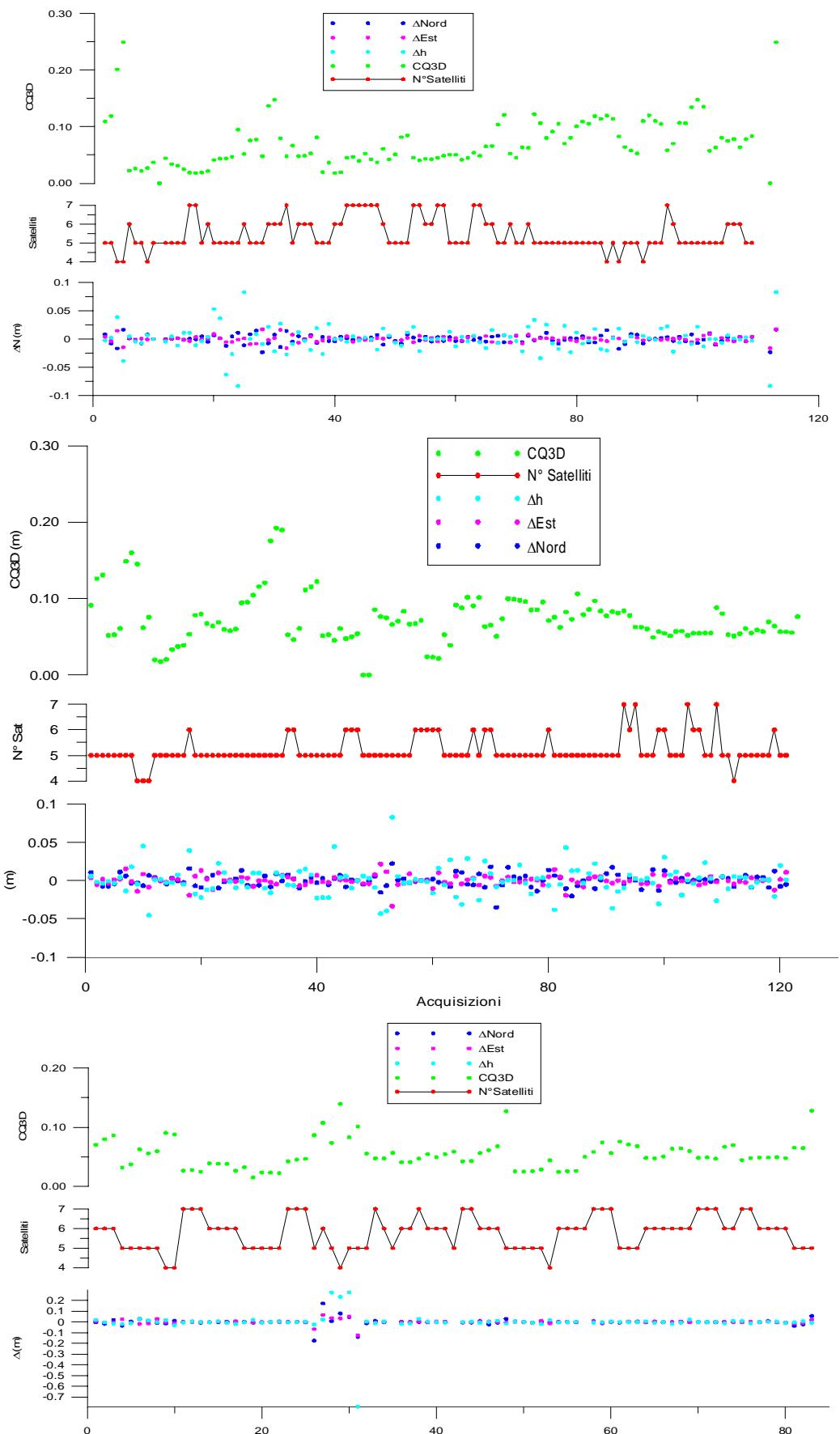
Ciò nonostante dai test svolti si evince come generalmente i tempi per la risoluzione dell'ambiguità sembrino essere leggermente superiori utilizzando il protocollo RTCM3.0 rispetto al protocollo RTCM2.3. Tale fatto sembra, però, essere in disaccordo con le caratteristiche principali del nuovo standard che dovrebbero ottimizzare (riducendo il carico trasmissivo) le informazioni da raccogliere e lasciare il calcolo dei parametri al ricevitore rover.

Per quanto concerne invece la qualità del posizionamento non sembrano emergere differenze nell'uso di un protocollo rispetto all'altro. In merito a tale aspetto è però importante sottolineare come l'utilizzo di ricevitori della stessa casa produttrice del software di gestione delle stazioni permanenti fa supporre che sia sui ricevitori sia sul software siano implementati i medesimi algoritmi per il calcolo delle correzioni da apportare alle osservazioni. In una fase successiva sarà dunque interessante verificare l'utilizzo del protocollo RTCM3.0 anche su altri ricevitori.

### **5.3.3 Dispersione relativa tra le soluzioni nelle tre ripetizioni**

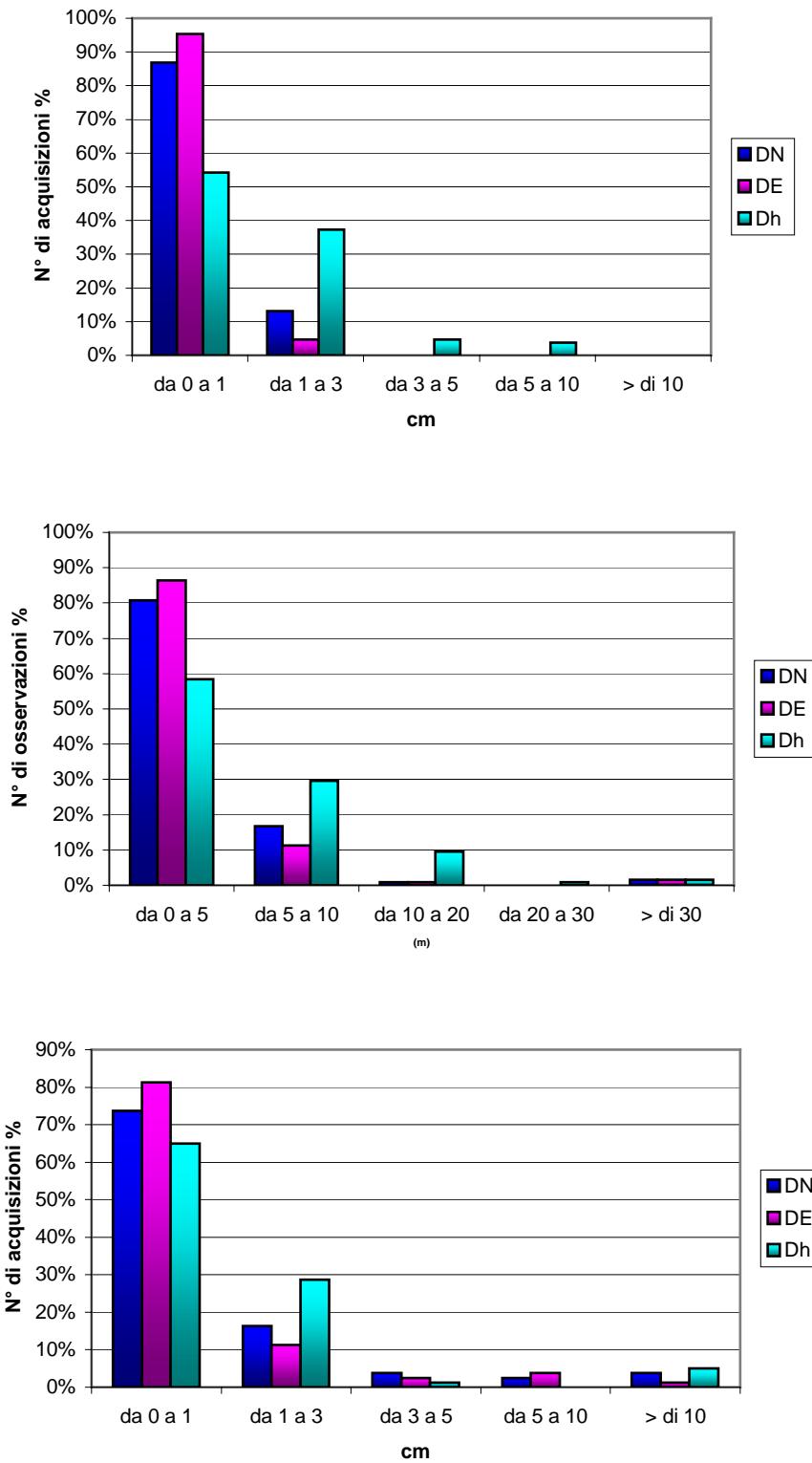
I risultati ottenuti nelle tre campagne sono mostrati in figura 3 dove per ciascuna ripetizione viene riportata la dispersione relativa tra le soluzioni in relazione con alcuni parametri caratteristici del posizionamento come il CQ3D e il numero di satelliti disponibili.

Dalla Figura 5.17 si può osservare come la dispersione dei risultati non sia strettamente correlata ai parametri che solitamente possono essere indicatori di bontà della soluzione.



**Figura 5.171 - Andamento delle differenze dalle medie in relazione con il CQ3D e con il numero dei satelliti nelle tre campagne di misura**

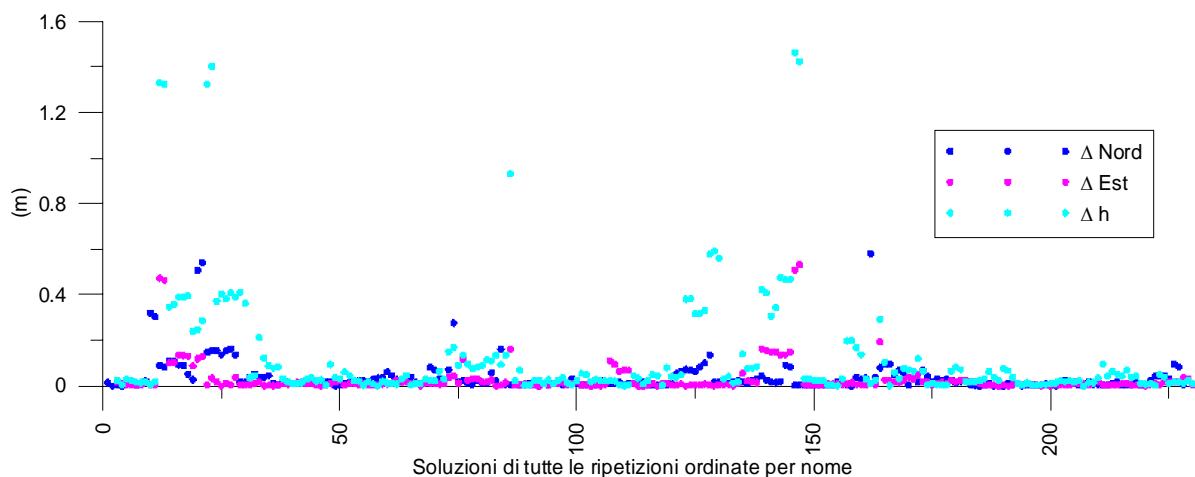




**Figura 5.12 – Istogrammi delle differenze dalle medie delle acquisizioni ottenute per ciascuna campagna di misura**

Dall’analisi del grafici precedenti denota una sostanziale stabilità delle coordinate fornite dalle diverse acquisizioni, le differenze, infatti, sono contenute fra entro i pochi centimetri in planimetria, leggermente peggiori i risultati ottenuti in altimetria.

La figura 5.13 riporta la dispersione di ogni singola misura dal valore medio ottenuto con tutte le ripetizioni disponibili; nelle ascisse compaiono in sequenza le soluzioni ordinate per punto. E’ importante notare come l’effetto di aver mediato su tutte le soluzioni disponibili può spostare significativamente la media, quando ad esempio è presente qualche errore grossolano non rimosso in fase di analisi. Di conseguenza le dispersioni mostrate sono tendenzialmente più grandi di quelle reali proprio per tale effetto. E’ altresì vero che, essendo il test per ogni singolo punto non particolarmente esteso (al massimo esistono 9 ripetizioni del punto) i normali criteri di rigetto di errori grossolani non sono stati applicati. Dal grafico è evidente una sostanziale stabilità nelle soluzioni planimetriche con qualche problema in più per la componente in quota.



**Figura 5.13 - Grafico della dispersione di ciascuna soluzione delle tre ripetizioni dal valore medio tra tutte le soluzioni.**

Il set di dati a disposizione presenta delle acquisizioni sicuramente affette da incertezza grossolana, per eliminare queste ultime si è deciso di escludere quelle eccedenti il limite di  $1,5 \sigma$ , tale limite ci sembra essere il più appropriato vista la relativa esiguità del campione di misure registrate su ogni vertice.

Questo tipo di analisi, applicato sia alla planimetria che all’altimetria, ci permette di identificare 14 misure ed eliminarle dal set totale dei dati prima del confronto con le

coordinate statiche disponibili.

### **5.3.4 Confronto con le coordinate ottenute dal rilievo statico (Consistenza Esterna)**

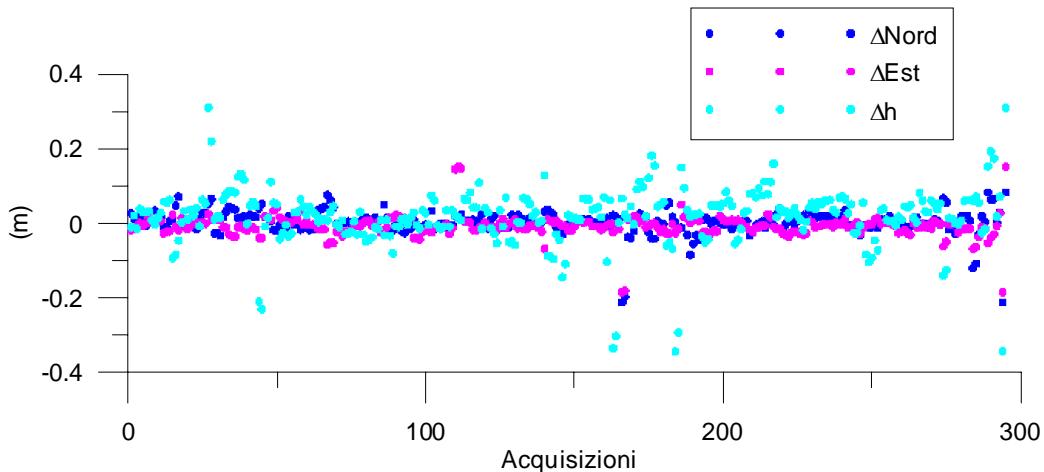
Come sottolineato in precedenza, la disponibilità di coordinate derivate da rilievo statico dei vertici interessati dalla sperimentazione ci permette di analizzare in termini di accuratezza le potenzialità delle reti NRTK e laddove si fossero riscontrati alcuni problemi di incongruenza tra diverse soluzioni, individuare quali tra esse fossero certamente affette da incertezza grossolana.

Una volta eliminati dal dataset i vertici affetti da incertezza grossolana, come spiegato nel paragrafo precedente, e confrontando i valori rimanenti con le coordinate ottenute dalla compensazione del rilievo statico si ottengono nuove statistiche (tabella 5.3).

<i>Parametri statistici</i>	<i>DN (m)</i>	<i>DE (m)</i>	<i>Dh (m)</i>
Media	0.004	0.008	0.025
Deviazione standard	0.030	0.030	0.07
Varianza campionaria	0.001	0.001	0.004
Minimo	-0.210	-0.180	-0.340
Massimo	0.080	0.150	0.310

**Tabella 5.3 – Nuove statistiche relative agli scarti dal valore compensato per ogni componente dopo aver rimosso le soluzioni affette da incertezza grossolana (dataset 287 posizioni)**

In figura 5.13 si mostrano gli scarti nelle tre componenti per ciascuna posizione una volta eliminate le osservazioni affette da incertezza grossolana.



**Figura 5.13 - Scarti nelle tre componenti dal valore compensato per ciascuna posizione (senza incertezze di natura grossolana)**

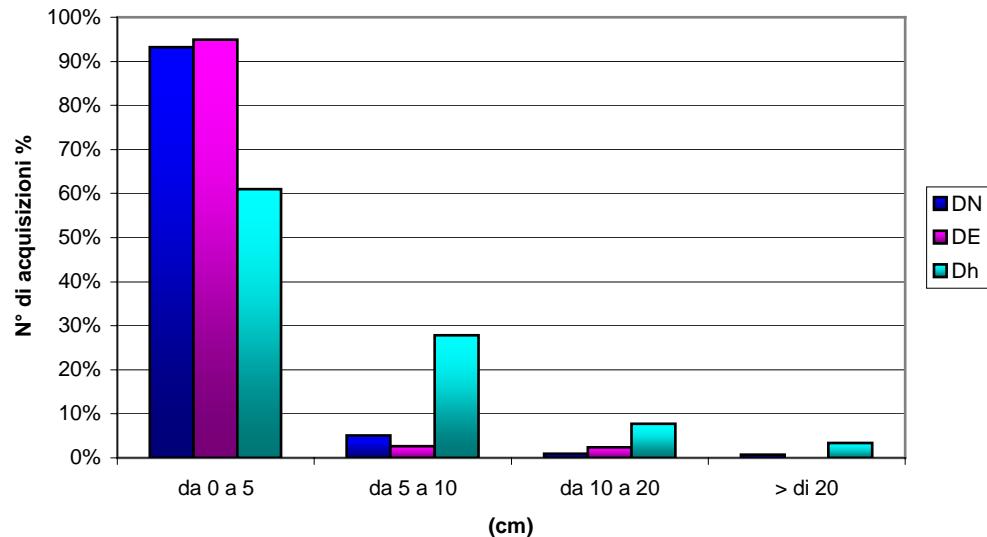
In Tabella 4 si riporta una analisi più dettagliata con classi di variabilità come in tabella 6.

Campione complessivo di 287 misure suddivise in tre campagne.	Numero complessivo	Percentuale
con scarti tra i oltre i 20cm dal valore statico in planimetria:	3	1.02%
con scarti tra i oltre i 20cm dal valore statico in quota:	10	3.39%
con scarti tra i 10cm ed i 20cm dal valore statico in planimetria:	6	2.03%
con scarti tra i 10cm ed i 20cm dal valore statico in quota:	23	7.80%
con scarti tra i 5cm ed i 10cm dal valore statico in planimetria:	23	7.80%
con scarti tra i 5cm ed i 10cm dal valore statico in quota:	82	27.80%
con scarti tra i inferiori a 5cm dal valore statico in planimetria:	263	89.15%
con scarti tra i inferiori a 5cm dal valore statico in altimetria:	180	61.02%

**Tabella 5.4 - Numero complessivo e relative percentuali degli scarti dal valore compensato suddivise in classi e dividendo l'aspetto planimetrico dalla quota. Campione depurato dalle soluzioni affette da incertezza grossolana.**

I risultati derivanti dal confronto denotano una buona concordanza fra le due tecniche di rilievo almeno in planimetria, per la quota, infatti, sebbene la media degli scarti sia di circa 2 cm, osserviamo una deviazione standard circa doppia rispetto a quella planimetrica.

Tale aspetto è evidenziato ulteriormente dall'istogramma in figura 9:



**Figura 5.14 - Confronto con le coordinate statiche**

### 5.3.5 Problemi riscontrati durante le misure e nella fase di analisi dati.

Nel corso delle sperimentazioni prima, e nella fase di analisi dati poi, sono emerse alcune problematiche di varia natura che tuttora sono da comprendere completamente.

Analizzando i dati è emerso che su alcuni dei vertici misurati si sono riscontrate differenze fra le acquisizioni superiori ai 30cm, questo è accaduto sia su due acquisizioni successive dello stesso vertice all'interno della stessa campagna di misura, sia ristazionando i vertici in un tempo successivo, mettendo così in risalto due tipologie di problematiche distinte. Si vuole sottolineare che, nonostante si sia utilizzata una palina di altezza 2m tenuta fissa da un tripode a pinza, tale errore non può essere imputato ad un cattivo stazionamento. In tabella 5 si riportano le acquisizioni relative al vertice FC39 effettuate durante la seconda campagna di misure e a circa 30 minuti l'una dall'altra.

Label	N UTM	E UTM	h ell	dn	de	dh	Cq3d	Cq2d	Epochs	PDOP	Sat	Data
FC39	4874771,5		521,631									7/11/2005
B1		1241921,70		50,62	0,22	0,40	0,07	0,03	31	2,2	5	11.44
FC39	4874770,9		521,235									7/11/2005
B2		0241921,48		4			0,05	0,03	35	1,2	7	12.14

**Tabella 5 - Parametri delle due acquisizioni**

E' da notare che tali differenze non sono immediatamente correlabili né ai parametri di qualità riportati dal ricevitore (CQ3D e CQ2D) né al numero dei satelliti poiché con gli stessi valori indicati altre misure hanno dato risultati molto più concordanti. Su due vertici della rete (FC05 e FC06) le acquisizioni registrate hanno una buona ripetibilità nel breve periodo, ma sono fortemente spostate nel lungo periodo, tale aspetto è reso evidente dal riassunto delle acquisizioni effettuate su tali vertici riportato in tabella 6.

Campagna	Label	N UTM	E UTM	h ell	DN	DE	Dh	Cq3d	Cq2d	PDOP	Sat	Data
1	FC05 1	4906543,47	268933,78	53,48	0,42	0,60	-1,72	0,11	0,08	2,2	5	26/07/2005 9.52
	FC05 2	4906543,45	268933,77	53,49				0,12	0,08	2,2	5	26/07/2005 9.55
2	FC05 B1	4906543,04	268933,17	55,20				0,05	0,05	2,7	5	08/11/2005 9.08
	FC05 B2	4906543,04	268933,18	55,20				0,05	0,05	2,8	5	08/11/2005 9.10
	FC05 B3	4906543,06	268933,18	55,21				0,06	0,06	2,9	5	08/11/2005 9.11
1	FC06 1	4912799,06	263345,40	57,76	0,68	-0,02	-1,75	0,20	0,14	4,9	4	26/07/2005 10.33
	FC06 2	4912799,09	263345,37	57,68				0,25	0,17	5,3	4	26/07/2005 10.36
2	FC06 B1	4912798,41	263345,42	59,46				0,15	0,15	8,3	5	08/11/2005 10.04
	FC06 B2	4912798,40	263345,40	59,49				0,16	0,16	8,6	5	08/11/2005 10.06
	FC06 B3	4912798,40	263345,39	59,47				0,15	0,14	8,7	4	08/11/2005 10.09



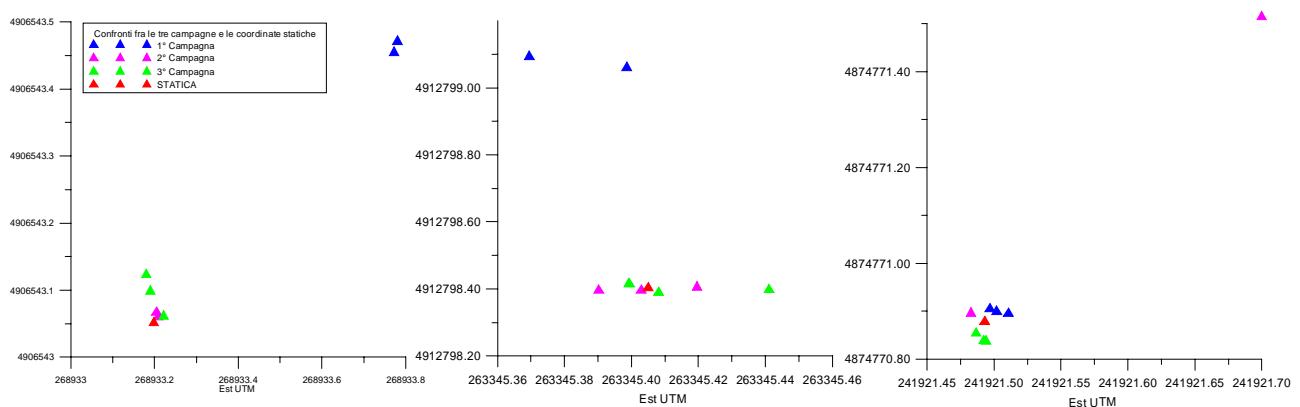
**Tabella 6 - Parametri delle due acquisizioni dei vertici FC05 e FC06**

(NB le differenze in Nord, Est e quota sono riferite alle medie delle rispettive acquisizioni in ogni campagna)

Queste differenze però non sono state in nessun modo anticipate dall’analisi dei dati relativi alla singola campagna; infatti, richiamando i valori trovati sui due vertici, si osserva una differenza massima fra la prima e la seconda acquisizione, all’interno della prima campagna, di 2 cm in planimetria e 4 cm in quota e, all’interno della seconda campagna, di 2 cm sia in quota che in planimetria. Questo evidenzia come, non si possa escludere che, se anche la ripetibilità nel breve periodo risulti ottimale, sul lungo periodo ci possano essere delle situazioni di incongruenza fra le misure di non facile interpretazione.

Confrontando le soluzioni ottenute in tempo reale dalle tre ripetizioni con le soluzioni ottenute dalla compensazione statica, solo per i vertici “critici” in planimetria riportati in precedenza si ha la possibilità di identificare, con la massima precisione possibile, le misure affette da errori grossolani.

I grafici in figura 10 riportano, per i vertici FC05, FC06 e FC39 il riassunto delle 3 campagne di misura e il confronto con le coordinate statiche.



**Figura 18 - Riassunto delle acquisizioni Vertici FC05, FC06 e FC39**

Le sperimentazioni eseguite hanno permesso di valutare vari aspetti sulle prestazioni del posizionamento di precisione in tempo reale basato su reti di stazioni permanenti.

Tali sistemi possono essere molto utili soprattutto per applicazioni di carattere tecnico. Le sperimentazioni eseguite rendono evidente una buona stabilità dei risultati sia in termini di ripetibilità nell’immediato, fra due acquisizioni successive, che di rioccupazione del punto in momenti successivi (il tempo intercorso fra due campagne successive è stato all’incirca dell’ordine dei 30-50 giorni).

Per la planimetria si sono riscontrati i risultati migliori sia in termini di ripetibilità, a breve e lungo termine, sia in termini di confronto con le coordinate statiche a disposizione con le quali si sono osservate delle discordanze inferiori ai 5 cm in più del 89% dei casi.

L'altimetria si è rivelata, in alcuni casi, il vero “tallone d'Achille” per questi sistemi, la media delle differenze dai valori delle coordinate statiche è di 2,5 cm, valore ottenuto dopo aver eliminato dal dataset completo le misure ritenute errate; confrontando invece le misure su un vertice con la media delle stesse si sono verificate, comunque per sole 7 acquisizioni, differenze dell'ordine di 1,5 m.

In pochi casi, anche in planimetria, si sono riscontrate soluzioni distanti fra loro, sia contestualmente alla stessa campagna di misura che fra due campagne differenti, come illustrato dalla figura 10. Tali fluttuazioni, spesso non identificabili tramite l'analisi dei parametri al contorno (n° di satelliti, DOP, CQ2D, CQ3D, ecc...) possono dare luogo a degli errori grossolani di difficile individuazione.

Sebbene tali problemi si siano verificati su un esiguo numero di vertici dovrebbero, comunque, essere identificabili tramite indici o parametri che possano allertare l'operatore durante le operazioni di misura, spesso però, in campagna durante le misure, questo non è possibile poiché i parametri a disposizione dell'operatore, almeno relativamente alla strumentazione utilizzata, non sono sufficienti a identificare una misura come potenzialmente sbagliata.

Fatte queste osservazioni ci sembra necessario precisare che la ripetizione delle misure, sia nel breve che nel lungo periodo, si rende necessaria per non rischiare di collezionare valori non corretti, la procedura seguita in questa sperimentazione, infatti, permette di concludere che due campagne di misura, eseguite in momenti differenti, sono sufficienti all'individuazione dei vertici “critici” che devono essere rimisurati nel corso di una eventuale terza ripetizione.

Il corretto funzionamento dell'intero apparato non può prescindere dalla piena funzionalità di ogni singola componente, problemi di costellazione, comunicazione in senso lato, ecc. possono impedire il posizionamento in tempo reale o, ancor peggio, fornire risultati non corretti.

Nell'arco della terza campagna è stato usato principalmente il protocollo di trasmissione RTCM3.0, dal confronto sulle prestazioni con il protocollo RTCM2.3 non sono emerse particolari differenze, in termini di soluzioni ottenute, fra i due standard; l'RTCM3.0 è sembrato, in alcuni casi, più lento nel tempo necessario per raggiungere una soluzione ad

ambiguità di fase fissata, ma i dati raccolti non sono ancora sufficienti per trarre delle conclusioni definitive.

#### **5.4. Il rilievo NRTK in continuo**

Sebbene tramite le sperimentazioni presentate nei paragrafi precedenti sia stato possibile definire alcune prestazioni in termini di precisione, accuratezza e ripetibilità, ci preme presentare una differente sperimentazione che è stata condotta contestualmente alle operazioni di misura in tempo reale della rete di raffittimento di FC.

I dati raccolti, benché molto numerosi, hanno la caratteristica di essere stati acquisiti per intervalli di tempo limitato, 30 secondi, e le campagne di misura sono state effettuate con circa due mesi di intervallo fra due consecutive.

Sarebbe interessante poter disporre, per incrociare i risultati con quelli già ottenuti, una serie di memorizzazioni di un vertice che siano continue nel tempo, questo per valutare nel dettaglio la dipendenza della qualità del rilievo NRTK dai parametri “al contorno” del rilievo stesso, quali il n° dei satelliti, il DOP, etc.

Si è perciò ritenuto utile abbinare alla sperimentazione in corso alcune misure effettuate seguendo le successive linee guida:

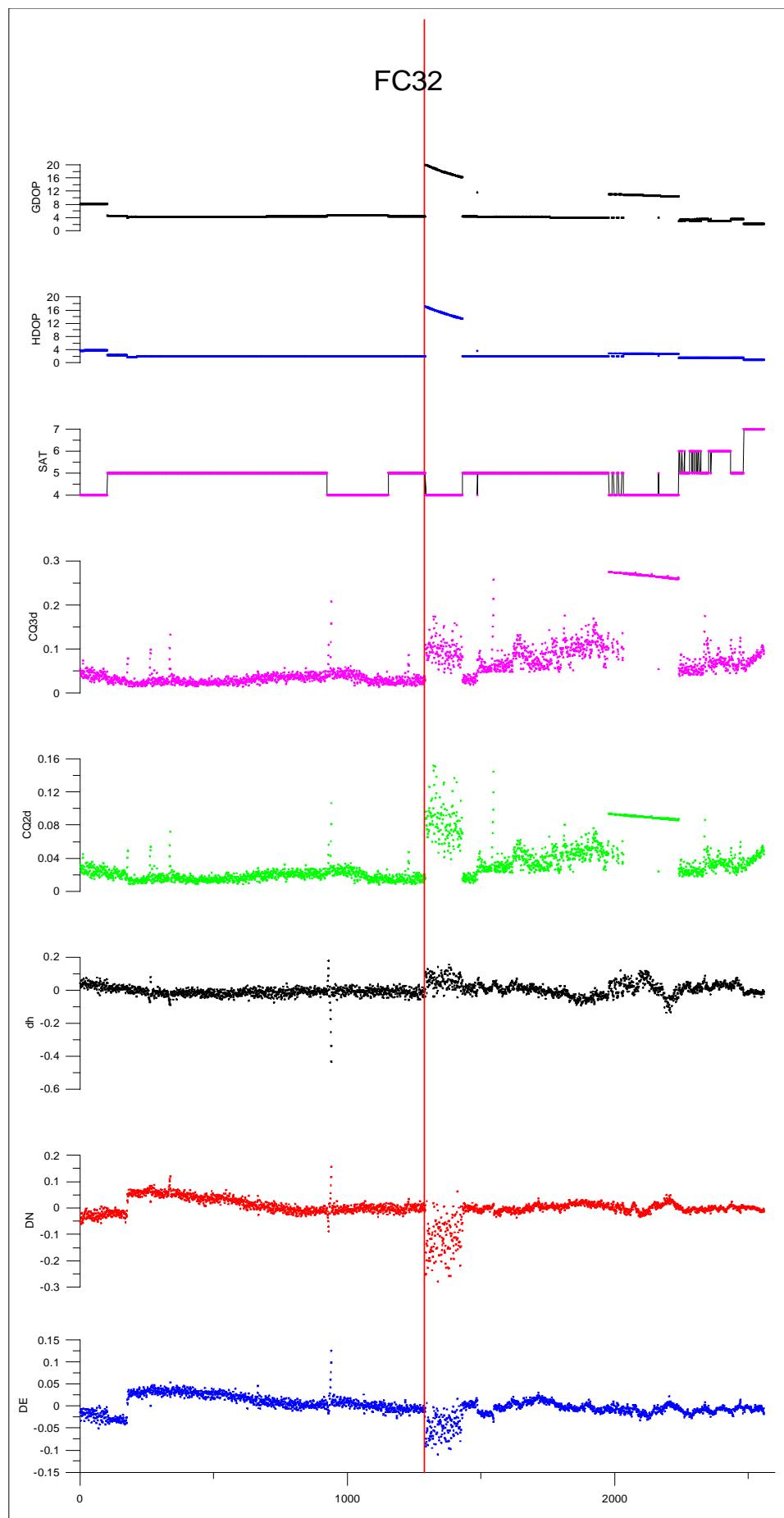
- Osservazione prolungata sullo stesso vertice (circa 2 ore)
- Memorizzazione del punto ogni secondo
- Posizionamento stabile tramite treppiede
- Connessione con il CC continua senza reinizializzazione

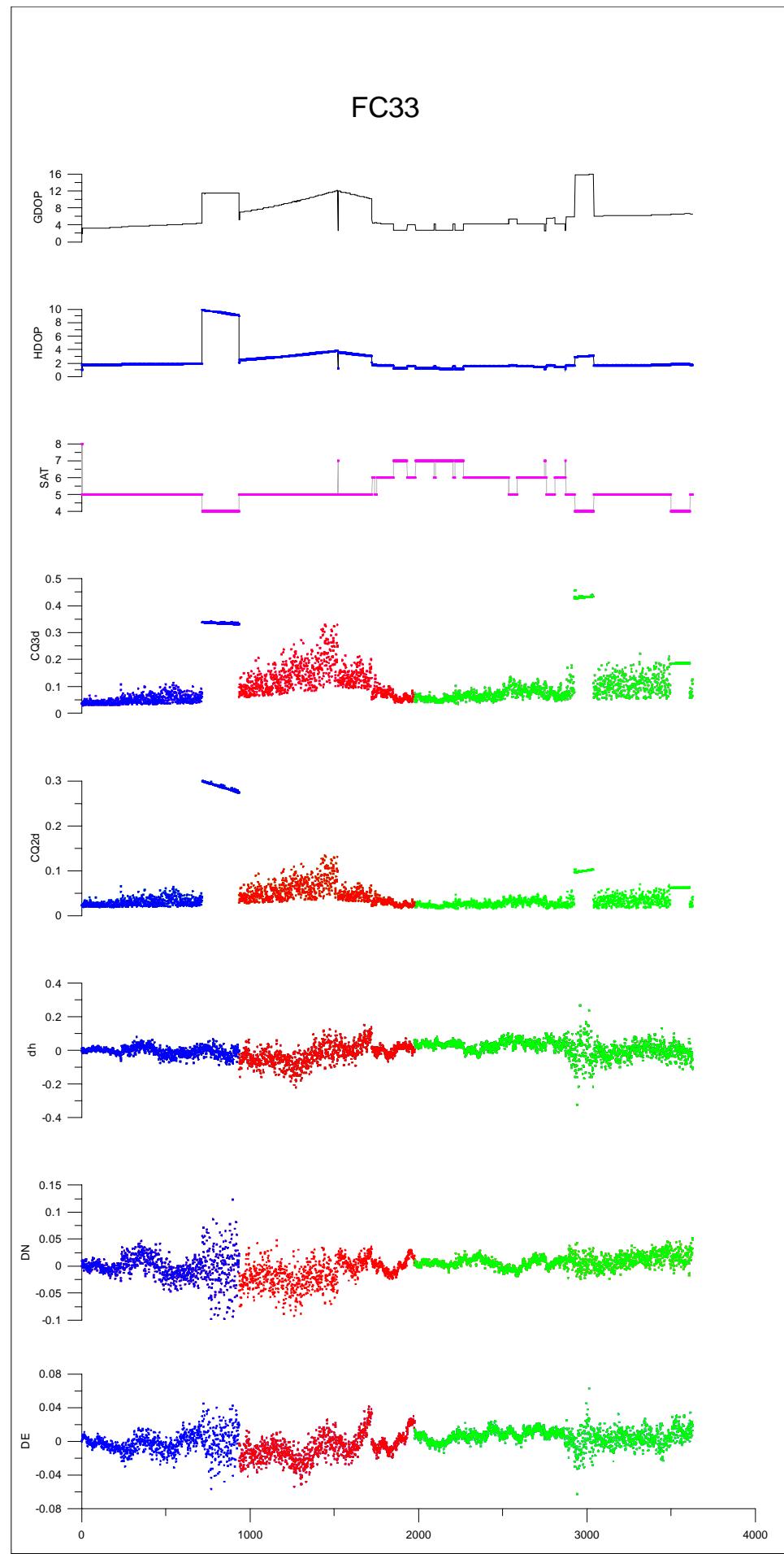
I vertici oggetto delle sperimentazioni sono stati scelti tra quelli già misurati con le modalità riportate nel paragrafo precedente, si è scelto; in questa prima fase di effettuare le esperienze solo su tre vertici (FC32, FC33 e FC40).

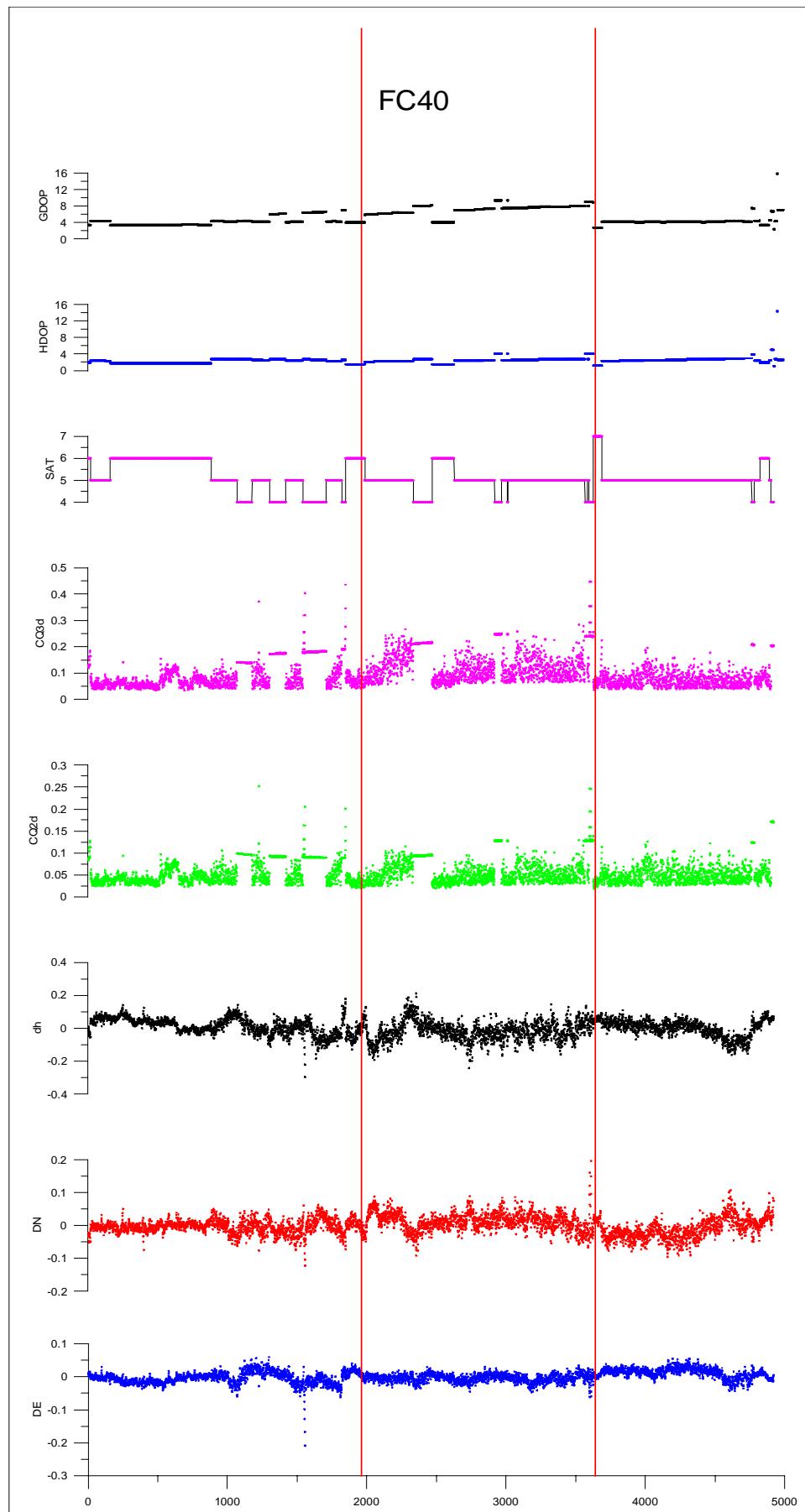
Nelle figure seguenti vengono riportati i dati memorizzati sui vertici, si è scelto di riportare solo le soluzioni ad ambiguità di fase fissata poiché, per le analisi e le valutazioni che ci si prefigge di eseguire, le soluzioni “float” non garantiscono un grado di affidabilità e precisione sufficienti. , in ascissa sono riportate le progressive delle acquisizioni, in ordinata sono riportate le differenze con la coordinata di monografia, in termini di N E h, il parametro CQ (disponibile in tempo reale sul ricevitore) il DOP e il n° di satelliti disponibili.









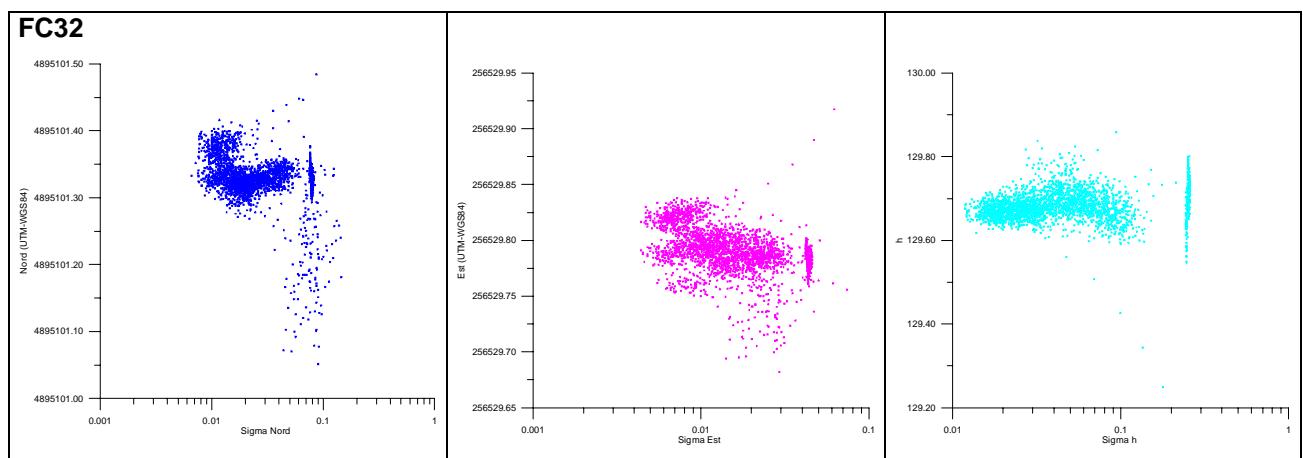


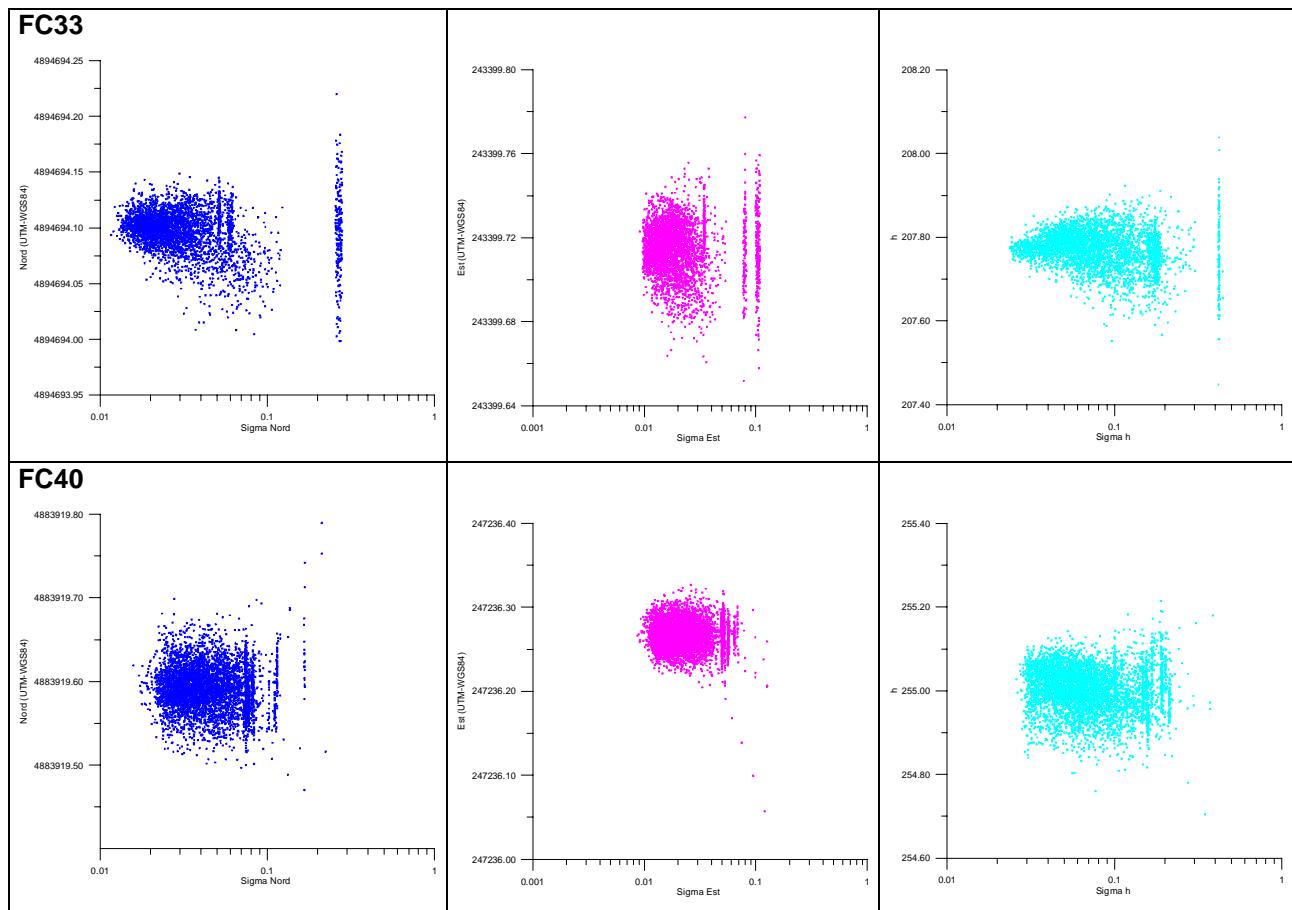
**Figura 5.19 - Andamento delle differenze in relazione al CQ, DOP e al n° dei satelliti**



La prima osservazione che possiamo trarre osservando i grafici precedenti è che la precisione media delle memorizzazioni effettuate è più che buona poiché si mantiene, per tutti i vertici analizzati, intorno a più o meno 5 cm per la planimetria, valori di poco superiori si riscontrano invece per l'altimetria. Si osservano, inoltre, alcune situazioni in cui la precisione degrada nettamente, portando in alcuni casi le differenze di coordinate anche a valori superiori a 30 cm; sebbene per molte di queste situazioni si può trovare una stretta relazione con il n° di satelliti o con il DOP, per alcune il decadimento di prestazioni non è, almeno direttamente, relazionabile con nessuno dei parametri riportati; i valori riportati sul grafico sono solo di tipo *fixed* e relativi a due ore di registrazione continua, queste considerazioni ci permettono di dire che una percentuale piuttosto elevata delle memorizzazioni è di tipo *float* poiché si sono registrate misure fixed pari a circa 2600 nel primo caso, 3700 nel secondo e 5000 nel terzo, su un totale di 7200 memorizzazioni disponibili (2 h). Questo ci permette di rilevare che, una volta raggiunta la soluzione *fixed*, questa non sia stabile per lunghi periodi di tempo, pur occupando sempre lo stesso punto, i motivi della perdita della soluzione ad ambiguità di fase fissata non sono ancora stati analizzati poiché si ritiene necessario progettare delle campagne di misura ad hoc per tali indagini.

A titolo di completezza dell'informazione riportiamo, nei tre grafici seguenti, la dispersione in Nord-Est e quota delle registrazioni effettuate sui 3 vertici oggetto della sperimentazione in relazione alle sigma nelle 3 coordinate riportate in base logaritmica.





**Tabella 5.6 - Dispersione delle componenti in base al valore della sigma per ciascuna componente**

## 5.5. Il rilievo cinematico in tempo reale

Un aspetto molto interessante legato al posizionamento mediante NRTK è la navigazione terrestre di precisione che consente alcune applicazioni tecniche dalle enormi potenzialità quali ad esempio il Mobile Mapping System che, come noto, si basa sull’uso di veicoli equipaggiati con molteplici sensori e posizionati tramite sistemi complessi che comprendono anche IMU e apparati di navigazione satellitare.

Negli ultimi mesi dell’anno 2006, in collaborazione con la ditta SITECO, sono state condotte alcuni esperimenti volti alla comprensione del posizionamento in modalità cinematica all’interno della rete NRTK del DISTART, le esperienze sono state affrontate alloggiando su un veicolo già attrezzato per rilievi ad alto rendimento in modalità cinematica due ricevitori GPS collegati in tempo reale con la rete e percorrendo alcune traiettorie test.

Il veicolo ad alto rendimento (denominato VARSIS) è equipaggiato con la seguente strumentazione:

- Sistema Inerziale APPLANIX POS LV 220
- Due ricevitori GPS doppia frequenza
- Odometro

Il veicolo viene utilizzato da circa un anno per il rilievo della viabilità, urbana ed extraurbana, per le ottemperanze del Catasto Strade a cui gli enti proprietari di strade, come ANAS e Società Concessionarie per la autostrade di interesse nazionale, Province e Regioni devono attenersi come previsto dal DLgs 30.4.92 regolamentato dal DM 1 giugno 2001.

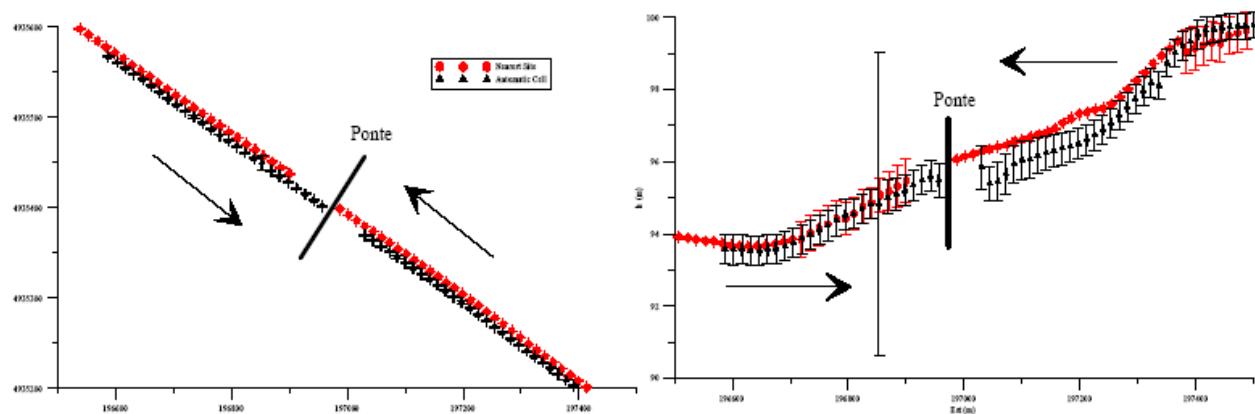
Per gli esperimenti sono state collocate alle estremità di una sbarra a distanza nota con precisione millimetrica due antenne collegate a due GPS della stessa marca tenuti in acquisizione contemporanea e operanti in due modalità differenti, supportate dal software Spider di Leica Geosystem. Le modalità utilizzate sono state:

- Max RTCM3 (cella automatica) in modalità NTRIP
- Nearest site RTCM2.3 sempre via NRTIP

Sono stati eseguiti nell'assetto finale 4 percorsi in andata e ritorno di circa 100 km su viabilità ordinaria, con tutti i problemi di copertura che ne derivano. I dati risultanti sono tuttora in elaborazione. Tali sperimentazioni non sono necessariamente finalizzate al posizionamento esclusivamente in tempo reale, ed un'analisi più approfondita verrà eseguita comparando la soluzione in tempo reale con quelle ottenute da prodotti più sofisticati che implementano sensori inerziali ad odometri e gli altri ricevitori satellitari in dotazione.

I risultati ottenuti sono stati poi confrontati con le traiettorie ottenute in post-elaborazione utilizzando differenti approcci dal più tradizionale cinematico differenziato al PPP. Il lavoro ancora in fase preliminare ha consentito comunque di verificare alcune difficoltà operative che si incontrano nell'utilizzo di reti per il posizionamento di precisione in tempo reale per rilievi condotti a sostenute velocità (50/60 km/h).





**Figura 5.20 – Esempio di profilo planimetrico e altimetrico ottenuto con rilievo NRTK in andata e ritorno**

Nella figura 5.20 è riportato un esempio tipico dei risultati ottenuti, relativo ad un breve tratto rettilineo; le due traiettorie in andata e ritorno sono interrotte in prossimità di un ponte e riprendono

dopo circa 20 sec (è un dato che si è ripetuto più volte). Nel grafico sono riportati gli intervalli di

confidenza delle coordinate al livello del 99%.

La sperimentazione presentata proseguirà nel corso del 2007, saranno testate le differenze fra cinematico post-processato in contesti sempre differenti di rilievo, nel futuro immediato sono previste delle sperimentazioni in provincia di Parma e Grosseto e, inoltre dei rilievi dedicati nella provincia di Bologna e Forlì-Cesena.

## **6**

### **Il confronto fra rilievo statico e NRTK**

## 6.1 Considerazioni sulle prestazioni

Dopo aver presentato e descritto, nelle parti precedenti del lavoro, le diverse metodologie di rilievo, statico e tempo reale con approccio di rete, sembra opportuno cercare di “fare il punto” e di arrivare ad un confronto diretto fra le due tecniche; un confronto, a questo punto, non avrebbe alcun senso se non in termini di “prestazioni”. Una precisazione appare necessaria, in questo contesto, con il termine prestazione si vuol intendere la capacità, dell’una o dell’altra tecnica, di rispondere alle esigenze di un determinato rilievo.

Non ci soffermeremo più del necessario, quindi, nella descrizione delle accuratezze delle due tecniche, anche perché, per quanto si possa cercare e sostenere, non sarà mai possibile definire un valore “vero” dell’accuratezza stessa, ma solo un suo ragionevole campo di variabilità, per tali motivi i valori riportati in Tabella 6.1 sono da considerarsi puramente indicativi.

Distanza/Tempo	1km	10km	50km	1000km
10minuti	1.5cm	2.5cm	5cm	nd
1ora	1.0cm	1.5cm	2cm	nd
24ore	0.3cm	0.5cm	<1cm	1.5cm
1settimana	0.1cm	0.1cm	0.3cm	<1cm

**Tabella 6.1 - Tempi e precisioni raggiungibili con il rilievo statico**

Per quanto riguarda il tempo reale, una rete di stazioni permanenti ci permette di posizionarci al suo interno con accuratezza, in condizioni medie, dell’ordine dei 10 cm, le correzioni vengono ricevute attraverso varie modalità, ma la loro creazione in tempo reale può essere riassunta attraverso i seguenti passaggi:

1. le SP acquisiscono le osservazioni grezze
2. le SP inviano le osservazioni grezze a un centro di controllo,
3. il CC utilizza le osservazioni grezze e la conoscenza delle coordinate delle SP per:
  4. stimare gli errori sulle singole SP,
  5. stimare i parametri della funzione di errore nell’area interessata.



**Figura 6.1 - Stima della funzione d'errore in una rete di stazioni permanenti**

Quello che dovremmo chiederci al momento dell’analisi e del confronto fra lo statico (e più in generale del rilievo post-processato) e il tempo reale (che sia o non sia di rete) è cosa ci aspettiamo dal rilievo stesso, quali sono gli aspetti che possiamo trascurare e quali no, quanto tempo vogliamo investire e che tipo di strumentazione abbiamo a disposizione.

Il rilievo in *post-processing*, tuttora, è quanto di più affidabile abbiamo per la misura di coordinate, ed infatti viene usato per applicazioni che hanno bisogno di precisioni molto spinte come, ad esempio, l’inquadramento delle reti di SP nei principali sistemi di riferimento e per il monitoraggio delle strutture o del territorio.

Tale tecnica ci permette di ottenere coordinate, attraverso una serie più o meno lunga di osservazioni, e la compensazione finale della rete ci fornisce, oltre alle coordinate, l’indeterminazione delle stesse; possiamo quindi dire che il rilievo statico ci fornisce un prodotto “garantito” nel senso più lato del termine.

Generalmente il rilievo in tempo reale ci fornisce le coordinate di un punto attraverso delle osservazioni in generale più ridotte come durata temporale, operativamente, visto l’alta produttività del metodo in termini di punti misurabili, non si superano i 10-15 secondi per la memorizzazione, inoltre, a garanzia delle coordinate ottenute, non possiamo avere altro che le sigma relative a tale limitato intervallo; questo ci permette sì di ottenere anche varie migliaia di punti in una giornata di rilievo, ma la loro qualità potrebbe non essere così affidabile.

Inoltre come abbiamo potuto sperimentare (cfr Capitolo 5) non sempre a valori accettabili dei parametri di qualità della misura in RT corrispondono valori di accuratezza soddisfacenti, questa situazione è più rara, se non addirittura assente, in un rilievo statico.

D’altra parte l’affinamento delle tecniche di posizionamento in tempo reale, di tipo differenziale e non, pensiamo alle accuratezze ottenibili e documentate del PPP, ha fatto nascere spontanea la domanda: Per quali applicazioni il rilievo statico può essere sostituito, con opportuni accorgimenti, dal rilievo in tempo reale e con quali garanzie?

Se fossimo costretti a rispondere limitatamente in termini di accuratezza, al risposta potrebbe essere: Per tutti quei rilievi con precisione non superiori a 10 cm, utilizzando opportuni accorgimenti nella ripetizione delle misure RT.

Ma la risposta in base alla mera “prestazione” in termini di accuratezza non ci appare completa, questa non tiene conto di molte condizioni accessorie come ad esempio il costo del rilievo, che in caso di rilievo in RT viene abbattuto rispetto allo statico, ma questo è un concetto già noto e assodato.

Una risposta provocatoria alla precedente domanda potrebbe essere strutturata in base alla affidabilità, ovviamente riferendoci ad un rilievo NRTK, della struttura di rete; che garanzie ci da, attualmente, una rete di stazioni permanenti nella conduzione di un rilievo?

Spesso anche le reti più “blasonate” non sono esenti da disservizi più o meno prolungati nel tempo, quindi dovremmo chiederci quanto possano incidere queste situazioni sulla scelta della tecnica di rilievo, una volta superati i limiti relativi alla strumentazione e al personale, un rilievo statico può essere condotto in qualsiasi momento, un rilievo NRTK può essere condotto solo quando il servizio è in funzione, una mancanza del funzionamento può, di fatto, eliminare il vantaggio in termini di tempo del rilievo in tempo reale.

Peggio potrebbe essere, al limite, un funzionamento anomalo della rete stessa che potrebbe pregiudicare i risultati del rilievo stesso fino a renderli addirittura inutilizzabili.

Se decidessimo di scegliere la nostra tecnica di rilievo in base a esigenze di Datum sicuramente non potremmo fare a meno di notare che le reti di SP sono inquadrati all’interno di un SR di ordine superiore, ma in termini di correzioni, definiscono un Datum, “personalizzato” e definito dalla posizione relativa delle SP stesse.

Il passaggio da questo sistema al sistema di interesse di un rilievo (R40, ED50 per scopi tecnici) non è un aspetto banale né, tantomeno, di univoca soluzione.

Se, almeno per quel che attiene alla condizione italiana, l’IGM ha rilasciato un SW che di fatto ha realizzato uno standard, riconosciuto da tutte le pubbliche amministrazioni, per il passaggio fra IGM95 (realizzazione italiana dell’ ETRF89)-ED50-Roma40, tale strumento non può essere applicato direttamente a rilievi in tempo reale condotti all’interno di una rete di SP; è necessario, infatti, un passaggio intermedio con cui “entrare” nel sistema IGM95, con conseguente, inevitabile, decadimento della precisione e accuratezza delle coordinate collezionate.

Il rilievo statico permette invece di entrare, in varie maniere, direttamente nel SR di interesse mediante l’inclusione nel rilievo stesso di vertici noti in quel sistema, rendendo così il prodotto finale immune da “affezioni” caratteristiche delle trasformazioni di datum.



Fondamentalmente, per concludere queste forse ridondanti elucubrazioni, possiamo pensare di affermare che, solo nel caso in cui una rete di SP sia concepita, strutturata e gestita come una struttura per la fornitura di un servizio, si potrà pensare a come e quando sostituire il rilievo statico, o in senso più ampio post-processato, con un rilievo in tempo reale con approccio di rete.

## **6.2 Il collegamento fra reti adiacenti**

In un territorio strutturato geograficamente come quello italiano appare “critica” la scelta della conformazione e dei confini delle reti di SP; purtroppo l’Italia ha una struttura orografica molto complessa, e gran parte del territorio è formato da montagne, per questo, nella realizzazione di reti di SP dobbiamo confrontarci con un territorio di estensione modesta con perimetro frastagliato, questo può condurre a scelte tecnicamente ed economicamente non ottimali, tale problema potrebbe essere superato solo con il coordinamento e lo scambio di dati fra reti contigue che sono tecnicamente possibili, ma di difficile impostazione e standardizzazione.

In generale, ci sentiamo di supporre che sia conveniente ottenere una buona disposizione di SP sul perimetro del territorio interessato, rispetto ad una maggiore concentrazione delle SP nelle zone centrali; questo perché le correzioni di rete parametrizzate utilizzando superfici polinomiali di basso ordine, quindi, affinché tali superfici riescano ad interpretare al meglio e a interpolare le correzioni stesse, devono essere basate su una geometria della rete robusta e regolare, onde evitare malcondizionamenti nella di stima delle correzioni.

Questo aspetto può portare, in alcune situazioni, a privilegiare la buona dislocazione delle SP rispetto alla minima distanza tra le stesse.

La collocazione delle SP dovrebbe essere intesa come una struttura reticolare, in cui più i bracci della struttura stessa sono di lunghezza uguale e gli angoli formati si avvicinano ai 60° più la struttura stessa è resistente e rigida.

La distanza massima, intesa come vero e proprio limite di funzionamento fra SP non può, ovviamente, essere determinata, ma molto probabilmente le distanze in gioco sarebbero superiori a quelle tra i principali capoluoghi provinciali italiani, comunque, dalle sperimentazioni osservate, la soluzione raccomandabile su base essenzialmente empirica è la scelta di una distanza tra SP sempre inferiore a 100 km.

In alcune condizioni, per esempio in territorio montuoso, conviene scegliere per prudenza distanze ancora inferiori (entro i 60 km). I potenziali problemi posti dal territorio montuoso sono essenzialmente tre:



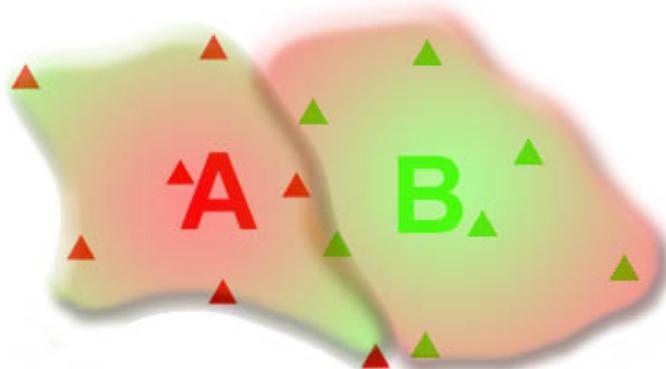
1. i modelli interpolativi che generano le correzioni di rete potrebbero non rispondere bene quando le stazioni permanenti sono a quote molto diverse;
2. sulle montagne non è sempre possibile, soprattutto in termini economici e funzionali, installare una SP che abbia il campo libero da ostruzioni;
3. in zone montuose esistono aree relativamente vaste prive di insediamenti adatti ad ospitare una SP.

Si deve poi tenere conto delle opportunità o convenienze particolari legate alle situazioni locali: sarà difficile, per esempio, non installare una SP nel capoluogo amministrativo della entità che promuove la realizzazione della rete. E’ essenziale ribadire che, in un’ottica di aumento della ridondanza generale della rete, tali opportunità o convenienze non pongono problema: è però essenziale che non indeboliscano la configurazione geometrica nelle restanti parti del territorio servito (Biagi 2006).

Quindi, sebbene esistano degli accorgimenti, “geometrici” per la costituzione di una rete di SP, questi, per i motivi elencati, non sono sempre percorribili.

Abbiamo detto che, almeno in Italia, le dimensioni tipiche di una rete di SP si avvicinano all’estensione regionale, questo anche tenendo conto delle entità amministrative delle reti stesse (Regioni, Università, ecc.).

Resta aperto il grosso problema dell’integrazione dei risultati ottenuti ai confini fra due reti adiacenti; per come sono definite le correzioni di rete non è lecito attendersi, per un rilievo che si articoli nella zona di confine fra due reti adiacenti, risultati identici utilizzando una o l’altra delle due reti; per garantire risultati coerenti le due (o più) reti, dovrebbero avere la possibilità (e la capacità) di scambiarsi reciprocamente i dati in modo da produrre un unico modello interpolativi.



**Figura 6.2 - Esempio di effetti di bordo nel modello dei correzione nel caso di due reti adiacenti A e B**

La difficoltà di un approccio come questo sta nella realizzazione stessa della comunicazione fra due enti differenti, la mancanza delle interconnessioni fra reti adiacenti dovrebbe essere risolta mediante una diffusione delle informazioni sulle reti stesse, spesso abbiamo avuto testimonianze di Comuni che non sanno dell'esistenza di una rete di SP gestita dalla propria Regione, figuriamoci cosa potrebbe accadere quando ci si debba estendere alla Regione confinante.

Le proposte per la soluzione di queste “particolarità” possono essere molte, ma tutte hanno in comune la necessità della creazione di una rete di servizio nazionale, eventualmente divisa in sottoreti regionali, in continua comunicazione fra loro, in modo da contenere i problemi di gestione della rete stessa.

Non dimentichiamo, inoltre, che una rete di SP definisce il proprio Datum, inquadrato a sua volta in uno di livello superiore, in Italia sono in uso differenti sistemi di riferimento e gli stessi problemi evidenziati per la generazione delle correzioni si riproporrebbero, immutati, anche nel caso del calcolo dei parametri di trasformazione tra il datum della rete stessa e il sistema di riferimento necessario; forse una strutturazione a “griglia” delle correzioni, aggiornata periodicamente, potrebbe essere utile a lisciare le inevitabili incongruenze che si riscontrano ai bordi delle reti adiacenti.

### **6.3 Opportunità della certificazione delle reti di stazioni permanenti**

L'analisi riportata delle reti di SP è stata per lo più incernierata sul lato tecnico-prestazionale, tramite l'analisi delle precisioni raggiunte, e raggiungibili, in vari casi di studio presentati, per tale motivo, finora, non si è ancora parlato di rete di SP GNSS finalizzata alla fornitura di servizi di posizionamento.

I servizi erogabili da tali strutture possono, almeno al momento, essere descritti dai seguenti punti (Biagi 2006):

1. servizi tecnici, ovvero caratterizzati da accuratezze da centimetriche a submetriche: rilievo a scopi topografici e cartografici in generale;
2. servizi scientifici, ovvero caratterizzati da accuratezze subcentimetriche: monitoraggio di deformazioni;
3. servizi tecnici “certificati”: rilievo catastale e ricostruzione cinematica per voli fotogrammetrici e catasto strade;
4. servizi accessori, come le stime dei ritardi troposferici ed ionosferici;
5. formazione.



Purtroppo le precedenti elencazioni sono chiare se esaminate dal punto di vista delle accuratezze richieste, che hanno da parte loro il vantaggio dell’oggettività, ma porgono il fianco quando ci chiediamo cosa vogliamo intendere per servizi certificati.

La certificazione può essere estesa a tutti i servizi di posizionamento attraverso i quali si possano configurare, per l’utenza, aspetti giuridici, legali, economici, ecc.

Basti pensare ad un rilievo, di tipo catastale con lo scopo di definire diritti di proprietà privata o pubblica, oppure ad un collaudo di un rilievo di grande interesse, ove il posizionamento serve a comprovare la correttezza della georeferenziazione di informazioni territoriali.

Ma cosa vogliamo intendere con il termine “Certificazione”, da alcuni pareri ascoltati in alcuniconsessi scientifici, la certificazione sembra essere identificata con un “vaglio accurato” delleoperazioni da condurre per la realizzazione e l’utilizzo delle reti di SP, da un non ancora precisato ente certificatore; se così fosse, a nostro parere, si incapperebbe nel grosso errore di identificare la certificazione con il collaudo stesso; limitarsi a questo porterebbe solamente a realizzare un servizio valido, almeno ai fini legali, per chi ne usufruisca.

Il primo problema da porsi è quello della creazione della normativa stessa, secondo la quale, in un secondo momento, certificare le reti stesse, tali normative, se dal punto di vista della qualità (ISO9001) esistono già, per la creazione, l’identificazione, l’inquadramento e l’utilizzo di una rete di stazioni permanenti devono ancora essere create ex-novo; tali norme, dovrebbero avere la caratteristica di poter essere applicate, come accade con le norme ISO, ai più svariati contesti, il che vorrebbe dire disegnarle in maniera che possano adattarsi alle differenti necessità delle diverse reti di stazioni permanenti.

Proviamo a scorrere e a proporre alcuni accorgimenti che potranno essere intesi nell’ottica di ottenere e proporre un servizio certificato; se svariate esperienze testimoniano che il rilievo in tempo reale, con soluzione di fase ad ambiguità fissate, in modalità statica e supportato da una rete può arrivare a fornire accuratezze centimetriche, vi sono comunque situazioni ben precise bisogna ancora ricorrere al postprocessamento dei dati.

Basti pensare che, per quanto grandi, le reti di SP, non possono arrivare dovunque a causa della possibile mancanza, per svariati motivi, del mezzo di comunicazione dell’operatore con il centro di controllo, oppure vi possono essere condizioni di rilievo in cui il tempo reale non arriva alla convergenza dei risultati: ciò tipicamente può avvenire in siti ostruiti o comunque con mediocre configurazione satellitare. Infine solo un eventuale postprocessamento dei dati potrebbe fornire una verifica a posteriori dei risultati ottenuti in tempo reale: anche se la situazione non è ancora corrente e normata, si ritiene che tale prassi potrà in un futuro costituire un metodo di collaudo per rilievi in tempo reale. Per tali motivi, anche in un rilievo



finalizzato al tempo reale, è opportuno sin d'ora suggerire la registrazione nel ricevitore dei dati grezzi.

Il postprocessamento dei dati è, almeno allo stato attuale, preferibile e più conservativo rispetto all'elaborazione in tempo reale per la ricostruzione con accuratezze centimetriche di traiettorie (rilievi cinematici): naturalmente tale situazione potrebbe mutare in un prossimo futuro, con l'introduzione di nuove frequenze nel GPS, il completamento della costellazione Glonass e l'avvio di Galileo. Infine, sicuramente le applicazioni per cui siano richieste accuratezze subcentimetriche richiedono il rilievo statico e il postprocessamento dei dati: tale situazione non cambierà nel futuro prossimo, neppure con l'ulteriore sviluppo dei servizi di rete e l'introduzione di nuovi sistemi satellitari.

Il gestore della rete deve considerare e progettare attentamente, prima ancora di predisporre a realizzare la rete, le seguenti questioni (Biagi 2006):

1. le caratteristiche tecniche di ricevitori, l'hardware (nel seguito HW), i programmi (nel seguito SW) e l'installazione di tutte le SP;
2. le funzionalità del servizio in tempo reale: non è detto infatti che il servizio debba funzionare 24 ore al giorno e ogni giorno, anche se ciò è auspicabile soprattutto se viene gestito da enti tra i cui compiti ricadono anche interventi in situazioni di emergenza;
3. viceversa, in ogni caso, i dati per il postprocessamento debbono essere presenti per ogni ora e ogni giorno della settimana: la continuità, anche notturna, dei dati è particolarmente rilevante non tanto per gli utenti del servizio, quanto per lo scopo del monitoraggio delle coordinate delle SP e per le applicazioni scientifiche;
4. il numero di utenti contemporaneamente supportabili in varie modalità, che è legato strettamente al tipo di servizi forniti dalla rete: ad esempio la diffusione di uno o più segnali di correzione mediante parametri d'area è praticamente indipendente dal numero di utenti, mentre la trasmissione di stazioni di riferimento virtuali impegna il calcolo e la diffusione in maniera strettamente dipendente dal numero di connessioni;
5. l'HW presso il centro di controllo: server, rete, modem, porte disponibili, devono essere adeguati al servizio; devono inoltre essere previste le salvaguardie elettriche: gruppi di continuità e salvaguardie informatiche per la gestione dei dati, i backup speculari del sistema, gli aggiornamenti di antivirus e del sistema operativo;
6. il SW presso il centro di controllo, o alcuni suoi moduli, debbono essere dedicati al controllo remoto ed alla verifica della funzionalità delle SP: normalmente è bene che il



centro abbia il controllo completo delle SP, e non solo la possibilità di acquisire da queste stringhe continue di dati;

7. infine, ma non ultime, occorre definire le modalità di pubblicizzazione e di erogazione dei servizi in tempo reale, come pure le modalità di erogazione dei servizi in postprocessamento, prevedibilmente basate su un siti Internet.

Quindi una rete finalizzata alla distribuzione di servizi di posizionamento dovrebbe necessariamente definire una “carta dei servizi”, definibile in base alle richieste della normativa, che il gestore della rete si impegna a garantire all’utenza con le relative caratteristiche di accuratezza ed affidabilità.

La carta dei servizi, per quanto necessaria e utile, equivarrebbe a poco più di un documento inutile se il suo rispetto non fosse sottoposto all’approvazione da parte di un ente esterno, dal punto di vista strettamente geodetico, un organismo di controllo a questo livello in Italia non esiste ancora.

Sul modello delle altre certificazioni esistenti nel nostro Paese, si potrebbe pensare di implementare e adattare, almeno in prima battuta, alcune certificazioni già esistenti, come la normativa sulla qualità che, proprio perché stiamo parlando di servizi all’utenza, sembra essere quella che sposa meglio i concetti di certificazione espressi finora.

Una rete di SP certificata per la qualità del servizio avrebbe il vantaggio di assicurare all’utenza tutte le garanzie di funzionalità, puntualità, affidabilità e prontezza del servizio, inoltre tali caratteristiche sarebbero controllate ad intervalli regolari negli anni, poiché la certificazione di qualità deve essere rinnovata annualmente da parte degli enti certificatori riconosciuti dal SINCERT.

A nostro avviso rendere una rete di SP aderente alla normativa ISO9001 per la qualità garantirebbe un primo, concreto approccio alla certificazione delle reti stesse, con ottimi vantaggi per l’utenza e per il gestore stesso della rete, una volta poi adeguate le reti a tale normativa, e fatto tesoro delle sue relazioni più importanti, si potrà pensare ad una formulazione di una normativa “geodetica” di qualità, che riassuma in sé tutti i concetti, le precauzioni e le applicazioni che possano servire ad una gestione attenta e ragionata di una rete di stazioni permanenti.

#### **6.4 Il problema del Sistema di riferimento**

Come ci è già capitato di sottolineare più volte nel corso della trattazione una rete di stazioni permanenti distribuisce dati, servizi e prodotti, cioè distribuisce, in ultima analisi, coordinate all’utenza; fondamentalmente questo equivale a materializzare un Datum di riferimento.



Tale Datum dovrebbe avere, per soddisfare le necessità tipiche dell’utenza tecnica, ma per certi versi anche quelle dell’utenza scientifica, caratteristiche di efficienza, accuratezza e semplificazione.

Se la rete di SP per stimare le correzioni da trasmettere deve utilizzare le coordinate delle SP stesse è ovvia che la rete deve essere inquadrata a sua volta in un Sistema di Riferimento, la scelta di quest’ultimo non è esente da criticità, ovviamente l’inquadramento deve soddisfare altissime caratteristiche di accuratezza per poter permettere, a sua volta, alla rete di SP di garantire la migliore accuratezza nella fornitura dei servizi.

Sebbene molte reti di stazioni permanenti utilizzino ancora il sistema di riferimento ITRF, la scelta più conveniente, almeno in termini di coerenza della strutturazione del SR stesso con il GPS, sembra ricadere sul sistema IGb00, che ha inoltre il vantaggio, rispetto a ITRF, di garantire coordinate aggiornate settimanalmente, tale frequenza di aggiornamento, per una struttura di rete delle dimensioni medie di una regione italiana, è addirittura eccessiva, sembrerebbe opportuno prevedere un ricalcolo della rete, sulla base di nuovi valori, quando le coordinate della stessa differiscano, rispetto alla precedente determinazione, di circa 1-2 cm, questo valore ci sembra accettabile per garantire all’utenza un servizio di buona qualità.

Il sistema ITRF ha avuto varie rideterminazioni nel corso degli anni, le coordinate in tale sistema sono riferite all’epoca 1997.0 e le stime per le epoche successive sono effettuate in base alle velocità delle stazioni di riferimento (vedi Tabella 6.2);

NOME		X	Y	X	vx	vy	vz
GRASSE	GRAS	4581691,0120	556114,6800	4389360,6960	-0,0131	0,0189	0,0101
LAMPEDUSA	LAMP	5073164,8880	1134512,4250	3683181,0320	-0,0142	0,0185	0,0137
BOLOGNA	MEDI	4461400,8950	919593,4230	4449504,6820	-0,0187	0,02	0,0086
GENOVA	GENO	4507892,4470	707621,3290	4441603,4260	-0,0165	0,0194	0,0092
NOTO	NOTO	4934528,6550	1321262,2220	3806479,5190	-0,0173	0,0174	0,0134
TORINO	TORI	4472544,4590	601634,1920	4492545,1120	-0,0113	0,0193	0,0094
CAGLIARI	CAGL	4893378,9330	772649,6250	4004182,0630	-0,0122	0,0195	0,0116
MATERA	MATE	4641949,7070	1393045,2710	4133287,3430	-0,0188	0,0191	0,0131
VENEZIA	VENE	4379724,8710	957495,7340	4521605,1290	-0,0102	0,0191	0,015
PADOVA	UPAD	4389531,2830	923253,6420	4519256,3460	-0,0174	0,0188	0,0104
BOLZANO	BZRG	4312657,6140	864634,5170	4603844,3410	-0,0124	0,0189	0,0139
PERUGIA	UNPG	4555145,7820	997822,2630	4337432,5510	0,0163	0,0248	0,0399

Tabella 6.2 - Esempio di coordinate ITRF

un approccio di questo tipo può portare, man mano che ci si allontani dal periodo del calcolo delle coordinate e delle velocità, cioè dalla ridefinizione del sistema stesso, a problemi di varia natura nella definizione delle coordinate.

In Italia l’utenza tecnica, tipicamente, ha necessità di avere coordinate in ETRF89, a tal proposito possiamo ricordare che la realizzazione, che segue dalla definizione di ETRS89, è



stata materializzata attraverso parecchi “*frame*”, calcolati e indicati con le sigle ETRFyy. Le migliori soluzioni al momento disponibili sono le ETRF2000. Le procedure di passaggio da ITRS a ETRS89 sono descritte in (Boucher, Altamimi, 2001). Ad esempio, per convertire coordinate di una stazione permanente ITRFyy ( $X^I$  yy) nel sistema ETRS89 ( $X^E$ ) possono essere utilizzate le seguenti relazioni generali:

$$X^E(t) = X^I_{yy} + T_{yy} + \begin{pmatrix} 0 & -\dot{r}3_{yy} & \dot{r}2_{yy} \\ \dot{r}3_{yy} & 0 & -\dot{r}1_{yy} \\ -\dot{r}2_{yy} & \dot{r}1_{yy} & 0 \end{pmatrix} X^I_{yy}(t-1989.0)$$

in cui le rotazioni  $r$  e le traslazioni  $T$  sono valori noti riferiti alle specifiche realizzazioni del sistema ITRF negli anni yy.

La realizzazione Italiana più diffusa del sistema ETRS89 è la rete geodetica del primo ordine IGM95, costituita attualmente da circa 1600 vertici (compresi i vertici di raffettimento), posti ad una distanza media di circa 20 km, la precisione relativa media della rete, al livello di confidenza del 95%, risulta di 5 cm in planimetria, molti vertici delle reti geodetiche internazionali (VLBI, SLR, EUREF), ricadenti nel territorio nazionale, sono entrati a far parte dell'IGM95.

Per concludere il discorso sui sistemi di riferimento nell’ambito della strutturazione di una rete di stazioni permanenti, ci si può domandare infine che relazione esiste tra il sistema WGS84, anch’esso convenzionale ed il sistema ITRS. Il WGS84 ha due realizzazioni, la prima realizzazione, Doppler Transit, è stata calcolata con un’accuratezza finale di circa un metro. I parametri di rototraslazione e scala per il passaggio da questo sistema ai sistemi ITRS sono noti e definiti. Le nuove realizzazioni sono basate su misure GPS (alle epoche G730 e G873) e sono coincidenti attorno al decimetro con le realizzazioni ITRF.



## **Conclusioni**

Come si evince da titolo stesso della tesi, in questo lavoro ci si è proposti di presentare e affrontare criticamente gli aspetti propri del rilievo satellitare e di analizzare lo sviluppo delle tecniche di posizionamento, dalla metodologia statica fino all'utilizzo delle reti di SP per il tempo reale, le due metodologie presentano molte interessanti interconnessioni che ci siamo proposti di indagare e approfondire.

Tutte le sperimentazioni e i risultati riportati in questa tesi sono relative a differenti aspetti del rilievo satellitare, sono state esaminate le reti statiche di raffittimento, il rilievo cinematico post-processato, cenni di cinematico in tempo reale e, in gran parte, rilievo in tempo reale con approccio di rete.

La possibilità di affrontare varie sfaccettature di uno stesso argomento ci ha permesso di analizzare i problemi comuni da angolazioni diverse; questo ci ha dato la possibilità di affermare che, eliminate le ovvie specificità di ogni applicazione, le problematiche incontrate, che sono poi le problematiche fondamentali del rilievo satellitare, sono piuttosto simili.

Il posizionamento satellitare, nelle sue nuove e molteplici applicazioni, ha raggiunto un livello di affidabilità sorprendente. Nell'ottica della valutazione delle prospettive future bisognerà accettare la definizione internazionale di GNSS, in luogo del solo GPS, associando di fatto in un unico sistema le costellazioni via via disponibili, GPS, GALILEO, GLONASS, QZSS ed altri, e non dovremo dimenticare gli elementi a disposizione per le correzioni differenziali quali WAAS, EGNOS, OMNISTAR, ecc.

In tale scenario la ricerca delle soluzioni "integrate" dovranno essere affrontate, nei prossimi anni, come problema tecnico reale e non solo come soluzione teorica.

Occorre chiarire che, almeno attualmente, il GPS è l'unico sistema di posizionamento operativo e utilizzabile 24 ore su 24 l'intero globo terrestre; appare perciò ovvio che la maggior parte dell'attenzione attuale del mondo scientifico e, soprattutto, privato è interessata allo studio e allo sviluppo di tale sistema, tanto che, semanticamente, l'acronimo GPS racchiude in se il significato stesso di rilievo satellitare.

Tenendo presente quest'aspetto possiamo sostenere che le reti GPS in Italia, in maggior misura per le reti statiche di raffittimento che non per le reti di stazioni permanenti per il posizionamento in tempo reale, hanno raggiunto la giusta maturazione per poter essere utilizzate con efficienza dall'utenza finale.

La funzione stessa delle reti GPS è andata modificandosi nel tempo; in un primo momento sono state identificate con il concetto "tradizionale" di un insieme di vertici a coordinate note materializzati sul territorio, che permettono all'utenza, tecnica e scientifica, di inquadrare un

rilievo nel datum definito dalla rete stessa, anche utilizzando, con opportuni accorgimenti, strumentazione di tipo classico.

Negli ultimi anni tale concetto si è evoluto e integrato con la struttura di rete di stazioni permanenti, dove il datum è realizzato e tenuto aggiornato dal gestore della rete stessa, inoltre tali reti hanno guadagnato in tempi più recenti, la possibilità di fornire un servizio di posizionamento in tempo reale oltre alla possibilità di fornire all'utenza i dati grezzi delle stazioni stesse.

Attualmente ci troviamo di fronte ad una coesistenza dei due concetti e, nel corso delle ricerche e sperimentazioni eseguite, è stato effettuato un studio parallelo delle due realtà, attraverso l'analisi del progetto di raffittimento a 7 chilometri dell'IGM95 in Emilia Romagna a cui si è affiancato lo studio delle problematiche attinenti alla realizzazione, alla gestione e all'uso di una rete di SP e, ovviamente, al suo inquadramento.

L'inquadramento della rete di SP del DISTART è stato effettuato, con il programma BERNESE 5.0, nel sistema ITRF2000, i risultati ottenuti, utilizzando la procedura standard suggerita dagli sviluppatori del programma stesso, sono in linea con quelli riscontrabili in letteratura; inoltre, dopo una campagna di misura dedicata, che ha interessato 20 vertici della rete GPS Nazionale ricadenti nella zona coperta dalla rete, sono stati calcolati i parametri di trasformazione fra datum della rete e IGM95.

Se il rilievo statico può essere considerato, ci si passi il termine, “l'antenato” del rilievo satellitare in campo geodetico, esso afferma oggi una sua nobilitazione come mezzo più fine per l'inquadramento delle grandi reti di stazioni permanenti.

La rete IGM95 è stata raffittita in gran parte, in Emilia Romagna tutte le province, alla data attuale, hanno ultimato le operazioni di realizzazione e calcolo delle reti a 7 chilometri (ad eccezione delle reti della provincia di Bologna in cui la rete è in fase di compensazioni e collaudo finale). Lo sviluppo di queste reti nella regione è stato condotto cercando di garantire la loro interconnessione, mediante la realizzazione di vertici collocati, entro certi limiti, all'esterno dei confini delle regioni stesse, un primo tentativo parziale di connessioni di reti adiacenti ha dato degli ottimi risultati, a testimonianza ulteriore della buona qualità delle reti di raffittimento stesse. Il progetto GPS7, prevedendo anche misure di tipo altimetrico mediante livellazioni di precisione, ha permesso lo studio dell'ondulazione sperimentale all'interno delle reti; i risultati delle sperimentazioni condotte sull'adattamento locale del geoide sono stati soddisfacenti.

A tal proposito possiamo affermare che le specifiche tecniche proposte dal Capitolato per il raffittimento si sono rivelate adeguate e coerenti con gli scopi che ci si prefiggeva di ottenere.

La rete di stazioni permanenti gestita dal DISTART è stata la base ideale per tutte le sperimentazioni NRTK, le opportunità fornite dalla disponibilità della gestione diretta della rete sono state grandissime.

Le prime sperimentazioni condotte sono state volte alla comprensione della precisione e accuratezza attendibili dal sistema, per tale scopo sono state effettuate diverse campagne su vari vertici a coordinate note in provincia di Bologna; i risultati ottenuti, in termini di ripetibilità delle misure anche su intervalli temporali molto estesi, sono stati molto incoraggianti, infatti, per la quasi totalità delle misure si è raggiunta un'accuratezza elevata, con punte superiori ai 5 cm.

La seconda fase ha riguardato lo studio dei differenti protocolli di trasmissione delle correzioni, anche attraverso l'analisi di differenti modellazioni della correzione stessa tramite lo studio di diversi software di gestione della rete che si sono avvicendati nel corso degli anni, (GPSNet, GNSSMART, SPIDERNet) i risultati presentati, benché ancora in fase di studio, ci permettono di affermare che non sono emersi elementi sufficienti per preferire un SW o un protocollo ad un altro; tale aspetto appare comunque rassicurante sull'affidabilità generale dell'evoluzione dei protocolli stessi.

Alcune esperienze, tuttora in corso, hanno analizzato il comportamento della stabilità della soluzione in lunghi intervalli di rilievo in continuo; si sono osservati alcuni comportamenti anomali, che devono essere ulteriormente approfonditi, poiché la soluzione ha delle cadute di qualità, sia nel passaggio da fixed a float che, pur rimanendo fixed, nell'aumento del RMS della soluzione stessa. Al momento non si sono ancora trovate tutte le cause di tale comportamento, che spesso, non può essere imputabile soltanto ad una cattiva condizione della costellazione satellitare.

Il momento ultimo della ricerca condotta può essere inteso come unione e integrazione dei due differenti concetti di rete discussi in precedenza, le sperimentazioni sulla rete GPS7 di Forlì-Cesena, attraverso varie ripetizioni della misura NRTK di un elevato numero di vertici della rete, hanno permesso di operare un confronto diretto, fra coordinate "statiche" e le stesse ottenute con posizionamento in tempo reale con approccio di rete.

I risultati ottenuti sono stati incoraggianti soprattutto ai fini della sostituibilità e integrazione del rilievo statico con il RT, poiché il confronto fra le coordinate derivanti dalla compensazione statica della rete, effettuata nello stesso datum di riferimento utilizzato per i rilievi NRTK, è stato, nel 90% dei casi, inferiore ai 5 cm; tale valore può essere ritenuto paragonabile a quello della precisione stessa della rete IGM95.

In conclusione, possiamo affermare che i risultati ottenuti sono, a tutti i livelli, incoraggianti, questo testimonia il fatto che le ricerche proposte e la loro conduzione sono state interpretate e gestite nella maniera più corretta. Gli obiettivi che ci siamo posti sono stati, in massima parte, raggiunti, altri sono ancora in fase di studio, ma, fiduciosamente, in “dirittura d’arrivo”. Oggi dei sistemi satellitari conosciamo molto, forse quasi tutto, ma nei prossimi anni la ricerca si troverà di fronte a nuovi interrogativi, nuove costellazioni, nuove applicazioni, per tali motivi bisognerà fare tesoro dei traguardi raggiunti per comprendere e affrontare i nuovi problemi con la stessa, o speriamo migliore, capacità e qualità dimostrata finora.

## Bibliografia

- AAVV, National Geodetic Survey CORS System: Station Selection Criteria  
[http://www.ngs.noaa.gov/CORS/Site\\_selec\\_crit.html](http://www.ngs.noaa.gov/CORS/Site_selec_crit.html) 1999
- AAVV, Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP), version 1.0,  
[http://igs.ifag.de/index\\_ntrip.htm](http://igs.ifag.de/index_ntrip.htm), 2004.
- 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.
- Allison, T. (1998): An Introduction to Carrier Phase and RTK initialization – Trimble user conference, 1998.
- Anzidei M., P. Baldi, G. Casula, A. Galvani, E. Mantovani, A. Pesci, F. Riguzzi, E. Serpelloni (2001). Insights on present-day crustal motion in the central Mediterranean area from GPS surveys, *Geophys. J. Int.*, 146, 98-110.
- Aoudia A., Barzaghi R., Borghi A., Sabadini R., Marotta A. M., Panza G., Troisi C., Manzino A. M., Roggero M., Lucchetta A., Carraro C., Zampedri G., Laffi R., Crotta S., De Donatis S., Gerbino P. G., Sguerso D., Voelksen C., Drewes H., Valpersdorf A., Zivcic M, Il progetto ALPS-GPSQuakenet, Atti della 8a Conferenza Nazionale ASITA, Roma, 2004.
- Arsenio G., Coticchia A., Donatelli D., Maseroli R., Pierozzi M. (2002), "Il nuovo metodo dell'IGM per il passaggio fra sistemi di riferimento ed il software VERTO1", Atti della 6° Conferenza Nazionale ASITA - Perugia 5-8 novembre 2002 - Vol. I - pp. 189-194;
- Bagge, A., Wübbena G., Schmitz M., - Introduction into Real-Time Network Adjustment with Geo++® GNSMART, - Geoinformation Workshop 2004, Istanbul Kultur University, Antalya,
- Bagge, A., Wübbena G., Schmitz M., Introduction into Real-Time Network Adjustment with Geo++® GNSMART, Geoinformation Workshop 2004, Istanbul Kultur University, Antalya, Turkey, September, 2004.
- Baldo, M. Cina A. Manzino, A.: "GPS cinematico in appoggio a misure laser a scansione". Relazione alla IV Conferenza Nazionale ASITA, Genova, 2000. Atti della Conferenza pagg. 113122.
- Barbarella M. , R. Gavaruzzi, E. Ronci, 2003 – Reti di Raffittimento GPS7 e loro inquadramento – Atti della 7° Conferenza Nazionale ASITA, Verona, 28-31 ottobre 2003.
- Barbarella M. , S. Gandolfi, E. Ronci, 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., S. Gandolfi, F. Mancini, E. Ronci, L. Vittuari, 2004 – Integrazione di misure GPS-GLONASS, analisi di una rete d'appoggio per sperimentazioni VRS – in Atti della 8° Conferenza ASITA – 13-17 Dicembre 2004, Roma.

Barbarella M., A. Bedin, S. Gandolfi, C. Gordini, E. Ronci, L. Vittuari, 2005 - Analisi Di Dati GNSS Derivanti Da Sperimentazione Network Rtk - in Atti della 9° Conferenza ASITA – 15-18 Novembre 2005, Catania.

Barbarella M., Carella P. (2002), "Adattamento di modelli di ondulazione nell'ambito di reti di raffittimento", Atti della 6° Conferenza Nazionale ASITA - Perugia 5-8 novembre 2002 - Vol. I - pp. 307-308;

Barbarella M., E. Ronci, 2004 – Applicativo per l'utilizzo e l'integrazione del dato Verto su aree vaste – Presentato al Convegno Nazionale SIFET 2004 (Chia Laguna – CA), Bollettino SIFET 2005 n° 1.

Barbarella, M. E. Ronci, 2005 – Giunzione di Reti Provinciali di raffittimento GPS7 in Emilia Romagna – Convegno Nazionale SIFET 2005 (Mondello – PA).

Barzaghi R., Betti B., Biagi L., Casella V., Crespi M., Franzini M., Manzino A. M., Mazzoni A., Piras M., Roggero M., Scuratti M., Tornatore V., Rilievi GPS-RTK e stazioni permanenti GPS: sperimentazione del sistema RIR, Atti della 8a Conferenza Nazionale ASITA, Roma, 2004.

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, giugno 2002.

Barzaghi R., Guzzetti F., Pinto L. (1998), "Problemi connessi all'utilizzo di reti GPS per l'inquadramento altimetrico della cartografia a grande scala", Bollettino della SIFET n.1-1998, pp. 17-36;

Belluomini P., Biagi L., Sansò F., Scuratti M., Novembre C., Il servizio di posizionamento della Regione Lombardia: stato di avanzamento, Atti della 8a Conferenza ASITA, Roma, 2004.

Benciolini B, Biagi L. at Al -Linee guida per la realizzazione di reti di Stazioni Permanent di servizio – Bollettino di Geodesia e scienze affini 2005.

Betti B. Casella V., Manzino A., Pinto P., Spalla A., Tornatore V. “Trattamento dei dati GPS e datum altimetrico”. Bollettino della SIFET n. 2 suppl. speciale 2001, pagg 39-55.

Betti B., Casella V., Manzino A., Pinto L., Spalla A., (2001), "Trattamento dei dati GPS e datum altimetrico", supplemento al Bollettino della SIFET n. 2-2001, pp. 39-54;

- Betti B., Cina A., Manzino A. Tombolini L. (1999) - "The GPS permanent station at Turin Polytechnic ". Proceedings of the workshop on the Italian GPS permanent network pagg. 123-132.
- Betti B., Cina A., Manzino A., Olivieri A., Siccardi M., Tombolini L., "Controllo di qualità dei dati nella stazione permanente GPS di Torino: Bollettino della SIFET n. 1/1998 pagg 37-48.
- Betti B., L. Biagi, M. Crespi and F. Riguzzi (1999). GPS sensitivity analysis applied to non permanent GPS control networks, Journal of Geodesy, 73, 158-167.
- Betti B., Tornatore V., Crespi M., Di Paola S., Baiocchi V., Basili P., Bonafoni S., Ferrara R., Ciotti P., Fionda E., "Stima del ritardo troposferico zenitale e direzionale con GPS e radiometro: problemi e confronti". Atti 5<sup>a</sup> Conferenza ASITA, 2001 pagg. 205-214.
- Beucherl A, Landau H, Vollath U. (2000) – "Long-range RTK Positioning Using Virtual Reference Station". Proceding ION-GPS, 2000: 123-131.
- 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 eds, Il Servizio di Posizionamento in Regione Lombardia e la prima sperimentazione sui servizi di rete in tempo reale, in fase di sottomissione al Bollettino SIFET, 2006.
- Biagi L., Cano Cordoba J. P., De Lacy M. C., Sansò F. (2001), Problematiche e possibili soluzioni nell'istituzione di una stazione permanente, Atti della 5a Conferenza Nazionale ASITA, La qualità nell'Informazione geografica, pagg. 221-226
- Biagi L., Crespi M., Manzino A. M., Sansò F., Roggero M., Guidelines to an optimal adjustment of local service permanent networks within a dynamic world: a first proposal, <http://geomatica.como.polimi.it/prin/>, 2005.
- Biagi L., Crespi M., Manzino A., Sansò F., I servizi di posizionamento basati su reti di stazioni permanenti GNSS, relazione invitata alla 9<sup>o</sup> Conferenza ASITA, 2005, Catania.
- Biagi L., De Lacy M. C., Sansò F., Vespe F. (2001), Prospettive per il riferimento geodetico italiano permanente, Atti della 5a Conferenza Nazionale ASITA, La qualità nell'Informazione geografica, pagg. 215-220
- Boccardo, P. Cina, A. Ghidella F. Manzino, A.: "Tecniche differenziali DGPS per il rilievo in tempo reale" Relazione alla III Conferenza nazionale ASITA, Napoli, 1999. In "Atti" della III conferenza ASITA, pagg. 577-582.
- Bonsignore F. (2001), "Misura della rete regionale di controllo della subsideza, misura di linee della rete costiera non comprese nella rete regionale, rilievi batimetrici - Relazione finale", Pubblicazione ARPA Ingegneria Ambientale Regione Emilia-Romagna, Assessorato Agricoltura Ambiente e Sviluppo Sostenibile, Bologna 2001;

- Boucher C., Altamimi Z., Sillard P., (1999), The 1997 International Terrestrial Reference Frame, IERS Technical Note N° 27, IERS, Observatoire de Paris
- Boucher C., Zuheir Altamimi Z. 2001. Definizione delle realizzazioni ETRF: <http://lareg.ensg.ign.fr/EUREF/memo.pdf>. Versione 5.
- Buffoni D., Revolti R., Vitti A., Zatelli P. Realizzazione di una rete di stazioni permanenti GPS per un nuovo "Ufficio per il Posizionamento" della Provincia Autonoma di Trento atti della 9° Conferenza ASITA, 2005, Catania
- Casella V., Galetto R., Spalla A.(2000) - Il progetto di ricerca Cofin98 sull'impiego del laser a scansione in bollettino Sifet n° 2, pagg. 13-26.
- Casella V., Spalla A. (2000) - Dati laser a scansione da piattaforma aerea a supporto della pianificazione urbana in bollettino Sifet n° 2, pagg. 43-51.
- Cefalo R., Manzoni G., Pagurut R., Sluga T., Sistemi terrestri di radiodiffusione per il GPS differenziale in tempo reale. Boll. Sifet Suppl. Speciale al n° 2/2001 pagg. 213-216
- Chen e Lachapelle (1994) – A comparison of the FASF and least-squares search algorithm for ambiguity resolution on the fly. In: Proceeding of the international Symposium on Kinematic System in Geodesy, Geomatics and Navigation, Banff, Canada, August 30 though September 2
- Cina A. Manzino A.: “Misure GPS in tempo reale: applicabilità e precisioni”. Bollettino SIFET n. 4, 2000, pagg 7-20
- Cina A., Manzino A., Piras M., Roggero M, Rete test in Piemonte, impianto e risultati, in Bollettino SIFET, No 2, 2004.
- Cina, A. Manzino, A. Roggero, M.: “Stazioni Virtuali di Codice”. In “Atti della V Conferenza Nazionale ASITA”, 2001, pagg. 539-546.
- Cina, A. Manzino, A. Sasia P.: “I campioni atomici nel posizionamento GPS in tempo reale”. In “Atti della V Conferenza Nazionale ASITA”, 2001, pagg 547-552.
- Dousa J., On the specific aspects of precise tropospheric path delay estimation in GPS analysis, IAG Symposia 2001, vol. 125, Springer, 2001.
- Euler, H-J., Keenan, C.R., Zebhauser, B.E. and Wuebbena, G., Study of a Simplified Approach in Utilizing Information from Permanent Reference Station Arrays, ION GPS 2001, September 11-14, 2001, Salt Lake City, UT, 2001.
- Euler, H-J., Keenan, C.R., Zebhauser, B.E. and Wuebbena, G., Study of a Simplified Approach in Utilizing Information from Permanent Reference Station Arrays, ION GPS 2001, September 11-14, 2001, Salt Lake City, UT, 2001.

Faccani C., Ferretti R., Ferraro C., Fionda E., Mureddu L., Nardi A., Pacione R., Radicchio M., Sciarretta C., Vespe F.: "GPS meteorology: comparisons with independent techniques", EGS 2000 Nice, April 2000.

Ferraro C., Nardi A., Pacione R., Sciarretta C.: "Requisiti di acquisizione ad analisi dati" Telespazio report, document nr: 180170-484-NOT-331003, december 1999

Ferraro C., Nardi A., Pacione R., Sciarretta C., Vespe F.: "Comparison of GPS Tropospheric Zenith Path Delay using data of the Italian Fiducial network", EGS99 The Hague, April 1999.

Ferraro C., Nardi A., Pacione R., Sciarretta C., Vespe F.: "Monitoring the Atmosphere by GPS at Matera Space Geodesy Center", IUGG99 Birmingham, 18-30 July 1999.

Fotopoulos G . Parameterization of DGPS Carrier Phase Errors Over a Regional Network of Reference Stations, (M.Sc. thesis), UCGE Report No. 20142, August 2000.

Galileo: Final report of the inception study to support the development of a business plan for the GALILEO Programme: Executive summary 20.11.2001

[http://www.europa.eu.int/comm/energy\\_transport/library/gal\\_european\\_dependence\\_on\\_gps\\_re](http://www.europa.eu.int/comm/energy_transport/library/gal_european_dependence_on_gps_re)

Gelmotto E., Manzino A. : "Controllo di qualità dei dati GPS di siti permanenti". Atti della V Conferenza Nazionale Asita, 2001, pagg 849-858

Grejner-Brzezinska Dorota A., Kashani I., Wielgosz P., On accuracy and reliability of instantaneous network RTK as a function of network geometry, station separation, and data processing strategy, GPS Solutions (2005) 9:212-225 DOI 10.1007/s10291-005-0130-1

Hugentobler, U., Dach, R., Frizez, P., Meindl, M, Bernese GPS Software 5.0, Draft. Astronomical Institute, University of Berne, 2005.

IREALP, Politecnico di Milano – Polo Regionale di Como, Disciplinare tecnico del Capitolato Speciale d’Appalto Realizzazione di una rete regionale di stazioni permanenti GPS coordinate da un centro di controllo per l’erogazione all’utenza di servizi di posizionamento e navigazione, IREALP, 2004.

Landau H., Vollath U., Chen X., Virtual Reference Station Systems , Journal of Global Positioning Systems Vol. 1, No. 2: 137-143, 2002

Lanzi C., Gelmini M., Trebeschi A., Vassena G., - Progetto BresciaGPS: esperienze preliminari e problematiche di installazione di una stazione GPS permanente. - Atti 6° - Conferenza Nazionale ASITA - Perugia, 5-8 Novembre 2002

Leica Geosystems, Networked Reference stations: take it to the MAX!, Leica Geosystems White paper, June 2005.

Manzino A. M., Stazioni permanenti GNSS in Italia: scopi, usi e prospettive, Relazione Invitata ASITA in Atti della 6a Conferenza Nazionale ASITA, Perugia, 2002.

Manzino A., L'evoluzione del sistema di posizionamento GNSS – Relazione invitata 10° Conferenza Nazionale ASITA, Bolzano 2006 – Riassunto esteso

Pellegrinelli A., Perfetti N., Russo P. (2003a), "Raffettimento primario della rete Geodetica Fondamentale Nazionale IGM95" in "Carta Geografica Unica nella Provincia di Ferrara", supplemento al n. 640 della rivista INARCOS, pp. 24-30;

Pellegrinelli A., Perfetti N., Russo P. (2003b), "Raffettimento della rete IGM95 nella Provincia di Ferrara: analisi dei risultati e considerazioni" Atti della 7° Conferenza Nazionale ASITA - Verona 28-31 ottobre 2003 pp. 123-129

Radio Technical Commission for Maritime Services, RTCM recommended standards for differential GNSS service, Version 2.3, RTCM paper 136-2001, August 20, 2001.

Radio Technical Commission for Maritime Services, RTCM recommended standards for differential GNSS service, Version 3.0, RTCM paper, 30-2004, February 10, 2004.

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, Atti della 9a Conferenza ASITA, 2005.

Roggero M., Reti di stazioni GPS permanenti per il posizionamento geodetico - Tesi di dottorato in geodesia e geomatica XVI ciclo

Sansò F., De Lacy C., Uno studio sulle diverse applicazioni del GPS e sul futuro sviluppo della rete di stazioni permanenti GPS sul territorio italiano orientato alla creazione di un servizio geodetico nazionale, International Geoid Service-Agenzia Spaziale Italiana, 2001.

Schöffel M., Schneider A., Can NTRIP replace GMS communication in RTK surveying, paper presented at GPSNet User Conference, Munich, July 2004

Simsky A., Sleewaegen J. M., De Wilde W., Wilms F. (2005) Overview of Septentrio's Galileo Receiver Development strategy. ION GNSS 18t h Technical Meeting. Pagg 1888-1895 13-16 september.

Surace L., La nuova rete geodetica nazionale IGM95: risultati e prospettive di utilizzazione - Bollettino di Geodesia e Scienze affini, Anno LIV, n. 2, 1995

Turkey, September, 2004.

v22.pdf

Verhagen, S., Joosten P. (2003) Alghorhitms for design computations for integrated GPS-Galileo. Proceedings of GNSS 2003, 22-25 April 2003, Graz, Austria.

- Vollath U., A. Buecherl, H. Landau, C. Pagels, B. Wagner, - Multi-Base RTK Positioning Using Virtual Reference Stations. - Paper presented at ION GPS 2000, Salt Lake City, 2000
- Vollath U., A. Buecherl, H. Landau, C. Pagels, B. Wagner, Multi-Base RTK Positioning Using Virtual Reference Stations. Paper presented at ION GPS 2000, Salt Lake City, 2000
- Wübbena G., Bagge A., RTCM Message Type 59-FKP for transmission of FKP Version 1.0, Geo++® White Paper Nr. 2002.01, <http://www.geopp.de/download/>, 2002.
- Wübbena G., Bagge A., Schmitz M., Network-Based Techniques for RTK Applications, Presented at the GPS Symposium, GPS JIN 2001, GPS Society, Japan Institute of Navigation, November 14.-16., 2001, Tokyo, Japan, <http://www.geopp.de/download/>, 2001.
- Wübbena G., On the modelling of GNSS observations for high-precision position determination, Translation of Wubbena, G., Zur Modellierung von GNSS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionsbestimmung. Wissenschaftliche Arbeiten Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität, Hannover, Festschrift Prof. G. Seeber zum 60. Geburtstag, Nr. 239, Hannover, <http://www.geopp.de/download/>, 2001.
- Xiaoming C., Herbert L., Vollath U., New Tools for Network RTK Integrity Monitoring, ION GNSS, 2003.

**Parola su parola nce arrivammo,  
Nce arrivammo ncopp' ‘o mare,  
Scustumato paraviso...**

Spassiunatamente  
*Paolo Conte*

## **Ringraziamenti**

Circa cinque anni fa mi sono trovato di fronte ad una pagina simile a questa, con in testa un mare di persone da salutare e ringraziare, più o meno siete rimasti gli stessi tranne qualcuno che si è perso per strada e qualcun altro che è arrivato.

Grazie a Rossana e Tonino, mi ripeto, ma senza di voi non avrei potuto essere qua.

Grazie al Prof Barbarella e al Prof Gandolfi per il sostegno e l'aiuto in questo Dottorato.

Grazie a tutti i colleghi, Mogol-Gus-Zano-Luca-Pino-Chiara-Maretta-Luciano-Alessandra-Michela-Michaela-Prof Bitelli-Claudio-Cristian-Veronica in puro ordine casuale, compresi quelli che molto probabilmente mi sarò dimenticato.

Grazie a tutti gli amici, specialmente a Tiro-Lucia-Mapi-Simo-Davide, la tesi è finita, finalmente possiamo guardare insieme la MotoGP, (non dite che la guardavo lo stesso sennò qui mi scoprono...).

Ti ho lasciata per ultima perché sei la più importante... grazie Vale, per essere diventata la parte migliore della mia vita.