

GEOMATICA E GEOFISICA: I VANTAGGI DELL'INTEGRAZIONE

Alberto CINA (*), Manuele PESENTI (*), Chiara PORPORATO (*), Marco ROGGERO (*), Luigi SAMBUELLI (*)

(*) Dipartimento di Ingegneria del Territorio, dell'Ambiente e delle Geotecnologie, Politecnico di Torino
C.so Duca degli Abruzzi, 24 – 10129 Torino

Tel: 011 564 7630 / 7619 / 7687 / 7630 / 7665 – Fax: 011 564 7699

e-mail: alberto.cina@polito.it, manuele.pesenti@polito.it, chiara.porporato@polito.it, roggero@atlantic.polito.it, luigi.sambuelli@polito.it

Riassunto

Il caso in esame rappresenta uno studio interdisciplinare tra geofisica e geomatica finalizzato all'analisi della morfologia di alvei fluviali attraverso l'integrazione di differenti discipline e, conseguentemente, differenti tecnologie. In particolare sono oggetto di studio la caratterizzazione di sedimenti, dal punto di vista della loro composizione granulometrica, la ricostruzione dettagliata del battente d'acqua mediante tecniche di indagine sismiche ed elettromagnetiche, e la georeferenziazione dei suddetti dati geofisici. Sono state prese in esame differenti metodologie di posizionamento tipicamente di ambito geomatico in base alle caratteristiche di velocità di acquisizione e idonea precisione; questo al fine di garantire l'acquisizione da natante su tratti estesi del fondo alveo con elevata densità spaziale.

Abstract

A case study is presented concerning an integration between geomatics and geophysics techniques for morphological analysis of a river bed. Sediment characterization and water level reconstruction by seismic and electromagnetic technologies, are the aims of geophysical research, but a common georeferenzation between results from different techniques is necessary. Different technological applications, concerning only L1 receivers, and different calculation methodologies for geophysical detector positioning have been considered, in order to guarantee adequate acquisition velocity and precision for high density surveys long river segments.

1. Introduzione

Il caso qui presentato prende le mosse dallo studio applicato di metodologie elettromagnetiche multi-frequenza e a basso numero di induzione per la determinazione della morfologia e della composizione granulometrica del materiale di deposito di fondo alveo. Il rilievo è stato realizzato utilizzando un natante a motore a cui sono stati resi solidali un georadar (o GPR: *Ground Penetrating Radar*), un conduttivimetro elettromagnetico (GEM-2) e due antenne GPS a doppia frequenza.

I due ricevitori GPS sono stati utilizzati sia per determinare la posizione del natante per ogni istante di acquisizione, sia per conoscere l'assetto della barca ristretto al solo azimut.

Il rilievo GPS è stato condotto secondo l'approccio RTK in appoggio alla rete di stazioni permanenti presente in Piemonte cui è seguita una fase di calcolo in post-processamento per ricondurre le posizioni dei punti rilevati ai centri strumentali dei sensori geofisici.

Sono state svolte alcune considerazioni sui possibili vantaggi economici ottenibili dall'uso di ricevitori singola frequenza in rilievi come quello qui presentato e sui limiti spaziali di validità dell'applicazione della tecnica RTK.

2. Le misure geofisiche

2.1. Fasi operative di misura

Le campagne di misura sono state realizzate su un tratto del fiume Po a Torino (sup. 330 x 70 m) con l'uso di una barca a motore. In Figura 1 sono riportate le traiettorie seguite rilevate tramite GPS sovrapposte ad una porzione dell'ortofoto della zona del rilievo tratta dalla CTR.

Le misure sono state effettuate utilizzando:

- ✓ un GEM-2 (conduttivimetro elettromagnetico in multifrequenza);
- ✓ un I.D.S. RIS/0 k2 TR200 (georadar con antenna a frequenza centrale da 200 MHz);
- ✓ un TDR (Time Domain Reflectometry);
- ✓ un conducimetro ProfiLine-197 per le misure di conduttività e temperatura;
- ✓ due ricevitori GPS LEICA System 1200.

Le due antenne GPS sono state montate a poppa e a prua fissate su sostegni in resina al fine di garantire una maggiore visibilità dei satelliti e mantenute a 50 cm (a poppa) e 30 cm (a prua) dal natante. Il GEM-2 è stato collocato a prua, per limitare le interferenze con il motore, cui è particolarmente sensibile, mentre il radar è stato posizionato al centro della barca. Il rilievo è stato suddiviso in due fasi operative, distinte e consecutive, caratterizzate dall'utilizzo di differenti strumentazioni geofisiche.

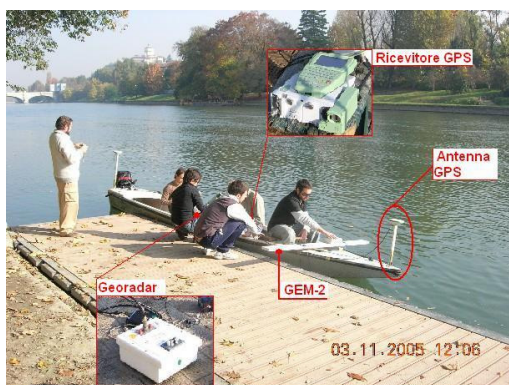


Figura 2: configurazioni strumentali per le due fasi del rilievo.

nella prima fase.

La sincronizzazione delle strumentazioni geofisiche e topografiche è stata realizzata grazie alla possibilità di interfacciamento dei sensori geofisici attraverso porta seriale standard. Il GEM-2 e il georadar, infatti, sono in grado di ricevere in ingresso il messaggio \$GGA del protocollo standard di navigazione NMEA, contenente l'informazione di posizionamento ed un riferimento temporale che vengono così in automatico associati in sincronia alla grandezza geofisica rilevata.

2.2. Acquisizioni con Georadar

Il principio su cui i rilievi georadar si basano riguarda la risposta di un segnale elettromagnetico di carattere impulsivo ad alta frequenza (10-2500 MHz) inviato da una antenna trasmittente. La presenza di discontinuità nelle proprietà elettromagnetiche di un materiale provoca fenomeni di rifrazione, riflessione e diffrazione dell'energia elettromagnetica incidente. In generale, si analizza la risposta

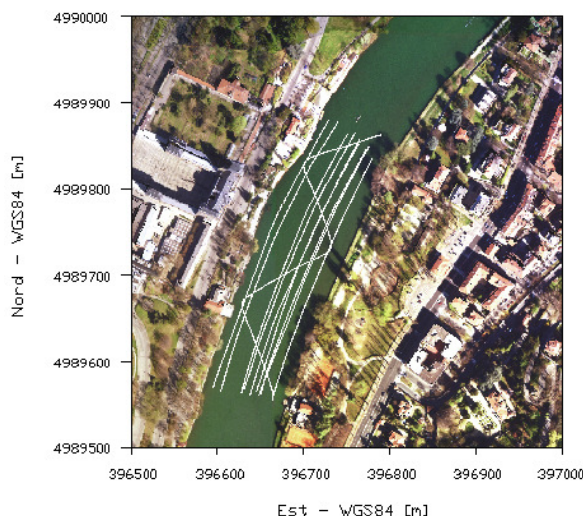


Figura 1: Tratto del fiume Po interessato dal rilievo e traiettorie seguite.

Durante la prima fase di acquisizioni si sono impiegati GEM-2 e georadar lungo percorsi paralleli alle linee di costa, effettuando in contemporanea misure GPS RTK. In una seconda fase si sono invece utilizzati il conduttivimetro ed il TDR, accoppiati ad un uso puntuale del GPS ancora in modalità RTK, effettuando misure di conduttività, temperatura e costante dielettrica dell'acqua con l'imbarcazione ferma in 15 posizioni differenti della superficie di fiume interessata dal rilievo. Operando in questo modo si è potuto georeferenziare secondo un unico sistema di riferimento e mappe di conducibilità e batimetria delle aree indagate, rendendole sovrapponibili e confrontabili, sia tra loro che con i modelli di composizione granulometrica e di caratterizzazione dei sedimenti ricavati nella prima fase.

della parte di energia che viene riflessa in corrispondenza delle discontinuità del mezzo e che ritorna in superficie, dove viene captata da una antenna ricevente.

Le principali applicazioni del georadar in geofisica ambientale riguardano l'individuazione di sottoservizi e strutture antropiche sepolte. In questo lavoro, l'utilizzo del GPR ha permesso di stimare la profondità del letto del fiume lungo tutta l'area d'indagine.

2.3. Acquisizione di dati da indagini di tipo elettromagnetico

I metodi elettromagnetici di indagine permettono la classificazione dei terreni e delle rocce attraverso la conducibilità dei materiali. Il metodo impiegato, *frequency sounding*, permette di variare il volume interessato nel sondaggio modificando la frequenza del segnale sorgente. Il GEM-2 è un conduttivimetro in cui la bobina trasmittente è posta ad una distanza fissa (1,66 m) da quella ricevente e lavora in un *range* di frequenze compreso tra 330 Hz e 48 kHz (fino a 15 in contemporanea).

La profondità massima d'indagine è funzione della conducibilità del terreno e del rumore elettromagnetico dell'ambiente circostante. In linea di massima si può stimare che il GEM - 2 possa arrivare fino a profondità di 30-50 m in terreni resistivi ($\rho > 1000 \Omega m$) e di 20-30 m in terreni conduttivi ($\rho < 100 \Omega m$). Attraverso l'uso di piccoli numeri di induzione B ($B = s/\delta \ll 1$), lavorando cioè con rapporti molto piccoli tra la distanza s tra le bobine e la profondità δ di penetrazione nel terreno (con $\delta \cong 500\sqrt{e/f}$, detta e la resistività), è possibile descrivere la conducibilità del terreno come semplice funzione della frequenza utilizzata, della distanza tra le bobine (emittente e ricevente) e della risposta elettromagnetica attraverso la relazione (McNeill 1980):

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega \mu_0 s^2} \left(\frac{H_s}{H_p} \right) \quad [1]$$

dette:

- ✓ H_s e H_p rispettivamente le componenti in quadratura del campo magnetico secondario e primario;
- ✓ σ_a la conducibilità apparente;
- ✓ μ_0 la permeabilità magnetica del vuoto;
- ✓ ω la frequenza espressa in radianti al secondo ($\omega = 2\pi f$, f : frequenza espressa in Hz).

Per una corretta interpretazione geofisica dei dati è molto importante conoscere la profondità a cui riferire il dato grezzo, quantità che dipende da molti fattori, quali: la sensitività del sensore, la precisione, le frequenze impiegate, il livello di disturbo elettromagnetico subito dal sensore, le sue proprietà elettromagnetiche e la distanza tra le bobine (Huang 2005).

Dato l'elevato livello di disturbo elettromagnetico dovuto alla presenza del motore del natante è stato usato un filtro passa-basso per tagliare le frequenze spaziali più elevate nel segnale ricevuto.

Nel caso in esame sono state utilizzate sei differenti frequenze di indagine, ottenendo sei diverse mappe di resistività. I risultati rilevati a frequenze più basse sono stati quelli caratterizzati da piccoli valori di resistività e maggior livello di disturbo.

2.4. Analisi e interpretazione dei dati di carattere geofisico

Dall'immagine (Figura 3) dove sono state sovrapposte le mappe di profondità e di apparente resistività è possibile notare la correlazione tra i dati ottenuti da batimetria (GPR), rappresentati dalle curve di profondità, e quelli da misurazioni di carattere elettromagnetico (GEM-2), rappresentati in base alla scala di grigi. Il picco di resistività, indicato dall'area più scura risulta infatti in corrispondenza della

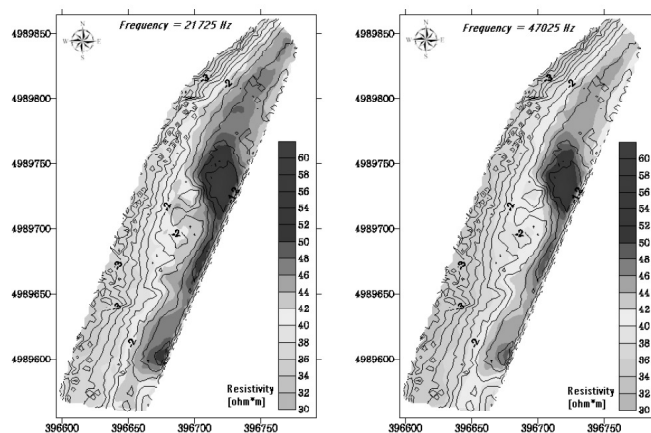


Figura 3: Mappe di profondità ed apparente resistività.

minore profondità.

Per avvalorare i risultati sperimentali ottenuti è stato predisposto a posteriori un campionamento ad hoc del fondale del fiume mediante una benna di Van Veen in dodici punti dell'area interessata dai rilievi. I risultati così ottenuti hanno confermato l'interpretazione dei dati ottenuti dal rilievo con GEM-2 una volta filtrati e corretti con i dati ottenuti da batimetria.

3. Georeferenziazione dei dati geofisici

Con l'obiettivo di poter riferire, anche se a posteriori, le misure geofisiche della prima fase direttamente ai centri strumentali di GEM-2 e georadar, e non ai centri di fase delle antenne GPS cui i posizionamenti RTK fanno riferimento, si è realizzata una rete locale planimetrica di misure all'interno della barca rilevando con bindella metrica le interdistanze tra le antenne GPS ed i vertici dei sensori geofisici.

I 10 punti interessati dalla rete rilevata sono stati:

- ✓ i centri di fase dell'antenna GPS di poppa (A1) e prua (A2);
- ✓ i quattro vertici del georadar (3, 4, 5 e 6) e i due estremi del conduttivimetro GEM-2 (7 e 8);
- ✓ i centri strumentali del radar (O9) e del conduttivimetro GEM-2 (O10).

Il sistema di riferimento locale bidimensionale, illustrato in Figura 4, è determinato dalla posizione di A1 arbitrariamente fissata e dalla direzione dell'asse delle ascisse che si sviluppa lungo la parallela alla congiungente i due centri di fase delle antenne GPS. La compensazione delle misure ha fornito precisioni sul posizionamento locale planimetrico dei punti di interesse comprese tra 7 e 38 mm. Dalle coordinate "doppie" (locali e globali) delle antenne GPS, con una rototraslazione si sono portati i centri strumentali in un sistema di riferimento globale WGS84.

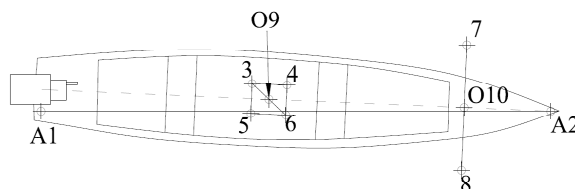


Figura 4: Schema della disposizione strumentale e rete di misure.

4. Trattamenti post-processing, vantaggi ottenuti e considerazioni conclusive

Nell'ottica di una ottimizzazione dei costi e delle tecnologie adatte ad indagini territoriali come quella in esame, sono state effettuate una serie di compensazioni dei dati GPS a posteriori considerando i dati grezzi, in singola e doppia frequenza, anche su basi formate con stazioni permanenti GPS a notevole distanza per valutare le possibilità di percorrere lunghi tratti di fiume. Da un punto di vista teorico, infatti, anche l'impiego di ricevitori a singola frequenza è in grado garantire posizionamenti con precisioni sub-metriche, spinte fino a qualche centimetro nel caso di soluzioni ad ambiguità fissata, generalmente possibili su *baseline* di lunghezza fino a 10-15 km. L'uso di basi lunghe, con osserva-

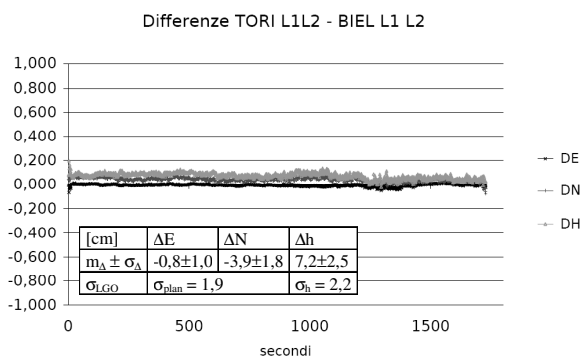


Figura 5: Scarti delle soluzioni con stazione master BIEL in L1, L2 e ambiguità fissata.

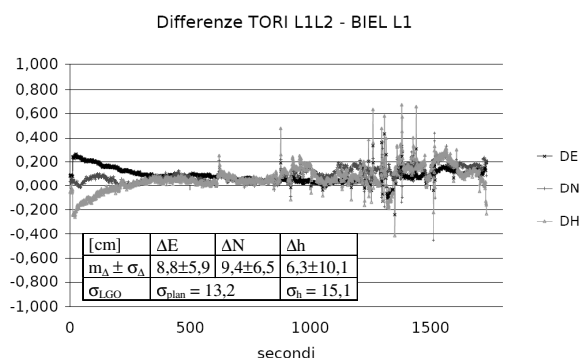


Figura 6: Scarti delle soluzioni con stazione master BIEL in L1 e soluzione float.

zioni in doppia frequenza, ha portato a considerazioni sulle potenzialità di copertura del metodo RTK e sui vantaggi che una soluzione di rete può avere rispetto alla configurazione classica *master-rover*.

La stazione di riferimento considerata per le compensazioni con basi lunghe (~70 km) è stata la stazione permanente GPS di Biella (nel seguito BIEL).

È importante sottolineare che, ai fini dell'applicazione, ricoprono particolare importanza: la tecnica di fissaggio degli interi, la presenza di stazioni permanenti GPS entro i limiti spaziali delle tecniche differenziali, e, in ultimo, la possibilità di soluzioni di rete, notoriamente in grado di ampliare tali limiti. Il trattamento dati è stato effettuato con vari software "commerciali" tra cui LGO di Leica Geosystems e, in parallelo, con un software sviluppato presso il DITAG (GAS: *Global Attitude System*, Roggero 2006) che, al momento limitatamente alla singola frequenza, permette il trattamento di dati GPS anche di sistemi multi-antenna.

È stata effettuata una compensazione a partire dai dati grezzi in doppia frequenza del rilievo cinematico considerando basi corte, aventi come master la stazione permanente di Torino. Questa soluzione è stata quella di riferimento per i trattamenti successivi e ha consentito il recupero una serie di posizionamenti cinematici, persi nell'acquisizione in tempo reale a causa di temporanee perdite del segnale di correzione RTK. L'elaborazione con LGO ha mostrato la coincidenza dei valori delle coordinate RTK con quelle a posteriori. Anche da elevate distanze dalla SPGPS (70 km) è stato possibile arrivare ad una soluzione a interi fissati: i sistematismi di pochi centimetri, rilevati nei posizionamenti con basi sulla stazione di Biella in doppia frequenza sono dovuti a bias residui imputabili alla grande distanza tra le stazioni (Figura 6). Essi non sono evidentemente eliminabili solo alle doppie differenze, ma possono essere modellati in una NRTK. Si noti come l'errore planimetrico sia sulla componente Nord che è quella prevalente delle basi su BIEL.

Qualche considerazione va fatta elaborando la sola L1, disponibile su ricevitori palmari di costo minore di quelli geodetici. Analizzando la soluzione con diversi programmi commerciali notiamo in qualche caso difficoltà di fissaggio degli interi e soluzione FLT anche su basi corte con precisioni decimetriche (Figura 7). Ciò è ottenibile anche a grandi distanza (Figura 8). Queste precisioni possono già essere soddisfacenti per il posizionamento di sensori geofisici. Gli sqm degli scarti sono paragonabili a quelli ottenibili dalla compensazione GPS.

In altri casi la soluzione FIX è stata raggiunta in singola frequenza con scarti rispetto alla traiettoria di riferimento variabili da pochi mm ad alcuni metri, sintomatici di un errato calcolo degli interi.

Quello che si è notato nel confronto tra i trattamenti dati dei diversi software applicati è che le osservazioni GPS cinematiche soffrono il problema della robustezza, specie operando in ambienti ove sono più frequenti le interruzioni del segnale (foreste, zone urbane, ecc). La soluzione cinematica delle ambiguità di fase può essere migliorata, aggiungendo ipotesi stocastiche sulla cinematica dell'oggetto in moto e vincoli sulla geometria del sistema multi-antenna. Gli algoritmi implementati nel software GAS consentono di tener conto di queste due opzioni nella post-elaborazione delle osservazioni GPS, cosa normalmente non possibile utilizzando software commerciali.

L'introduzione di un modello stocastico del moto e di vincoli geometrici ha come effetto la riduzione del volume di ricerca delle ambiguità, il miglioramento di alcuni parametri (quali ADOP e *Success Rate*), l'aumento della robustezza rispetto ai *cycle slip*, e la riduzione dell'effetto del rumore di misura sui parametri stimati (Roggero, 2006).

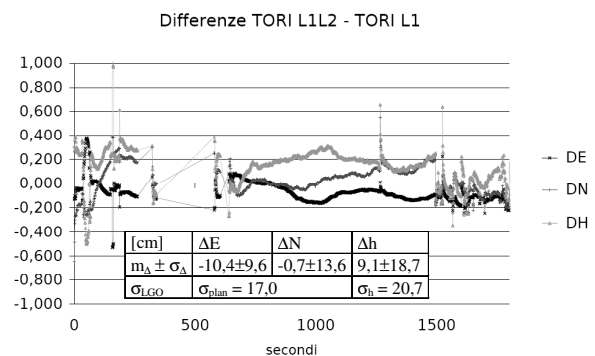


Figura 7: Scarti delle soluzioni con stazione master TORI in L1 e soluzione float (LGO)

Il software GAS è stato progettato per trattare osservazioni GPS a singola frequenza, su basi corte (2-10 km) e può elaborare i dati in approccio *multibase*, permettendo anche di vincolare la lunghezza di base tra le antenne. L'approccio minimi quadrati *batch* permette di imporre vincoli statici alle osservazioni cinematiche che migliorano la robustezza del sistema e la percentuale di fissaggio dei *cycle slip*, sebbene la precisione globale del sistema stesso non migliori di molto.

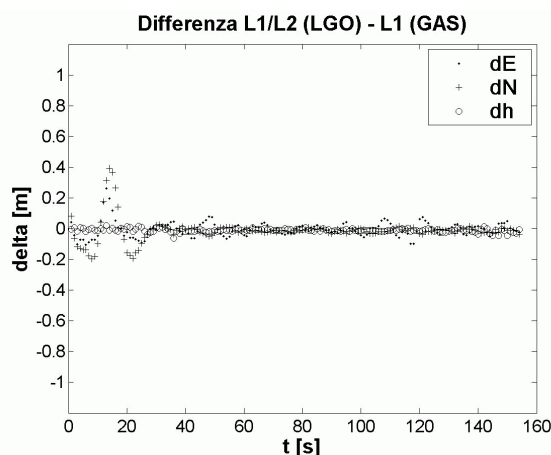


Figura 8: Scarti tra la soluzione di GAS in singola frequenza e la soluzione di riferimento

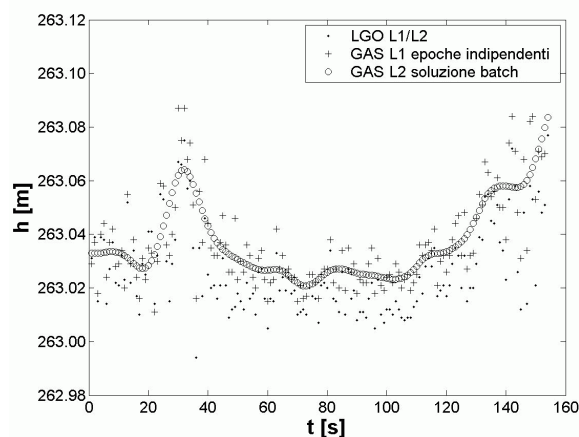


Figura 9: Raffronto di diverse soluzioni nella loro componente altimetrica

Il grafico in Figura 8 rappresenta gli scarti tra la soluzione di riferimento e quella ottenuta col software GAS in singola frequenza: le ambiguità di fase risultano correttamente fissate. In Figura 9 invece è possibile apprezzare l'influenza del modello cinematico nella compensazione, si osserva, infatti, una sostanziale congruenza tra la soluzione L1/L2 di LGO e la soluzione L1 di GAS ad epoche indipendenti ed un lisciamento della soluzione, coerentemente con la componente stocastica del modello cinematico. Comportamento, quest'ultimo, prevedibile ricordando che la soluzione *batch* equivale all'applicazione consecutiva di un filtro di Kalman e di un'operazione di *smoothing*.

5. Conclusioni

La precisione cinematica sul posizionamento di sensori geofisici è raggiungibile con misure cinematiche anche su lunghe basi: in questo caso reti RTK sono utili per modellare *bias* non eliminabili alle differenze doppie. Se la precisione centimetrica può sembrare eccessiva, l'alternativa DGPS di solo codice potrebbe però non essere sufficiente. Soluzioni cinematiche singola frequenza possono presentare precisioni analoghe a quelle L1/L2, su basi corte, a patto di adottare metodi di fissaggio degli interi particolarmente "robusti", specie in presenza di dati disturbati. Soluzioni in sola L1 con ambiguità non fissata hanno mostrato precisioni decimetriche, compatibili con le richieste geofisiche.

Bibliografia

- Roggero M., 2006, *Kinematic GPS batch processing, a source for large sparse problems*, Hotine Marussi Symposium on Theoretical and Computational Geodesy, Wuhan.
- A. Biasion, A. Lingua, M. Piras, C. Porporato, Rilievo di alvei fluviali in RT mediante misure GPS in modalità Multi Reference Station. (SIFET 2004)
- McNeill J.D., 1980, "Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers", *Technical Note TN-6 Geonics Limited*, Mississauga.