



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

**ANALISI DI SERIE TEMPORALI DI RETI DI
MONITORAGGIO GPS GESTITE DA ISPRA IN ITALIA
MERIDIONALE**

DOTT.SSA ANGELA ERRICO

TUTOR: DOTT.SSA PIERA GAMBINO

DOTT. STEFANO CALCATERRA

COTUTOR: ING. KATIA MERLI

DATA	FIRMA STAGISTA	FIRMA TUTOR	FIRMA RESPONSABILE SERVIZIO

“Analisi di Serie Temporal di Reti di Monitoraggio GPS gestite da ISPRA in Italia Meridionale”

Abstract

Le reti integrate di monitoraggio permanente GPS-geotecnico, in aree in frana, rappresentano uno dei campi di applicazione del Servizio Geofisica del Dipartimento Difesa del Suolo di ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale).

Obiettivo del presente lavoro è l'analisi delle serie temporali ottenute dall'elaborazione dei dati GPS con software di gestione automatico (Leica Spider) di reti GPS, e da un'elaborazione con software commerciale (Trimble Total ControlTM).

La rete analizzata controlla un'area urbanizzata, nei pressi dell'abitato di Lago in provincia di Cosenza e costituisce un sistema integrato di controllo meteorologico-geodetico-geotecnico per il monitoraggio da remoto di versanti in dissesto, con possibili evoluzioni ad elevato rischio.

Dalla sperimentazione condotta scaturiscono interessanti informazioni utili alla definizione di modalità di configurazione dei sistemi di elaborazione dei dati derivati dal monitoraggio di aree in frana, per applicazioni in condizioni di emergenza a fini di protezione civile in casi di movimenti di versante.

Integrated permanent monitoring network, such as geodetic-GPS ones, in landslide area, represent one of the Study proposed by Servizio Geofisica-Dipartimento Difesa del Suolo di ISPRA (Institute for Environmental Protection and Research).

Aim of this paper is the analysis of time series from GPS data processing by automatic software(SW Spider) and commercial software (SW Trimble Total Control) .

The analyzed network controls an urbanized area, in the neighbourhood of the Lago Town in the Cosenza district, and consists in a integrated monitoring system from remote of zones at highly risk.

From this study interesting information are discussed about the configuration of elaboration system of the monitoring landslide data, to provide application in warning conditions for civil protection.

Prefazione

A seguito dell' evento Sarno (maggio 1998), il quadro legislativo nazionale e regionale in materia di protezione dal rischio idrogeologico ha conosciuto una forte accelerazione. La Legge n.267/98, nel delineare le principali azioni da intraprendere a difesa del territorio, individuava nel potenziamento delle reti di monitoraggio idro-metro-pluviometrico uno degli strumenti per conseguire le azioni di previsione e prevenzione. Il successivo DPCM 15 dicembre 1998 proponeva l'avvio di reti sperimentali frane nell'ambito di bacini campani, calabro-lucani, triveneti e del Po. Il Servizio Geologico di Nazionale (confluito in Apat e oggi in ISPRA) ha così realizzato due reti di monitoraggio GPS-geotecnico rispettivamente in territorio calabro, nel comune di Lago (CS), e in Basilicata, alla periferia est di Potenza. La realizzazione è frutto di una stretta collaborazione tra il Servizio e il Dipartimento della Protezione Civile da un lato e le istituzioni a livello regionale con compiti delegati alla pianificazione e gestione del Territorio dall'altro (Regione Basilicata e Autorità di bacino regionale della Calabria). Il progetto si è avvalso anche del supporto scientifico dell'Università della Basilicata e del CNR-IRPI di Cosenza.

Oggetto della presente tesi è la rete di monitoraggio permanente denominata "di Lago" in Calabria, che ha come obiettivo il controllo dei movimenti su un versante, su cui si estendono le frazioni di Greci e Piscopie, coinvolto da una Deformazione Gravitativa Profonda. Obiettivo di questo lavoro è il confronto tra le soluzioni ottenute dal processamento dei dati GPS con software di gestione automatico di reti GPS e con software commerciale. Tra le strategie utilizzate l'una predilige l'automazione e la gestione amichevole del processamento dei dati, utile in situazione di emergenza, l'altra ha l'obiettivo di conseguire risultati più accurati nella determinazione degli spostamenti a scapito dell'immediatezza dell'informazione. A tale scopo sono confrontati rispettivamente software di gestione automatica di reti GPS (Leica Spider), software commerciali di post processamento dei dati di livello elevato (Trimble Total ControlTM). Il confronto viene quindi affrontato in termini di coordinate e accuratezza dei risultati tra le diverse soluzioni ottenute. La sperimentazione condotta in questo lavoro fornisce una valutazione di informazioni utili alla definizione di modalità di configurazione dei sistemi di elaborazione dei dati, per applicazioni in condizioni di emergenza a fini di protezione civile in casi di movimenti di versante.

Indice

I.	ABSTRACT
II.	PREFAZIONE
III.	INTRODUZIONE
IV.	METODOLOGIA
1	CAPITOLO 1. DESCRIZIONE DELLA RETE GEODETICA
1.1	STATO DELL'ARTE
1.1.1	STAZIONI PERMANENTI IN ITALIA; LA RETE DI INQUADRAMENTO NAZIONALE
1.2	RETE DI MONITORAGGIO DI LAGO
2	CAPITOLO 2. IL SISTEMA SATELLITARE GPS
2.1	IL SISTEMA NAVSTAR GPS (NAVIGATION SATELLITE TIMING AND RANCING GLOBAL POSITIONING SYSTEM)
2.2	MISURE DI PSEUDORANGE
2.2.1	ALGORITMO DI NAVIGAZIONE
2.3	DIFFERENTIAL GPS
2.4	IL SEGNALE GPS
2.5	RICEVITORI GPS
3	CAPITOLO 3. DESCRIZIONE DEI SOFTWARE
3.1	LEICA GNSS SPIDER
3.2	TRIMBLE TOTAL CONTROL
3.2.1	CARATTERISTICHE PRINCIPALI
4	CAPITOLO 4. ELABORAZIONI CON TTC
4.1	MONITORAGGIO DELLE DEFORMAZIONI IN CONTINUO
4.1.1	ELABORAZIONI E ANALISI DELLE SESSIONI A 24 ORE
4.1.2	ELABORAZIONI E ANALISI DELLE SESSIONI REAL TIME
5	CAPITOLO 5. ANALISI DEI RISULTATI E CONCLUSIONI
6	BIBLIOGRAFIA

Introduzione

Il sito di Lago, nella provincia di Cosenza è oggetto di monitoraggio integrato permanente geodetico e geotecnico da parte del Servizio Geofisica di ISPRA in collaborazione con il CNR-Irpi di Cosenza dal 2007.

L'area in esame è interessata da una fenomenologia di frana che coinvolge un versante relativamente esteso, in parte urbanizzato, con condizioni litologiche e idrogeologiche tutt'altro che concorrenti a determinare una sua stabilizzazione globale o locale. Di qui l'importanza di procedere alla completa realizzazione della rete di monitoraggio integrata permanente GPS e geotecnica. Nella presente tesi sono trattati i dati GPS provenienti dalla rete di monitoraggio permanente acquisiti e trasmessi ad un centro di calcolo *in situ* ubicato presso il Comune di Lago.

Lo studio della Deformazione Gravitativa di Versante (DGPV) presso Lago, in corso dal 1996¹, si è focalizzata sulla definizione di un modello di evoluzione in grado di cogliere gli aspetti essenziali delle complesse interazioni che esistono fra le diverse tipologie di instabilità presenti. A tal fin, sono stati avviati e sviluppati nel corso di alcuni anni studi geologico-strutturali, geomorfologici e geotecnici tesi ad individuare gli aspetti tipici e ad acquisire gli elementi necessari alla definizione di modelli utilizzabili per la simulazione dei processi che governano la stabilità del versante². Fra gli studi richiamati riveste particolare rilievo, anche per i tempi necessari ad avere misure per un periodo significativo, il monitoraggio degli spostamenti superficiali e profondi. Per quanto concerne gli spostamenti superficiali, il Servizio Geofisica di ISPRA ha quindi predisposto una rete di monitoraggio geodetico costituita da numerosi capisaldi GPS disposti lungo il versante che, sulla base delle indicazioni desunte dalle misure man mano acquisite, si è evoluta nel tempo. Tale rete si articola in punti di misura periodici e permanenti sul corpo di frana e in punti esterni al dissesto tali da costituire i riferimenti per la misura degli spostamenti. L'effettiva capacità di tale rete è anche di fornire elementi caratterizzanti la cinematica delle deformazioni e i parametri utilizzabili nella individuazione di soglie di preallarme. Un ulteriore contributo è rappresentato dallo studio di procedure di elaborazione più facili per l'utente ma contemporaneamente affidabili, paragonando dunque metodologie commerciali e scientifiche³.

¹ Antronico et alii, 1999

² Gullà et alii, 2003

³ Merli K., 2001



Figura 1: versante di Lago interessato dalla DGPV; in primo piano la storica frana "Pizzotto"

Il contributo portato da tale tesi è il confronto tra differenti strategie di elaborazioni di dati GPS attraverso differenti procedure di analisi. Tra le strategie utilizzate:

- una predilige l'automazione e la gestione amichevole del processamento dei dati, utile in situazione di emergenza;
- le altre hanno l'obiettivo di conseguire risultati più accurati nella determinazione degli spostamenti a scapito dell'immediatezza dell'informazione.

A tale scopo sono confrontati rispettivamente software di gestione automatica di reti GPS, *Leica Spider*, e software commerciale di post processamento dei dati di livello elevato, *Trimble Total ControlTM*.

Il confronto viene quindi affrontato in termini di coordinate e accuratezza dei risultati tra le diverse soluzioni ottenute.

La precisione dei risultati delle analisi di reti di monitoraggio GPS permanenti con i software *Leica Spider* e *Trimble Total ControlTM*, risultano dell'ordine del sub-centrimetro.

Dunque, il software commerciale, oltre a presentare una semplicità e una rapidità notevole nelle misure, si presta in maniera soddisfacente alla gestione e al coordinamento degli schemi applicativi di monitoraggio per la valutazione della vulnerabilità ambientale in situazioni di rischio.

Metodologia

Lo studio svolto durante lo stage riesamina i risultati del monitoraggio geodetico, tramite strumentazione GPS, delle zone interessate dalla frana di Lago (CS). In particolare, questo

lavoro si basa su dati acquisiti negli ultimi tre anni dalle stazioni permanenti della *Rete di Lago*, avviata nel luglio 2007. La rete è stata progettata prevedendo un centro di elaborazione dei dati in automatico tramite il software Spider della Leica installato presso il Comune di Lago (CRED di Lago), dove è posizionata anche la stazione *Master* e alcune stazioni di controllo ubicate lungo il versante in frana.

Lo stage è stato articolato in più fasi, come segue:

1. ricerca della documentazione iniziale in letteratura del fenomeno, attingendo fonte a pubblicazioni su riviste, su atti di convegni, siti internet e ricerche della stessa ISPRA su campo;
2. raccolta di tutti i dati GPS delle stazioni permanenti disponibili presso il CRED di Lago e Roma;
3. controllo delle informazioni contenute nei file di dati GPS (altezza dell'antenna, tipo e numero seriale di ricevitore etc.) per verificare se queste corrispondessero a quelle contenute nei fogli di campagna o nei file log delle stazioni permanenti;
4. per i file RINEX, i cui *header* erano errati a causa di alcune vicissitudini relative all'inversione di alcuni dati ricevuti, si è proceduti alla correzione manuale di *marker name*, *number name* e coordinate approssimate;
5. produzione dei file di dati RINEX a partire dai dati grezzi;
6. recupero dei dati acquisiti dal sistema in tempo reale, al fine di creare una serie storica di dati elaborati con sessioni giornaliere;
7. elaborazione dei dati con il software Trimble Total ControlTM.

Al fine di ottenere serie temporali a 24h il più possibile complete, in alcuni casi, è stato necessario concatenare i file acquisiti in *real time* (RT), aventi generalmente sessioni variabili tra i 5 minuti e le 2 ore, utilizzando il software *Leica GNSS QC o*, in altri casi, si è provveduto a utilizzare file *raw* (dati grezzi) trasformandoli in formato RINEX utilizzando *TeQC* (*Translation, Editing, Quality Check*) e procedendo successivamente all'elaborazione completa con Trimble Total ControlTM.

Durante lo svolgimento dello stage è stato affrontato anche l'utilizzo del *software scientifico Bernese 5.0*.

L'obiettivo iniziale era quello di utilizzare tale software per il confronto delle soluzioni elaborate con il software commerciale.

Tuttavia, a seguito dell'evento sismico aquilano, il Servizio Geofisica di ISPRA è stato impegnato nell'elaborazione dei dati GPS acquisiti nella Regione Abruzzo, pertanto nell'ambito dello stage è stata seguita la predisposizione dei dati e la configurazione del software Bernese 5.0 per l'elaborazione dei dati suddetti.

Capitolo 1.

Descrizione della rete geodetica permanente

1.1 Stato dell'arte

La *rete GPS di Lago* è stata realizzata per monitorare i diversi fenomeni di frana, profondi e superficiali che si sviluppano lungo un versante prospiciente l'abitato di Lago e coinvolgono le frazioni di Greci e Piscopie. Questo versante, interessato nell'area a nord di Piscopie dalla storica frana Pizzotto, è monitorato dal 1996 dal Servizio Geofisica di ISPRA, con campagne di misura GPS periodiche. Lungo tale versante, affiorano rocce metamorfiche di basso grado, intensamente fratturate, affette da numerose instabilità sia superficiali sia profonde, già in passato più volte mobilizzate⁴. Il movimento di massa principale è riconducibile a una Deformazione Gravitativa Profonda di Versante (DGPV), tipo Sackung, che coinvolge gran parte del versante in prossimità della già citata frana Pizzotto, cui si sovrappongono diffuse fenomenologie più superficiali.

Gli studi, che da più di 10 anni il Servizio Geofisica ha in corso in quest'area con il CNR Irpi di Cosenza, hanno come obiettivo generale la definizione di un modello di evoluzione del versante Pizzotto-Piscopie-Greci in grado di cogliere gli aspetti essenziali delle complesse interazioni fra le diverse tipologie di instabilità presenti nell'area. A tal fine sono stati avviati e sviluppati studi geologico-strutturali, geomorfologici e geotecnici tesi ad acquisire gli elementi necessari alla definizione di un quadro conoscitivo esauriente e ad individuare, quindi, gli aspetti tipici delle fenomenologie di instabilità presenti nell'area di Lago. In particolare, l'area di interesse, fin dal febbraio 1996, è stata sottoposta ad un monitoraggio superficiale tramite una rete GPS periodica che negli anni ha subito una continua implementazione arrivando fino a numero di 20 punti di monitoraggio periodico. Nella configurazione definitiva della rete si è deciso, in particolare, di effettuare misure in modalità statica anche in corrispondenza di verticali inclinometriche realizzate nel corso delle indagini geotecniche. A tal fine è stato realizzato un adattatore che ha consentito il posizionamento del caposaldo tridimensionale alla testa della verticale inclinometrica⁵

Il progetto “*reti integrate di monitoraggio permanente GPS-geotecnico*” partito nel 2007 ha previsto l'installazione all'interno dell'area in frana di Lago di cinque stazioni GPS di

⁴ Sorriso Valvo et al., 1999

⁵ Antronico et al., 1999; Gullà et al., 2003, 2007

controllo in acquisizione continua e di una stazione di riferimento (*Master station*) ubicata su un edificio situato in un'area stabile⁶. La stazione Master è dotata di antenna *choke ring* e ricevitore in grado di ricevere anche il segnale Glonass. Inoltre, a completamento della rete il progetto ha previsto 10 vertici GPS a misura periodica, materializzati con capisaldi a centrimento forzato.

Le coordinate della stazione di riferimento sono inquadrare nel sistema **ITRF2000** e la posizione è periodicamente controllata rispetto alle stazioni permanenti della rete **EUREF**. Le stazioni di controllo permanenti, dotate di strumentazione di tipo geodetico a doppia frequenza, sono realizzate, in alcuni casi, in prossimità delle verticali geotecniche, con pilastri in cemento armato oppure su manufatti. Pannelli fotovoltaici collegati a una batteria tampone garantiscono a tutte le stazioni di controllo l'alimentazione autonoma. Tutte le procedure di gestione remota dei ricevitori, trasferimento dei dati grezzi (*raw data*), controllo di qualità dei dati, creazione dei file in formato RINEX e archiviazione sono eseguite in automatico dal software di gestione, *Spider* di Leica, presente sia presso il

Centro di Raccolta Elaborazione e Controllo (**CRED di Roma**) nella sede del Servizio Geofisica a Roma in Via Curtatone, sia presso il Centro Locale di Controllo (**CRED di Lago**) ubicato nei locali del Comune di Lago. Tale software, infine, esegue automaticamente l'elaborazione dati, determinando le soluzioni giornaliere di ciascun punto di controllo rispetto alla stazione Master, considerata fissa.

Una rete di monitoraggio profondo, progettata e gestita dal CNR-IRPI di Cosenza, costituita da 6 verticali inclinometriche e 7 piezometri (piezometri di Casagrande e celle piezometriche) completa il sistema di controllo.

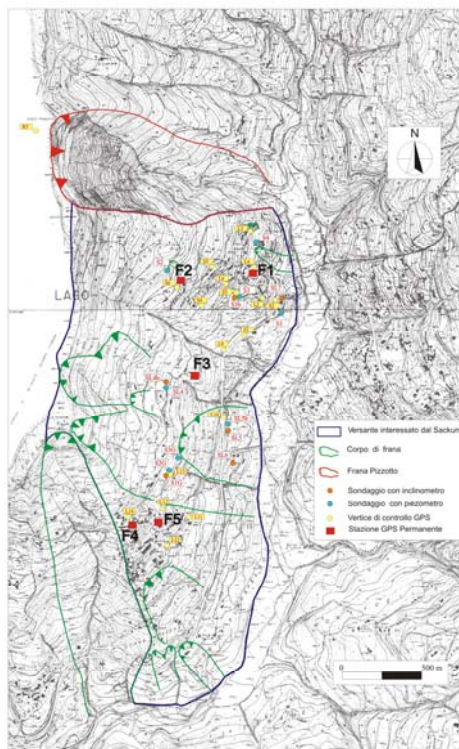
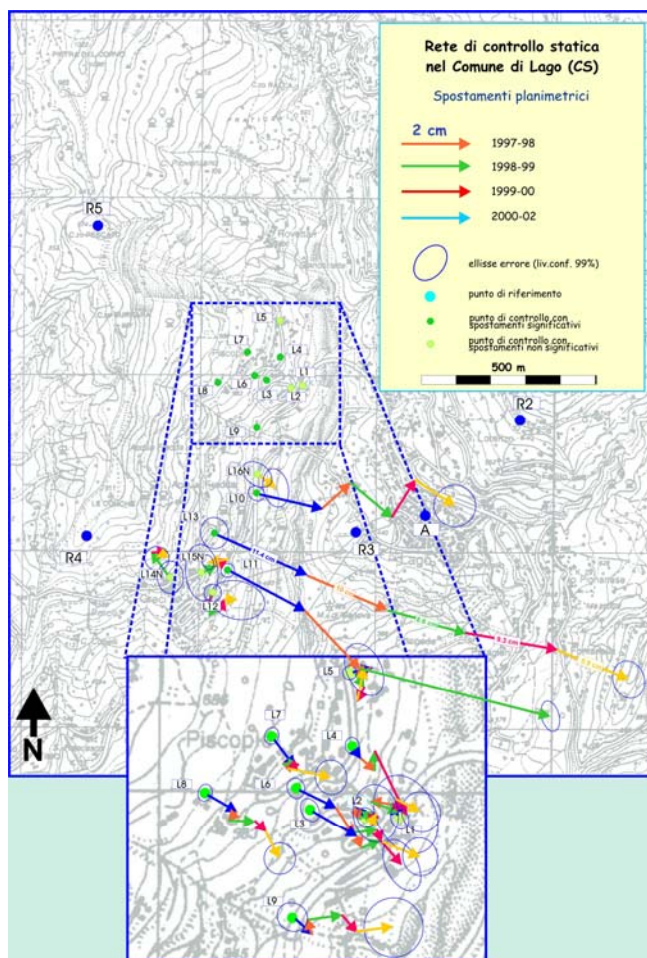


Figura 2: rete di monitoraggio integrato di Lago e principali elementi geomorfologici

⁶ Calcaterra et al., 2008



Dalle analisi precedenti, i movimenti registrati dalle misure su più di 20 vertici GPS a monitoraggio periodico⁷, unitamente a quelli profondi, hanno evidenziato negli anni un complesso quadro di deformazione permettendo di discretizzare settori a differente cinematismo e di ubicare le stazioni GPS permanenti in siti considerati rappresentativi di aree a comportamento omogeneo. Per il settore di Piscopie si distingue una porzione sud-occidentale in cui sono stati registrati spostamenti superiori a 6 mm/y e una porzione nord-orientale dove i movimenti non sono significativi (L5, L1, L2). Diversamente per l'abitato di Greci

dove la porzione

Figura 3: vettori spostamento calcolati per i punti di misura GPS periodici (⁸)

settentrionale dell'abitato è caratterizzata da spostamenti evidentemente maggiori, con velocità di spostamento pari a 5-10 cm/anno e direzione di movimento verso ESE.

Nella zona geograficamente intermedia di Acquafredda si osservano movimenti verso E, con velocità di spostamento variabili tra 0,5 e 2,5 cm/anno, L10, L16N.

Le conoscenze geologiche e morfologiche dell'area, i risultati ottenuti negli anni riguardo al cinematismo in atto e non ultimi le problematiche legate al livello di urbanizzazione hanno guidato la scelta dei siti ad accogliere la monumentazione di stazioni GPS fisse.

La Figura 4 mostra l'area di frana in cui sono posizionate le 6 stazioni permanenti e le 10 stazioni periodiche.

⁷ Gullà et al., 2007

⁸ Bonci et alii, 2005

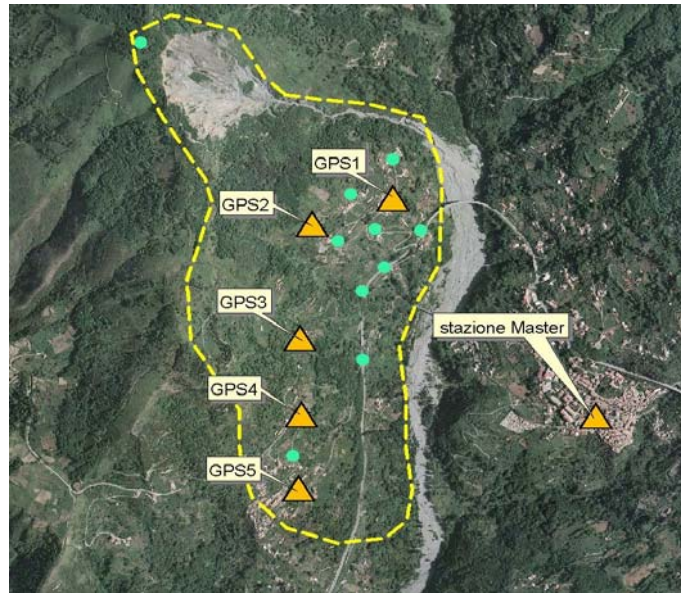


Figura 4: frana di Lago: i triangoli indicano le stazioni permanenti di controllo(GPSn) e di riferimento (Master); i pallini verdi indicano le 10 stazioni periodiche

1.1.1 Stazioni permanenti in Italia: la rete di inquadramento nazionale

Una stazione GPS permanente consiste in un ricevitore GPS che staziona costantemente sullo stesso sito. L'architettura di una tale stazione dipende, in alcuni casi, dalla particolare applicazione, nel caso più generale, però, si traduce in una antenna, nel ricevitore vero e proprio e in un computer di controllo dell'intero sistema, che consente tra l'altro, il monitoraggio da remoto del ricevitore GPS e il salvataggio locale dei dati acquisiti⁹.

La determinazione delle coordinate di una serie di punti in un sistema di riferimento comune è stata eseguita in Italia dall'Istituto Geografico Militare, in Europa dai vari Enti che hanno costruito il sistema di riferimento **EUREF** (*EUropean REference Frame*) ed a livello globale dall'**IGS** (*International GPS Service*) che determina le coordinate dei vertici che danno luogo al sistema di riferimento **ITRS** (*International Terrestrial Reference System*).

Dal 1988 ad oggi sono stati definiti ben undici sistemi di riferimento terrestre (*International Terrestrial Reference Frame* – **ITRF**), con denominazioni che vanno da ITRF88 a ITRF2005, rilasciate dal Servizio Internazionale per la Rotazione della Terra (*IERS International Earth Rotation Service*). ITRF è un sistema cartesiano tridimensionale legato ai parametri gravitazionali della Terra. La Terra cambia forma continuamente e per

⁹ Sansò et al., 2001

la comprensione di tali cambiamenti si fa generalmente riferimento ai movimenti della crosta rispetto ad un sistema di riferimento. Un *frame* di riferimento terrestre è connesso alle coordinate di alcuni punti localizzati sulla superficie terrestre. Attualmente quattro principali tecniche geodetiche sono utilizzate per il calcolo accurato delle coordinate dei punti di riferimento, il GNSS (*Global Navigation Satellite System*), VLBI (*Very Long Baseline Interferometric*), lo SLR (*Satellite Laser Ranging*) e il DORIS (*Doppler Orbitography by Radiopositioning Integrated on Satellite*). Il sistema ITRF individuato dalla determinazione delle coordinate dei punti di riferimento, è continuamente aggiornato seguendo l'evolversi di tali tecniche e di tali strumenti. Questi punti sono inoltre utilizzati per misurare gli spostamenti delle placche tettoniche oppure per misurare fenomeni di subsidenza e vengono utilizzati anche per le misurazioni della rotazione della massa terrestre nello spazio. Quest'ultima è definita con riferimento ad un altro sistema legato alle stelle, chiamato *Celestial Reference Frame*. Per ridurre al minimo gli errori nell'orientamento della rotazione globale, dovuti alla evoluzione temporale della crosta terrestre, lo IERS nel primo ITRF88 si appoggiò al sistema definito dal BIH (*Bureau Internationale de l'Heure*) denominato *Conventional Terrestrial System* con il suo **Conventional Terrestrial Pole** (CTP) 1984.0. Da allora è sempre stato adottato lo stesso sistema, anche se lo IERS cambiò il nome CTP in *International Reference Pole* (IRP). Dal punto di vista prettamente storico c'erano state altre definizioni precedenti, in particolare il primo tentativo di definire un *Terrestrial Reference Frame* (TRF) risale al 1905 con il *Conventional International Origin* (CIO) dove l'orientamento principale dell'asse Z della Terra fu definita dall' *International Latitude Service* utilizzando 6 anni di osservazioni tra il 1900 e il 1905. Il BIH definì poi all'epoca 1984.0 il successivo TRF, conosciuto oggi appunto come CTS Epoch 1984.0.

L' *International Earth Rotation Service* (**IERS**) prese il posto del BIH nel 1988 e procedette a realizzare quindi il primo TRF rilasciato sotto il nome ITRF88¹⁰. Successivamente IERS rilasciò sei riferimenti ITRF89, ITRF90, ITRF91, ITRF92, ITRF93, e ITRF94 nei successivi 6 anni. Dopo una breve interruzione vennero definiti i dataset ITRF96 e ITRF97. Gli ultimi due rilasciati sono rispettivamente il **ITRF2000** e il **ITRF2005**.

Nella riunione di Firenze del 1990, la sottocommissione IAG¹¹ per il sistema di riferimento europeo (EUREF – *European Reference Frame*) ha raccomandato di adottare in Europa un

¹⁰ [6]

¹¹ Maseroli, 2007

sistema di riferimento legato all'ITRS epoca 1989.0, stabilmente fissato alla placca tettonica euro-asiatica: ETRS89 *European Terrestrial Reference System 89*.

Così definito l'ETRS89 può essere realizzato utilizzando le realizzazioni ITRS: per ogni riferimento ITRF_{yy} si definisce un corrispondente riferimento in ETRS89 denominandolo ETRF_{yy}. Ad oggi sono state rese disponibili ETRF89, ETRF90, ETRF91, ETRF92, ETRF93, ETRF94, ETRF96, ETRF97, ETRF2000 e ETRF2005.

Il Technical Working Group EUREF raccomanda di non utilizzare lo ETRF2005 bensì lo ETRF2000 come riferimento convenzionale del sistema ETRF89. Dal 1° Gennaio 2009 l'Istituto Geografico Militare italiano ha adottato il nuovo riferimento ETRF2000.

1.2 Rete di monitoraggio di Lago

Attualmente, la rete permanente di Lago è costituita nel suo complesso da 6 stazioni di misura di cui una di riferimento, ubicata sull'edificio comunale di Lago (stazione Master), e le altre di controllo all'interno della porzione di territorio occupata dalla DGPV. Le stazioni F1 e F2 sono state realizzate nell'abitato di Piscopie, la stazione F3 nell'area denominata di Acquafredda, F4 e F5 nell'abitato di Greci. Esse sono tutte monumentate con un pilastro in



Figura 5: Stazione permanente F3

cemento armato. L'alloggiamento della strumentazione è stato predisposto in un pozzetto prefabbricato interrato con apertura a piano campagna (Figura 5), ad eccezione della

stazione F4 per la quale il mobiletto in cui si trova la strumentazione è fissato a un muro di sostegno. La stazione Master, alimentata dalla rete, è alloggiata all'interno dell'edificio comunale, dove si trova il Centro Locale di Controllo costituito da un computer del tipo industriale, il modem GSM e i radio modem in numero pari a quello delle stazioni di controllo, mentre la comunicazione con il CRED di Roma avviene tramite linea ADSL. Ciascuna stazione di controllo è strutturata in maniera tale da poter comunicare con la stazione Master con una duplice modalità ovvero radio modem e modem GSM, permettendo di gestire la modalità di acquisizione in tempo reale e al contempo di controllare e comunicare dal CRED di Roma con le singole postazioni.

<i>Stazione</i>	<i>Ricevitore</i>	<i>n° seriale</i>	<i>Tipo di antenna</i>
Lago	LEICA GRX1200GGPRO	352244	LEIAT504 LEIS
F1	LEICA GRX1200	463557	LEIAX1202GG
F2	LEICA GRX1200	463559	LEIAX1202GG
F3	LEICA GRX1200	463545	LEIAX1202GG
F4	LEICA GRX1200	463551	LEIAX1202GG
F5	LEICA GRX1200	463547	LEIAX1202GG

Tabella 1: strumentazione usata per le stazioni di Lago

All'inizio, tutte le stazioni furono impostate con un'acquisizione in modalità di streaming continuo di un secondo. I dati così trasmessi al Centro Locale di Lago sono automaticamente elaborati con sessioni di durata variabile in funzione dell'area controllata e dei movimenti attesi nei vari periodi dell'anno (da 30 min a 24 ore) e i movimenti sono rappresentati su grafici da un apposito modulo. Contemporaneamente i grafici e i dati sono trasferiti al CRED di Roma. La necessità di gestire contemporaneamente più modalità di acquisizione nasce dalle caratteristiche stesse del cinematisma della frana di Lago, quindi l'esigenza di poter controllare in tempo reale o più propriamente quasi reale i punti caratterizzati da velocità medie dell'ordine di vari cm/y, ubicati in aree urbanizzate o interessate dalla presenza di infrastrutture.

I file *RINEX* (*file in formato di interscambio*), creati su il PC di Lago con un *software* di trasformazione, hanno un *rate* di campionamento di 1 sec e lunghezza delle sessioni di 30 min (tranne i primi giorni a 5 min) e vengono inviati periodicamente presso il centro di calcolo di Roma (CRED di Roma) insieme alle soluzioni giornaliere.

Contemporaneamente i ricevitori sono stati configurati inizialmente per creare, nella memoria dei ricevitori, file binari di backup (raw) di 30 min e *rate* di campionamento a 10 sec, tranne la master che campiona a 30 sec con sessioni della durata di 24h. Per un periodo, dall'ottobre 2007, la stazione Master ha acquisito anche essa a 10 sec con sessioni

di 30min, per poi tornare a registrare i dati sulla memoria interna con un passo di campionamento a 30 secondi e sessioni di 24h.

Solo da marzo 2008 *Spider* è stato impostato nelle modalità definitive in maniera tale da creare file RINEX con *rate* di campionamento di 30sec e durata delle sessioni di 24h contemporaneamente alla creazione di file in *Real Time* (30min 1sec). Mentre sui ricevitori i file *raw* sono creati a intervalli di 30 sec e durata di 24h.

Dal luglio 2007, è stata impostata per la creazione di file RINEX con campionamento a 1 secondo e con una lunghezza delle sessioni di 30 minuti (sebbene nei primi giorni fu stabilita a 5 minuti).

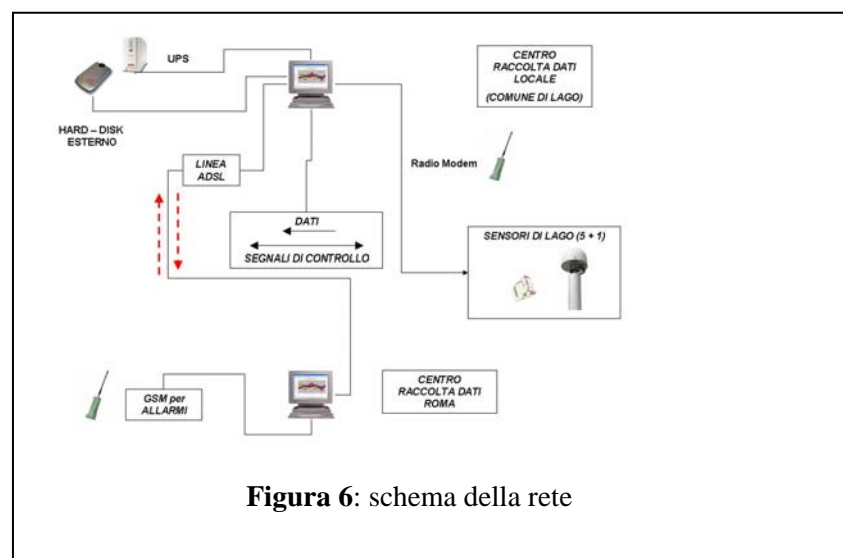


Figura 6: schema della rete

I file *RINEX*, creati, mediante software di trasformazione, sul PC di raccolta dati locale, sito nel Comune di Lago, vengono inviati periodicamente presso il centro raccolta dati di Roma, centro di calcolo CRED di Roma, insieme alle soluzioni giornaliere.

Poiché le comunicazioni tra le stazioni e la *master* avvengono via radio, come mostra lo schema in figura 6, si è verificato per alcuni periodi la mancata trasmissione dei dati, divenendo così necessario ricorrere ai dati raw memorizzati nei ricevitori, per trasformarli in *RINEX*, al fine di completare le serie storiche.

Capitolo 2.

Il sistema satellitare GPS

2.1 Il sistema NAVSTAR GPS (NAVigation Satellite Timing And Rancing Global Positioning System)

Il sistema GPS è un sistema di posizionamento globale fondato sull'emissione di segnali elettromagnetici che permettono di ricavare informazioni relative al tempo ed alle distanze tra i satelliti ed una stazione ricevente (ferma o in movimento). Attraverso la ricezione e l'interpretazione di tali segnali, da parte della suddetta stazione, è possibile realizzare un posizionamento tridimensionale della stessa (anche in tempo reale), in un sistema di riferimento cartesiano geocentrico.

La costellazione GPS consiste di 24 satelliti (ad oggi 32) che orbitano a circa 20,180 Km dalla superficie della Terra. I satelliti occupano 6 piani orbitali, con 4 satelliti per ciascun piano. Ciò assicura che almeno quattro satelliti sono visibili al ricevitore dell'utente ovunque sul globo, quasi tutto il tempo. Le orbite dei satelliti sono regolate in modo che ciascun satellite passi virtualmente su alcuni punti della Terra ogni giorno. Ciascun satellite porta un set di orologi atomici precisi (Cesio e Rubidio) che controllano un trasmettitore di microonde.

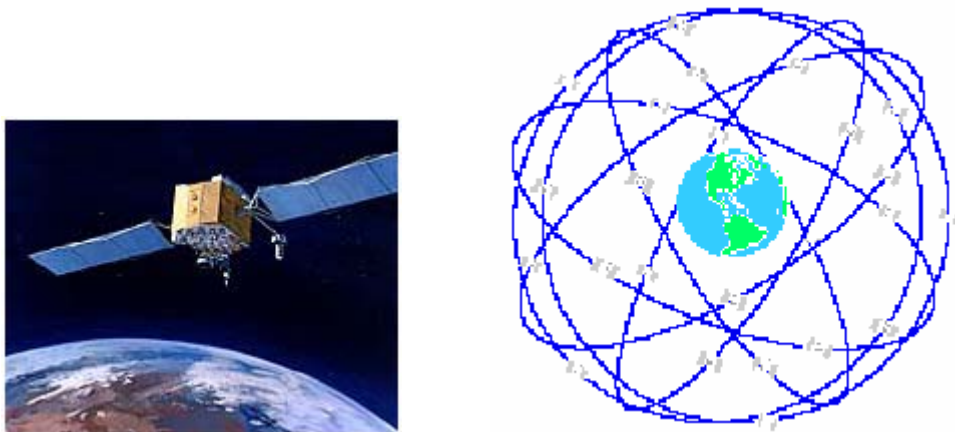


Figura 7: Sistema GPS

I satelliti sono ammessi, lanciati, e mantenuti dal United States Air Force. La Master Control Station del GPS, posizionata alla Flacon Air Force Base, Colorado Springs, calcola le posizioni e l'ora di tutti i satelliti ogni pochi minuti, e trasmette queste informazioni a

ciascun satellite almeno una volta al giorno. I satelliti poi rispediscono queste informazioni al ricevitore dell'utente come parte del segnale di navigazione.

2.2 Misure di Pseudorange

Un ricevitore GPS genera una copia locale di ciascun segnale del satellite che è atteso al ricevitore. Esso “sintonizza” il satellite adattando il timing della copia locale fino a che esso non combini precisamente il timing del segnale. Una volta che una combinazione è realizzata, il segnale “appare” nel ricevitore, il quale poi legge l'informazione di navigazione del segnale mentre lo traccia con la copia locale. Il ricevitore può usare l'informazione di navigazione per calcolare la posizione del satellite ad ogni istante desiderato.

Il ricevitore misura il ritardo del tempo dalla posizione del satellite alla sua stessa posizione confrontando il timing della sua copia locale del segnale con il suo orologio interno. Il ritardo del tempo è proporzionale alla distanza tra il satellite e il ricevitore, a meno che la misura contenga errori. Questi errori provengono da molte fonti, incluso SA (Selective Availability), ritardi atmosferici, e variazioni nell'orologio interno del ricevitore. A causa di questi errori, le misure del ritardo non sono precisamente proporzionali al range geometrico, così esse sono dette misure di *pseudorange*.

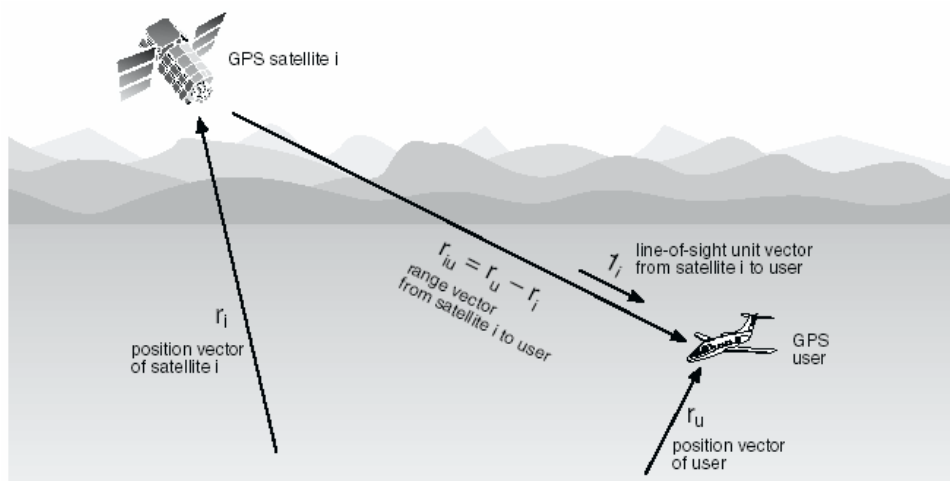


Figura 8: Navigazione GPS usando Pseudorange di codice

La Figura 2.2 illustra la geometria di una misura di pseudorange. Il vettore range r_{iu} è la differenza tra la posizione del ricevitore (r_u) e la posizione del satellite i (r_i). La misura di

pseudorange include il ritardo dovuto alla lunghezza del suo vettore range solo con vari errori. Ogni pseudorange può essere scritta come:

$$\rho_i = |r_u - r_i| + c \cdot b_u + \varepsilon_i$$

dove

ρ_i è la misura di pseudorange per il satellite i

r_u è la posizione del ricevitore utente

r_i è la posizione del satellite i

b_u è il bias dell'orologio del ricevitore

c è la velocità della luce

ε_i è la somma degli errori di misura associati con il satellite i .

2.2.1 Algoritmo di navigazione

Una trattazione abbreviata sull'algoritmo di navigazione GPS può servire da background per introdurre una discussione sulla metodologia software.

Per trovare la sua posizione, il ricevitore applica il principio di triangolazione. Tre punti noti (posizioni del satellite) definiscono un piano, e i range a questi punti definiscono univocamente due possibili posizioni di ricevitori, una sopra e una sotto il piano. Una di queste è generalmente lontana e fuori dallo spazio e può essere eliminata dall'ispezione, lasciando l'altra come vera posizione del ricevitore¹².

Nella pratica, il ricevitore deve risolvere il bias del suo orologio interno come pure le tre dimensioni della sua posizione, un totale di quattro incognite. Il ricevitore necessita di misure di pseudorange da quattro differenti satelliti in modo da risolvere queste 4 incognite.

¹² u-bolx AG, 2007

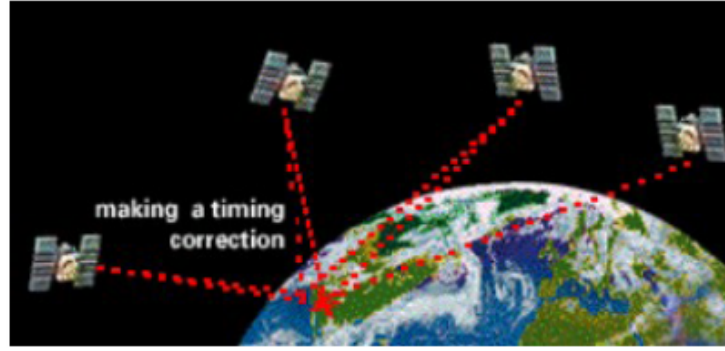


Figura 9: minimo numero di satelliti visibili.

Il processo di soluzione tipicamente attualizza una stima di posizione iniziale \hat{r}_u usando l'informazione di nuova misura. Se nessuna migliore stima di posizione iniziale è disponibile, una può essere raggiunta mediando i punti sottosatellite per tutti i satelliti che attualmente si stanno tracciando. Date questa stima di posizione iniziale e le posizioni note del satellite, la differenza $\Delta\rho_i$ tra le pseudorange stimate e misurate possono poi essere scritte come:

$$\Delta\rho_i = \hat{\rho}_i - \rho_i = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{l}}_i^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta r_u \\ c \cdot \Delta b_u \end{bmatrix} + \Delta\varepsilon_i$$

dove

$\hat{\mathbf{l}}_i$ è il vettore unitario dal satellite i alla posizione stimata del ricevitore

$\Delta r_u = \hat{r}_u - r_u$ è la differenza tra le posizioni stimata e attuale

$\Delta b_u = \hat{b}_u - b_u$ è la differenza tra gli errori di orologio del ricevitore, stimato e attuale

Quattro (o più) di queste equazioni di pseudorange possono essere agglomerate per formare un'equazione matriciale:

$$\Delta\rho = G\Delta x + \Delta\varepsilon$$

dove

$$\Delta\rho \equiv \begin{bmatrix} \Delta\rho_1 \\ \Delta\rho_2 \\ \vdots \\ \Delta\rho_n \end{bmatrix}, \quad G \equiv \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{l}}_1^T & 1 \\ \hat{\mathbf{l}}_2^T & 1 \\ \vdots & \vdots \\ \hat{\mathbf{l}}_n^T & 1 \end{bmatrix}, \quad \Delta x \equiv \begin{bmatrix} \Delta r_u \\ c \cdot \Delta b_u \end{bmatrix},$$

$$\text{e } \Delta \varepsilon \equiv \begin{bmatrix} \Delta \varepsilon_1 \\ \Delta \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \Delta \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

Una correzione $\Delta \hat{r}_u$ alla stima della posizione iniziale \hat{r}_u può essere ottenuta da questa equazione di matrice con il metodo dei minimi quadrati:

$$\Delta \hat{x} = (G^T G)^{-1} G^T \Delta \rho$$

Il risultato $\Delta \hat{x}$ contiene la correzione di posizione $\Delta \hat{r}_u$ come pure una correzione Δb_u alla stima del bias dell'orologio. L'aggiornamento, posizione esatta è poi stimata come

$$\hat{r}_u^{new} = \hat{r}_u - \Delta \hat{r}_u$$

Questo processo è ripetuto finché la correzione $\Delta \hat{x}$ è trascurabilmente piccola.

Quando sono usati più di quattro pseudorange nell'algoritmo di navigazione, uno scarto quadratico residuo $\Delta \rho^{new}$ può essere calcolato dalla posizione finale e dalla pseudorange misurata. Quando disponibile, questo residuo è spesso usato come una misura della qualità o accuratezza della nuova stima di posizione, in un processo noto come Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM).

Un'altra misura di qualità, che è sempre disponibile, è fornita dalla matrice di covarianza della posizione $A = (G^T G)^{-1}$. La radice quadrata della traccia di A è nota come Geometric Dilution of Precision (GDOP). Il GDOP descrive la degradazione dell'accuratezza della soluzione di posizione dovuta unicamente alle posizioni relative dei satelliti. Vari componenti del GDOP descrivono la degradazione in particolari dimensioni: Horizontal DOP (HDOP), Vertical DOP (VDOP), Position DOP (PDOP), e Time DOP (TDOP).

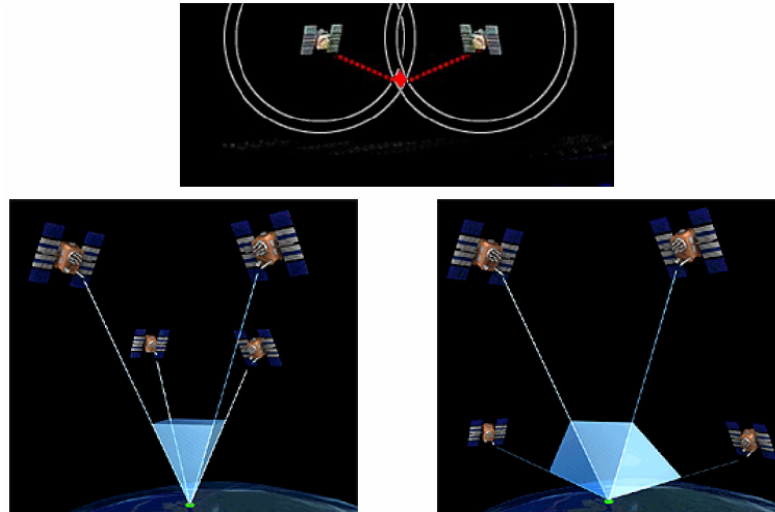


Figura 10: Diluizione della precisione (PDOP)

Il margine di errore decresce se i satelliti sono largamente spazati

Il concetto GDOP afferma che gli errori nelle misure di pseudorange individuali sono non-correlati e hanno la stessa statistica.

Il numero di satelliti GPS è limitato, e le loro orbite sono inconvenienti per alcune posizioni. Segnali aggiuntivi GPS possono migliorare la disponibilità e l'accuratezza della sola navigazione GPS. È difficile fornire questi segnali supplementari lanciando satelliti aggiuntivi GPS.

2.3 Misure di fase

Le misure di fase si effettuano sull'onda portante demodulata dai codici; l'osservazione è costituita dalla differenza tra la fase dell'onda portante ricevuta e la fase di un'onda di riferimento generata all'interno del ricevitore, all'istante della ricezione.

Il principio operativo risulta essenzialmente analogo a quello utilizzato per i codici: in entrambi i casi si giunge infatti alla determinazione della distanza considerando lo sfasamento tra due onde ma, mentre per lo pseudorange la grandezza misurata è una differenza di tempo, in questo caso si tratta proprio di una differenza di fase. La misura di fase è costituita da due componenti, una frazionaria che consiste nello sfasamento $\phi_j^i(t_j)$ ($0 \leq \phi_j^i \leq 1$ ciclo) tra la fase dell'onda portante inviata dal satellite all'epoca t_j e la fase della copia della portante generata dall'oscillatore interno al ricevitore alla stessa epoca; l'altra la componente è intera, rappresentata dalla variazione della differenza $\Delta N(t_0, t_j)$ tra

il numero di cicli interi ricevuti dal satellite ed il numero di cicli interi generati dall'oscillatore interno al ricevitore all'epoca t_j rispetto all'epoca iniziale t_0 , equivalente alla variazione del numero intero di lunghezze d'onda comprese nella distanza satellite-ricevitore tra le suddette epoche.

Si considerino due oscillatori (j, i) posti a distanza costante d che generano onde elettromagnetiche di uguale frequenza f e si misuri lo sfasamento $\Phi_j^i(t_j)$ tra le loro fasi in corrispondenza dell'oscillatore j all'epoca di ricezione t_j ; ipotizzando di operare in condizioni ideali (senza errori di orologio e di rifrazione) è si può scrivere:

$$\Phi_j^i(t_j) - \Phi_j(t_j) = \Phi^i(t_j - \tau) - \Phi_j(t_j) = \Phi_j(t_j - \tau) - \Phi_j(t_j)$$

dove

t_j = epoca di ricezione del segnale all'oscillatore j;

τ = tempo di propagazione, ovvero il tempo impiegato dall'onda per percorrere la distanza d;

$\Phi_j^i(t_j)$ = fase dell'onda proveniente dall'oscillatore i ricevuta all'epoca t_j dall'oscillatore j;

$\Phi_K^i(t_j - \tau)$ = fase dell'onda trasmessa dall'oscillatore i all'epoca $t_j - \tau$ (uguale a $\Phi_j^i(t_j)$);

$\Phi_j(t_j - \tau)$ = fase dell'onda generata dall'oscillatore j all'epoca $t_j - \tau$
(uguale a $\Phi^i(t_j - \tau)$).

Sviluppando in serie di Taylor il termine $\Phi_j(t_j - \tau)$ in un intorno dell'epoca t_j fino al primo ordine e ricordando che:

$$\frac{\partial \Phi_j}{\partial t} = f$$

si ottiene:

$$\Phi_J^i(t_j) - \Phi_j(t_j) = -f\tau = -\frac{d}{\lambda} = -N(t_j) - \varphi_j(t_j) = -N - \varphi_j^i$$

in cui:

λ = lunghezza d'onda

d = distanza tra gli oscillatori

N = numero intero di lunghezze d'onda nella distanza d

φ_j^i = parte frazionaria dello sfasamento

Poiché $N(t_j) = N(t_0) + \Delta N(t_0, t_j)$ si può scrivere l'equazione di osservazione della misura di fase:

$$\Phi_J^i(t_j) - \Phi_j(t_j) = -N(t_0) - \Delta N(t_0, t_j) - \varphi_j^i(t_j)$$

2.3 Differential GPS

I segnali GPS misurati dal ricevitore dell'utente contengono un numero di errori o deviazioni dal modello ideale matematico. La posizione attuale del satellite GPS è nota solo entro pochi metri, e il timing del suo orologio può essere lontano di pochi nanosecondi (o sopra i 100 ns con SA). Il segnale radio dal satellite è ritardato poiché viaggia attraverso la ionosfera e la troposfera. Infine, il ricevitore può essere disturbato dalle riflessioni del segnale da oggetti molto vicini, fenomeno noto come *multipath*.

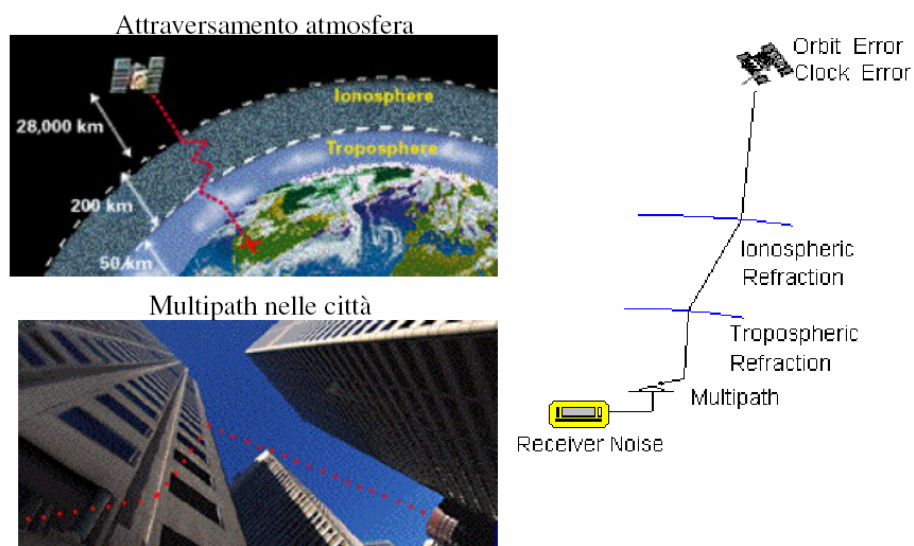


Figura 11: fonti di errore

Tutti questi errori eccetto il multipath sono spazialmente correlati; cioè, la somma di questi errori sarà simile per tutti i ricevitori entro una data area.

Il Differential code-phase GPS (DGPS) riduce spazialmente gli errori correlati nei segnali del satellite GPS a livelli trascurabili. Una reference station DGPS, installata ad una posizione ben nota, calcola una pseudorange assunta per ogni segnale del satellite che rileva. Esso poi misura la pseudorange per il segnale di quel satellite e sottrae la pseudorange assunta, formando una “differential correction”. La DGPS reference station trasmette queste correzioni come informazioni digitali ai vicini ricevitori dell’utente.

Ciascun ricevitore utente aggiunge questa correzione alla pseudorange che esso misura per gli stessi satelliti prima di fornire l’algoritmo di navigazione descritto precedentemente. Gli errori comuni a entrambi i ricevitori, quali ad esempio SA clock dithering, sono interamente rimossi da questa procedura. Altri errori, come i ritardi ionosferico e troposferico, sono rimossi al limite che essi sono spazialmente correlati. Gli errori non correlati, come il multipath e il rumore del ricevitore, si aggiungono direttamente agli errori di navigazione dell’utente, ma una reference station DGPS di alta qualità li potrà minimizzare. Il messaggio di correzione digitale deve essere trasmesso dalla reference station ai ricevitori dell’utente.

Gli errori accidentali hanno una entità notevolmente inferiore rispetto a quelli sistematici, e vengono contenuti sia mediante una idonea architettura hardware che con un’opportuna scelta dei punti di stazione. Gli errori sistematici possono essere rimossi adottando particolari procedimenti operativi e combinazioni delle osservazioni, in modo da eliminare alcune delle incognite e giungere alla soluzione del problema, rendendolo comunque

sempre iperdeterminato per aumentare la precisione e l'affidabilità delle stime. I metodi operativi impiegati (per scopi geodetici di alta precisione) si riducono in sostanza al calcolo di posizioni relative fra due ricevitori (basi GPS), in cui le osservazioni vengono processate con i cosiddetti metodi differenziali: eseguendo opportune differenze tra le osservazioni di fase (le differenze singole tra ricevitori, le differenze singole tra satelliti, le differenze doppie, le differenze triple), si riesce a ridurre o eliminare gli errori sistematici comuni alle osservazioni coinvolte¹³.

2.4 Il segnale GPS

Il GPS usa segnali radio a bassa potenza. Le radio onde sono energia elettromagnetica e viaggiano alla velocità della luce. La velocità della luce è 299792458 metri al secondo. Il segnale GPS consiste in frequenze portanti e codici pseudocasuali.

I segnali GPS hanno frequenze portanti L1 a 1575.42 MHz, L2 a 1227.60 MHz, e L3 a 1176.45 MHz. I ricevitori che tracciano solo la frequenza L1 sono chiamati ricevitori a frequenza singola. I ricevitori che tracciano entrambe L1 e L2 sono detti ricevitori a doppia frequenza. La frequenza L2 non è interamente disponibile al pubblico generale ma ci sono tecniche per estrarre il codice e la fase dal segnale L2.

Il codice pseudo-random è un complesso codice digitale che sembra pressoché il rumore elettrico casuale è perciò detto pseudo-casuale. Ciò assicura che il ricevitore non capta accidentalmente il segnale satellitare sbagliato. Il codice pseudo-random è usato come un ID-card per ogni satellite GPS. Esistono due tipi di codici pseudo-casuali. Il primo è noto come codice Corse/Acquisition (C/A) e l'altro è detto codice P. I codici C/A sono scelti dai così chiamati "codici Gold". I codici Gold sono un set di codici che hanno proprietà di auto-correlazione e cross-correlazione ben definiti. Il codice P è usato dai militari e può essere a volte criptato. Il codice P è modulato ad una velocità di 10 MHz su entrambe le portanti L1 e L2. Il codice C/A è una ripetizione di codici pseudo-casuali. Essi sono scelti da una famiglia di 1023 "codici Gold" basati su codici di massima lunghezza di linear feedback shift register. Ciascun codice C/A è lungo 1023 chip. Il chip è un bit individuale della sequenza di $2^k - 1$ dove k è il numero di bit nel registro a scorrimento. 32 di questi codici sono stati assegnati per i satelliti GPS e 4 sono assegnati l'uso dagli pseudolite. Ci sono 511 codici che possono essere usati. I restanti 512 non possono essere usati perché i

¹³ Cina A., 2000

codici non sono bilanciati. I codici non bilanciati sono più difficili da modulare e sono vulnerabili all'interferenza a banda limitata. Il codice C/A è modulato ad una velocità di 1 MHz sulla portante L1. Quando trasmesso il codice C/A si ripete esattamente a 1000 volte al secondo che significa che il codice è trasmesso a una velocità di $1.023 \cdot 10^6$ chip al secondo. Quando il segnale è inviato, il messaggio è sommato bit per bit con l'insieme di 20 epoche del codice C/A. Questo segnale è poi modulato con l'uso di binary phase shift keying (BPSK) sulla portante.

Quando i satelliti mandano i loro segnali sulle bande portanti L1 e L2, il segnale è modulato dai così chiamati codici PNR. PNR sta per Pseudo-Random- Noise, cioè rumore pseudo-casuale. Il PRN è un complicato codice digitale che sembra essere un rumore elettrico casuale ma di fatto non lo è. La complessità del PNR è necessaria per assicurare che il ricevitore non sincronizzi con il segnale sbagliato. Ogni satellite ha il suo proprio pseudo-random noise e quindi è importante che l'utente non possa sintonizzare col satellite sbagliato. A causa dell'alta complessità dello PRN altamente improbabile che il ricevitore sincronizzerà con il segnale errato. Un altro buon vantaggio del PRN è la sua immunità al disturbo. Il disturbo può venire da un altro satellite poiché è usata la stessa frequenza o da una forza ostile.

2.5 Ricevitori GPS

Una classificazione dei ricevitori può essere fatta in base alle misure che questi sono in grado di acquisire. Per cui in base a questo criterio si possono distinguere:

- Ricevitori “misura di codice” (*pseudorange*)
- Ricevitori “singola frequenza”
- Ricevitori “doppia frequenza” codice P
- Ricevitori “doppia frequenza” codice Y

I ***ricevitori misura di codice*** sono in grado di acquisire la sola componente impulsiva, codice C/A. Sono detti spesso palmari per le loro dimensioni forniscono le coordinate su un display e spesso non permettono la memorizzazione dei dati grezzi; forniscono il posizionamento assoluto pseudorange che fornisce una precisione planimetrica di $\pm 100\text{m}$ in presenza di Selective Availability SA, e $\pm 10 \div 20\text{m}$ senza SA. Alcuni ricevitori possono

ricevere una correzione differenziale (secondo protocollo RTCM) ed arrivare ad una precisione metrica. Il loro tipico impiego è quello navigazionale.

I **ricevitori singola frequenza** possono acquisire oltre al codice C/A anche la portante L1. le funzioni possono essere le stesse del precedente più la possibilità di memorizzare i dati di codice C/A e di fase L1 in una memoria interna o esterna. Permettono un posizionamento di misura di codice e di fase, in maniera relativa o differenziale. Sono impiegati per tutti i tipi di posizionamento, statico e cinematica, anche di precisione, su basi di lunghezza limitata a 15-20 km.

I **ricevitori doppia frequenza P-code** sono i più completi e possono acquisire tutte le parti del segnale (L1, L2, C/A, P). in assenza di Anti Spoofing AS, il codice P è ottenibile direttamente con un procedimento di correlazione del segnale. In presenza di SA, quando P è rimpiazzato dal codice segreto Y, il codice P può comunque essere ricavato con diverse tecniche ma provocando un decadimento del segnale. Permettono un posizionamento con misure di codice e di fase, relative o differenziali, impiegati per tutti i tipi di posizionamento (statico e cinematico), anche di precisione, senza limiti di lunghezza delle basi. Sono particolarmente impiegati per tecniche cinematiche con inizializzazione *On The Fly*¹⁴.

I **ricevitori doppia frequenza Y-code** permettono di acquisire il codice P anche in presenza di AS mediante un chip ausiliario Auxiliary Output Chip – AOC, posto su ogni canale del ricevitore; l'AOC corregge anche l'effetto della SA. Ovviamente tali possibilità sono riservate ad utenti autorizzati del Department of Defence.

Il ricevitore GPS può generalmente fornire dati in uscita e in particolare coordinate (dati in tempo reale) o dati grezzi (per una loro successiva elaborazione).

- le coordinate in tempo reale escono dal ricevitore tramite un collegamento seriale; per il formato dei dati si utilizza il protocollo internazionale NMEA (National Marine Electronics Association), organizzato in pacchetti di formato di record, riconoscibili da un identificativo iniziale, e contenenti informazioni come dispositivo GPS, ora minuti secondi, longitudine latitudine, etc.
- i dati di codice e di fase per il post processing sono memorizzati nei ricevitori durante l'acquisizione. Il formato con cui vengono scaricati i dati dalla memoria del ricevitore è in genere quello proprietario della ditta costruttrice (normalmente un file binario). Questo può essere poi convertito in un formato standard, riconosciuto internazionalmente, e leggibile da tutti i programmi di elaborazione GPS, detto

¹⁴ Cina, 2000

RINEX (Receiver INdependent Exchange). Il formato RINEX si compone di un file .NAV contenente i parametri per il calcolo delle orbite dei satelliti, e un file .OBS che contiene oltre alle osservazioni di codice e di fase, un'intestazione nella quale compaiono alcune informazioni tra cui tipo di ricevitore e antenna, coordinate della stazione, altezza strumentale dell'antenna, tipo di osservazioni. Nelle osservazioni, per ogni epoca di misura, sono comprese tante righe quanti sono i satelliti presenti. In testa ad ogni epoca acquisita risultano le informazioni di anno, mese giorno, ora, minuti, e secondi, e identificazione dei satelliti.

Capitolo 3.

Descrizione dei Software

Elemento cardine dello stage è stato quello di confrontare, in termini statistici, i risultati ottenuti attraverso il software Leica GNSS Spider di elaborazione dati per le stazioni permanenti, per il quale le opzioni di elaborazione non sono accessibili e confrontarli con i risultati ottenuti con il software commerciale Trimble Total ControlTM.

3.1 Leica GNSS Spider

GNSS o *GPS Spider* è un software per controllare e gestire in modo centralizzato sia una Stazione Singola sia una rete di Stazioni di Riferimento. GPS Spider è modulare e completamente scalare con nuove e avanzate soluzioni per Reti RTK (e anche in post-processing) a lungo raggio ad alta precisione (*SpiderNET*), per la distribuzione dei dati centralizzata, per la gestione dell'accesso ai dati e supporta inoltre il caricamento dei dati. Grazie a GPS Spider i service providers (professionisti nel lavoro geo-topografico) giungono alle migliori soluzioni per innumerevoli esigenze. Nell'utilizzo di una serie di stazioni di riferimento permanenti che coprono una regione soggetta a rischio ambientale, si propone l'utilizzo GPS SpiderNET per l'analisi in tempo reale della rete, garantisce alta precisione.

Il posizionamento RTK centralizzato di Spider ha permesso di determinare le coordinate delle stazioni a livello centrimetrico permettendo un'analisi in tempo reale.

GNSS Spider fornisce dati e servizi per tutti i tipi di applicazioni GNSS: dal controllo geodetico, al surveying e il monitoraggio delle deformazioni, all'ingegneria e costruzione, fino alla navigazione e a mapping e mobile GIS. La maneggevolezza dell'interfaccia grafica permette una fattibile gestione e amministrazione di tutta la rete: poiché l'interfaccia utente può essere installata su computer remoto come un server centrale, le autorità di vigilanza possono lavorare anche in luoghi lontani dal server.

La scelta di utilizzare GNSS Spider, dunque, può suggerire una soluzione per molte problematiche di posizionamento, come quelle per il monitoraggio della crosta terrestre, in particolare di tettonica, fault line, zone soggette a terremoti, eruzioni vulcaniche e altre strutture naturali, come quelle franose (quale per la rete di Lago). Infatti, poiché i ricevitori

utilizzati da ISPRA si integrano perfettamente con questo software, Spider si è ben prestato alle esigenze della rete Lago, fornendo un valido contributo non solo all'analisi delle serie temporali, ma anche raggiungendo lo scopo di dare eventuale messaggi di allarme per interventi repentini sul territorio.

Tutte le procedure di gestione remota dei ricevitori, il trasferimento dei raw data, il controllo di qualità dei dati, la creazione dei file in formato RINEX e l'archiviazione sono eseguite in automatico da Spider, presente sia presso il Centro di Raccolta Elaborazione e Controllo (CRED di Lago) nella sede del Servizio Geofisica, sia presso il Centro Locale di Controllo ubicato nei locali del Comune di Lago. Tale software, per quanto suddetto, esegue automaticamente il processamento dei dati, determinando le soluzioni giornaliere di ciascun punto di controllo rispetto alla stazione Master, considerata fissa, e gli spostamenti relativi.

3.2 Trimble Total ControlTM

Trimble Total ControlTM, *TTC*, è un software per l'elaborazione dati provenienti da misurazioni GPS/GNSS, come pure da dati topografici convenzionali. Il pacchetto TTC fornisce controlli geodetici avanzati sulle metodologie di processamento GPS al fine di ottenere strumenti di analisi. Il software provvede al controllo geodetico avanzato e fornisce molti tools di analisi ed elaborazioni GPS. Le avanzate tecniche del TTC per l'analisi dei dati satellitari danno pieno accesso ai dati raw in molti modi, sia numerici che grafici. Il Trimble Total Control opera in ambienti Microsoft Windows 95, 98, 2000, ME, NT, e XP. La vista grafica del plottaggio di un progetto può essere zoomata e spostata al semplice movimento del mouse; i diversi colori identificano lo stato delle baseline GPS.

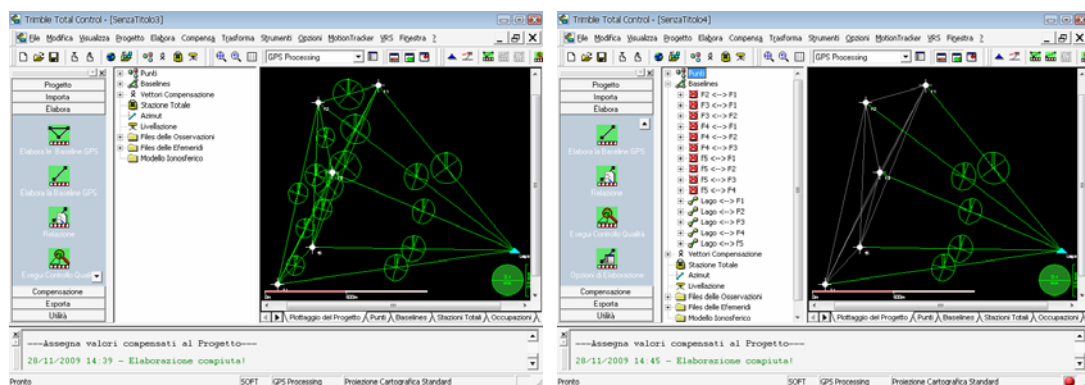


Figura 12: Esempio di Project Plot: 23/03/2008 elaborazione del doy 83, con tutte le basi (sinistra), e solo per quelle abilitate Lago-F_i, i=1,...,5 (destra)

Inoltre, vari fogli di calcolo danno dettaglio su i dati raw dati statistici, e possono essere esportati come output in file MS Excel.

3.2.1 Caratteristiche principali

Le più importanti caratteristiche del Trimble Total Control lo rendono di uso amichevole e forniscono soluzioni veloci e intuitive per l'analisi dei dati geodetici e di superficie:

- Il *download automatico da Internet* permette di importare i dati dei punti di controllo, delle stazioni di riferimento, i file delle effemeridi precise, i dati IONEX.
- L'*elaborazione delle baseline GPS*.
- Il *supporto del sistema satellitare russo GLONASS*.
- L'*elaborazione dei dati* per il posizionamento statico, cinematico, statico rapido, cinematico e continuo.
- Il *supporto per i dati raw*.
- Il *supporto delle stazioni totali* e dei dati di livello digitali.
- L'*adjustment di reti geodetiche* in una, due e tre dimensioni.
- Le *trasformazioni geodetiche*, le quali includono la distribuzione degli errori o residui.
- Il *supporto delle proiezioni e dei datum geodetici*.
- *Analisi avanzata dei dati GPS e GLONASS*.
- Il *postprocessing* (post-elaborazione) con il Trimble VRS (Virtual Reference Station).
- L'*analisi delle deformazioni in continuo*, includendo le analisi di qualità in modalità automatico e manuale.
- La visualizzazione dei *report del progetto*, generalmente indicanti le misure e i risultati in HTML.

Capitolo 4.

Elaborazioni con Trimble TotalControl™

Il software Trimble Total Control™ (TTC) importa dati raw dal ricevitore; elabora i dati GPS (Global Positioning System) e GLONASS (GLOBAL NAVIGATION Satellite System) da diversi ricevitori (Trimble e Ashtech). Esso può anche supportare il formato RINEX (Receiver INdependent EXchange). Tutti i tipi di file noti sono automaticamente identificati, dando un facile accesso per l'aggiornamento e il download dati dai ricevitori, mediante il modulo integrato *Trimble Data Transfer*. Tutti i campi dei dati come altezze delle antenne e degli strumenti, nome delle stazioni, tipo di ricevitori possono essere controllati e redatti. Tutte le *baseline* possono essere selezionate ed elaborate individualmente, oppure per il completo progetto. L'elaborazione prevede la possibilità di assegnare alcune opzioni. In particolare, per le nostre elaborazioni sono stati scelti gli stessi parametri di settaggio che il software Leica Spider ha avuto sin dal momento delle prime applicazioni:

- ✚ cut off di 15°;
- ✚ elaborazione in statico, elaborando ciascuna sessione abilitata separatamente;
- ✚ modello troposferico Hopfield;
- ✚ soluzione Fixed L1

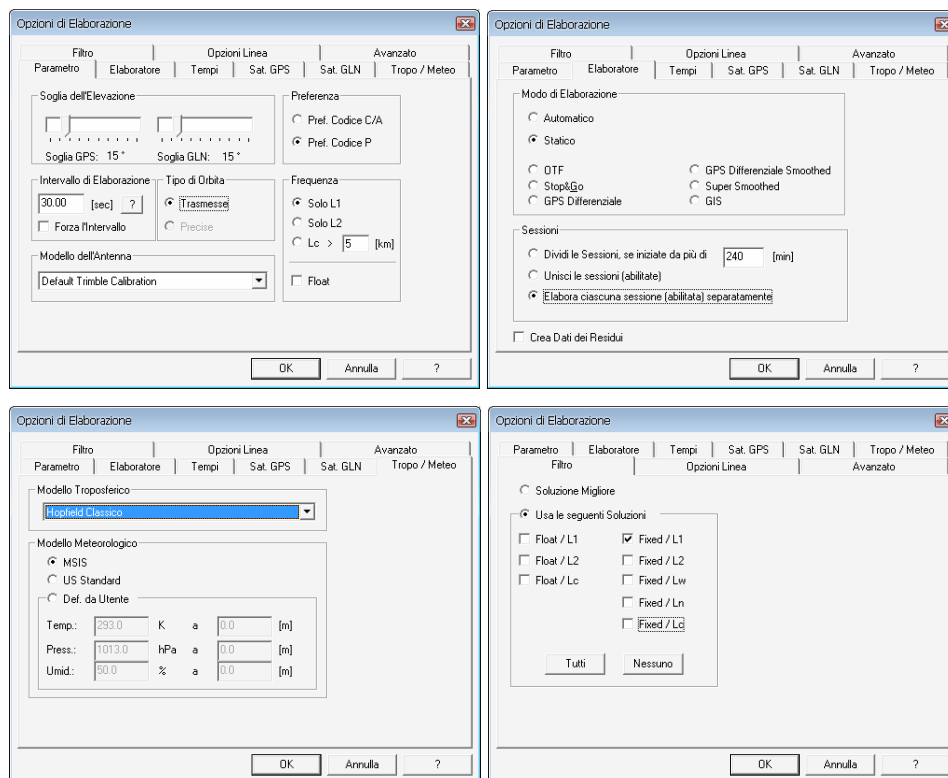


Figura 13: Opzioni dei parametri delle elaborazioni in TTC

Le informazioni essenziali sulle stazioni, come, per esempio, la posizione iniziale, le coordinate geografiche e della griglia nazionale, possono essere controllate mediante le **proprietà** per ogni punto.

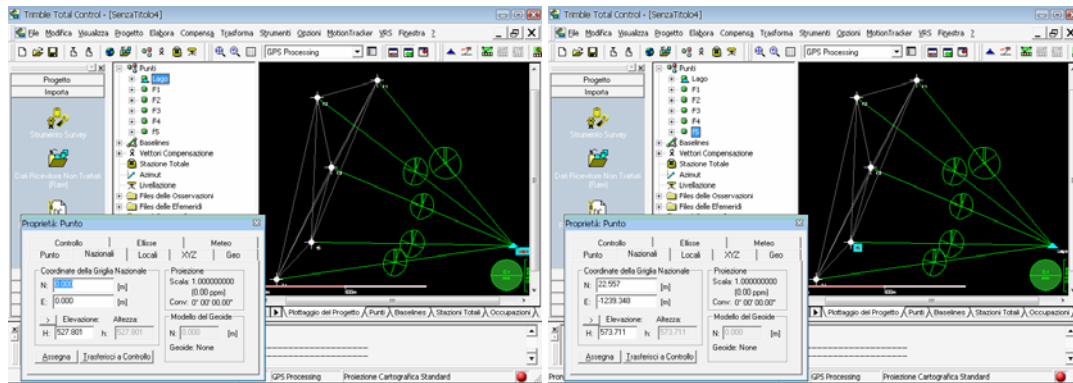


Figura 14: Proprietà delle stazioni Lago (sinistra) e F5 (destra)

Il processamento dei dati a 24 ore è stato stimato in un tempo pari all'ordine dei secondi per ciascuna elaborazione e l'intero progetto non ha mai raggiunto un tempo superiore a venti minuti. Ciascun risultato è visualizzato sullo schermo con una **ellisse di errore**.

L'ellisse di errore, centrata nella posizione stimata, rappresenta l'area in corrispondenza della quale c'è la probabilità che si trovi il punto¹⁵.

Le *baseline* sono identificate mediante codici di colore per l'analisi delle caratteristiche, facendone una identificazione immediata delle linee problematiche, senza alcuna difficoltà di calcolo o di individuazione grafica.

4.1 Monitoraggio delle deformazioni in continuo

Il modulo *Motion Tracker* fornisce un sistema grafico e istantaneo di analisi dei dati GPS per lo studio delle deformazioni attraverso le variazioni delle coordinate, e dunque, uno strumento utile per il monitoraggio di frane, l'analisi di subsidenza o il monitoraggio lungo sistemi di faglie.

¹⁵ Barbarella M., 2008

4.1.1 Elaborazione e analisi delle sessioni a 24 ore

È stato scelto di elaborare ciascuna sessione (abilitata) separatamente (elaborando le basi linearmente indipendenti); il *template* è stato realizzato per ogni stazione con la stazione Master Lago. Per quanto concerne il profilo del modulo *Motion Tracker*, è stato scelto il pianificatore manuale selezionando le opzioni che prevedono la sessione di tipo giornaliera e l'intervallo a 24 ore. E' comunque da tener presente che la reale durata della sessione può essere talora inferiore alle 24 h a causa di problemi di trasmissione dei dati satellitari via radio. I grafici che seguono sono relativi al periodo 2007÷2009; si è scelto di considerare i dati RINEX o RAW solo per i giorni corrispondenti a quelli ricavati dalle serie storiche elaborate da Leica Spider.

Si noti che, come da *default*, i grafici sono disposti nel seguente modo:

- in alto in blu: dN (variazione della coordinata Nord);
- al centro in verde: dE (variazione della coordinata Est);
- in basso in rosso: dH (variazione della Quota).

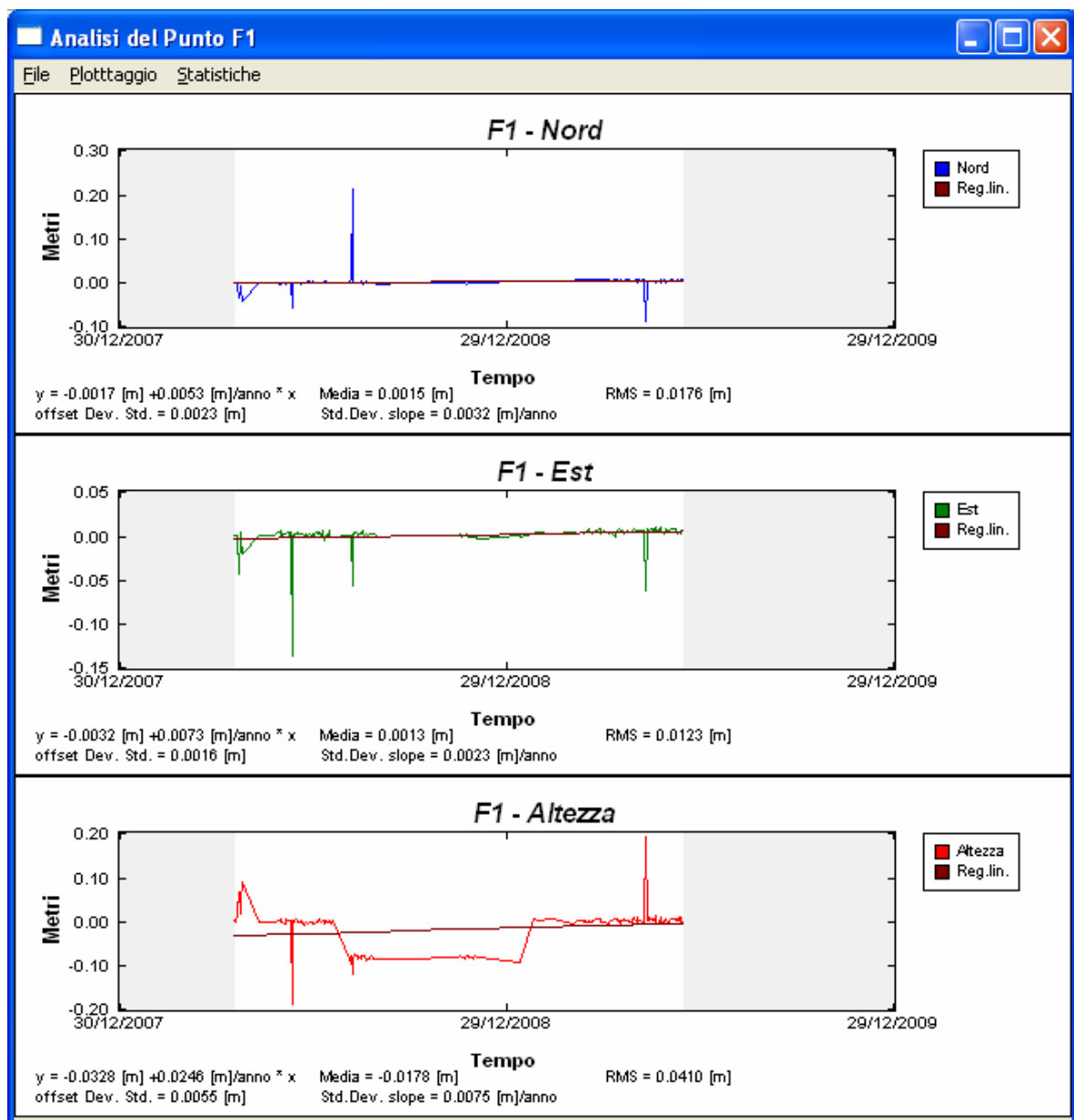


Figura 15: Serie temporali della stazione F1 (in basso la legenda sui residui)

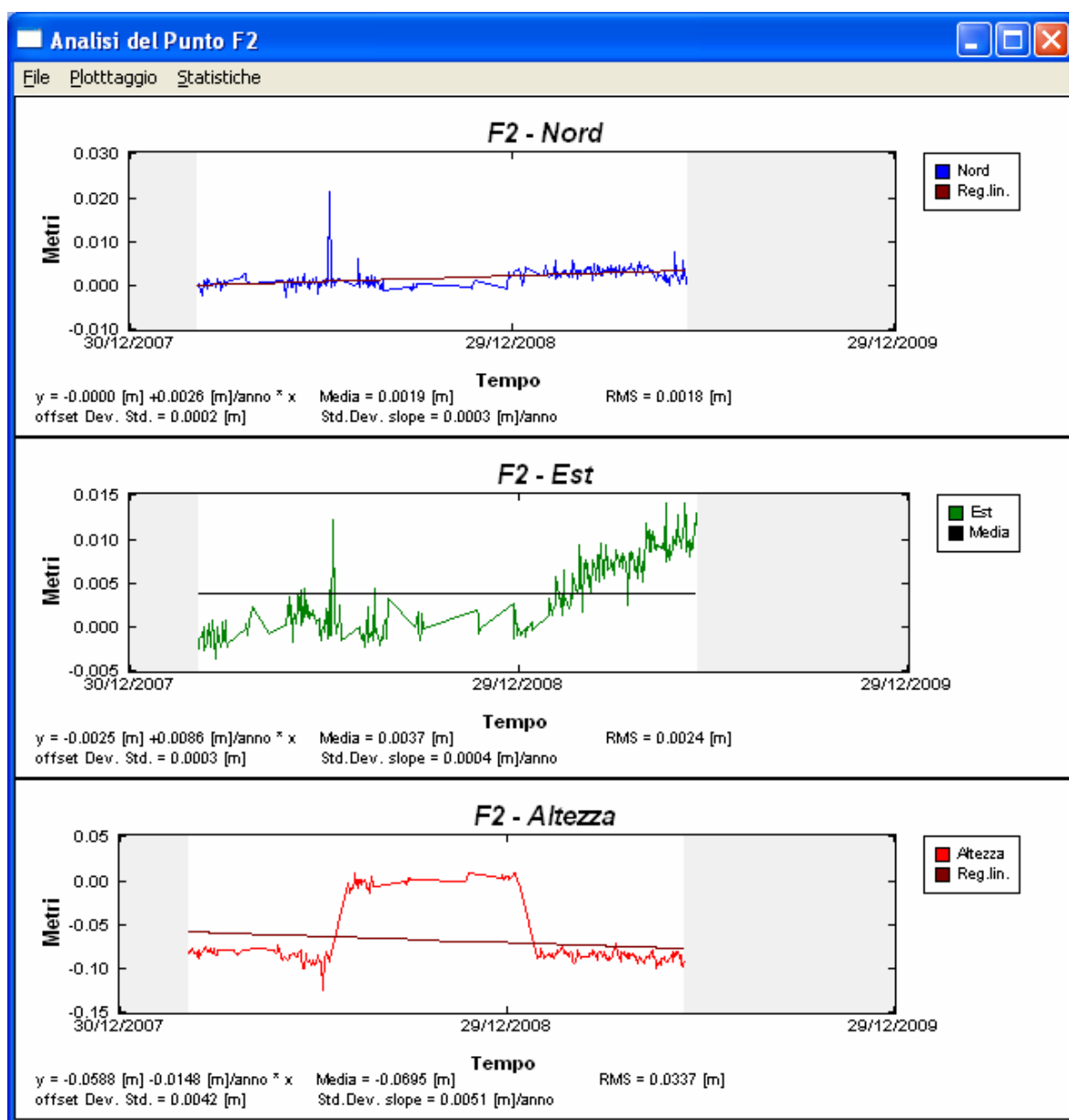


Figura 16: Serie temporali della stazione F2 (in basso la legenda sui residui)

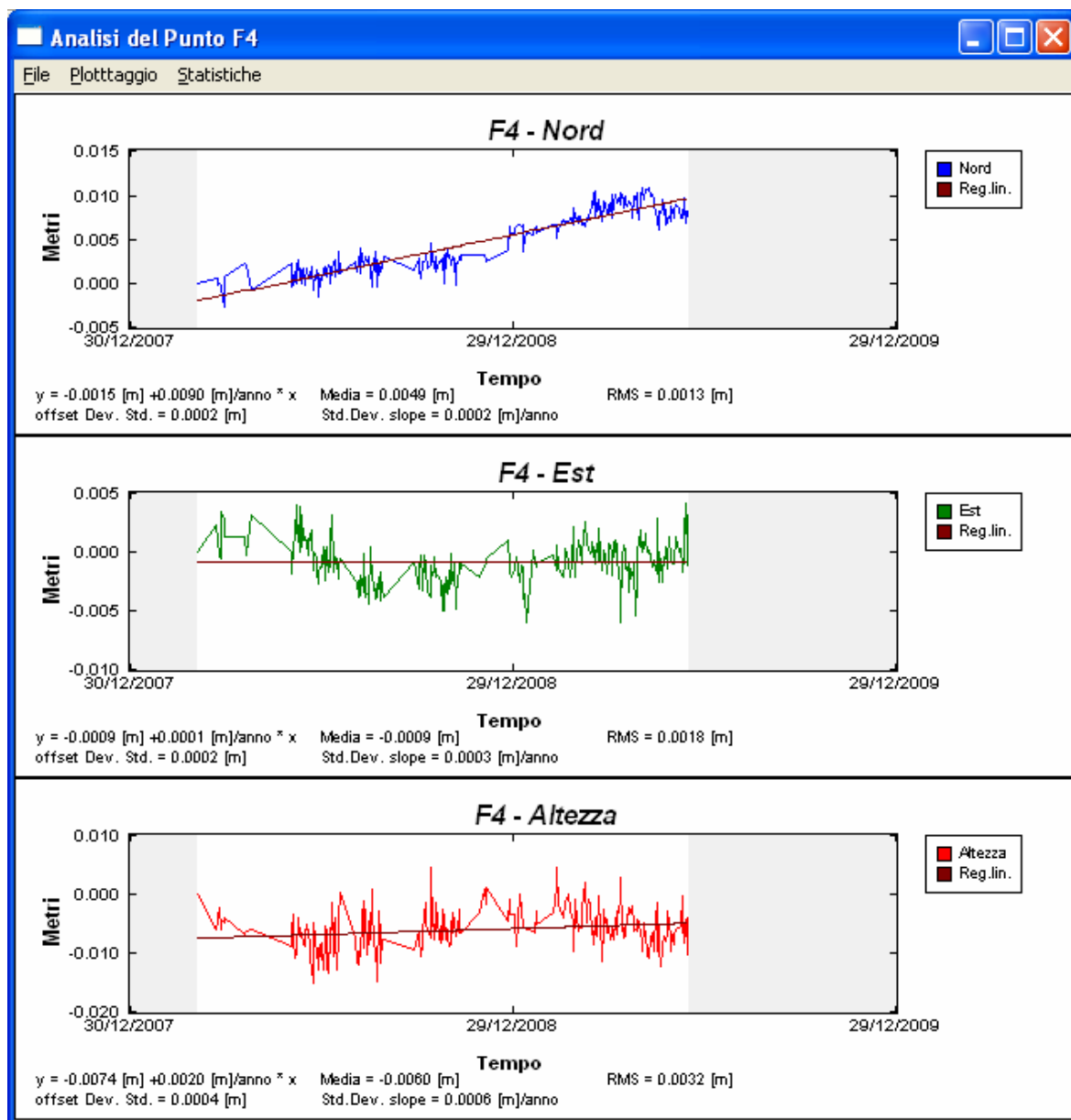


Figura 18: Serie temporali della stazione F4 (in basso la legenda sui residui)

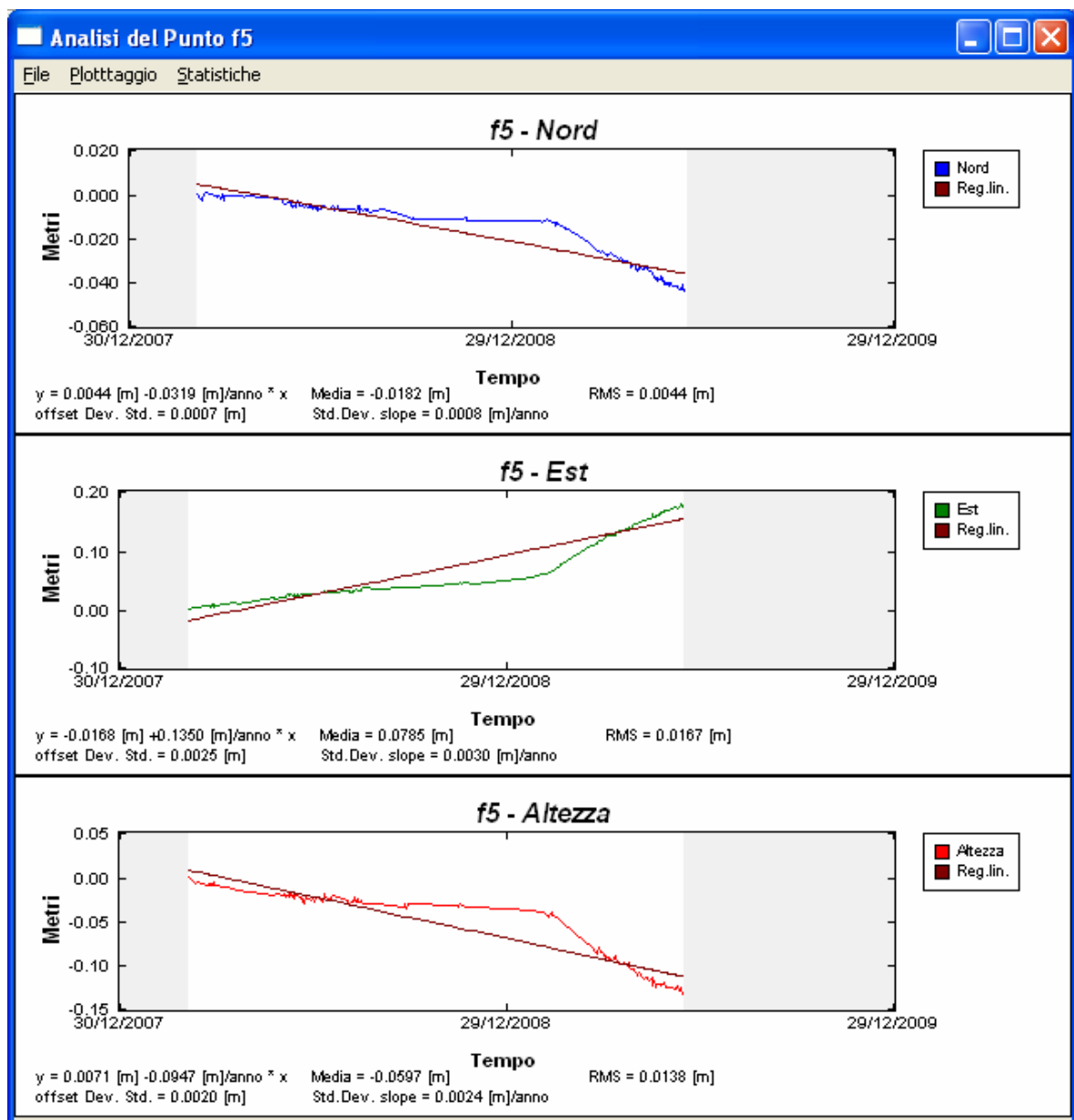


Figura 19: Serie temporali della stazione F5 (in basso la legenda sui residui)

I risultati dell'elaborazione con Spider sono stati rielaborati in ambiente **Matlab**, mediante i tool **Time Series** (MATLAB 7.9), al fine di fornirne i grafici e le deviazioni standard relative alle stazioni.

Si noti, che come da default, i grafici sono disposti nel seguente modo:

- in alto in blu: dE;
- al centro in verde: dN;
- in basso in rosso: dH.

La precisazione dei colori e delle posizioni dei grafici è espressa al fine di evitare equivoco nell'osservazione dei grafici, e affinché, lasciandoli di default, si noti che mentre TTC

riproduce prima la variazione di coordinata nella direzione Nord, Spider offre, come prima soluzione, quella in direzione Est.

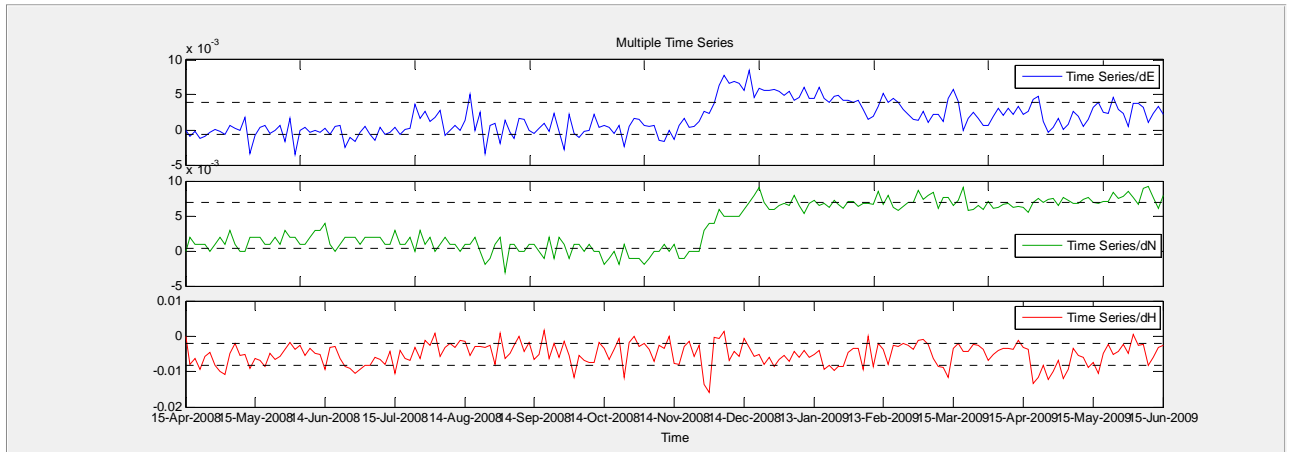


Figura 20: Serie temporali della stazione F1 (*tratteggiata la deviazione standard*)

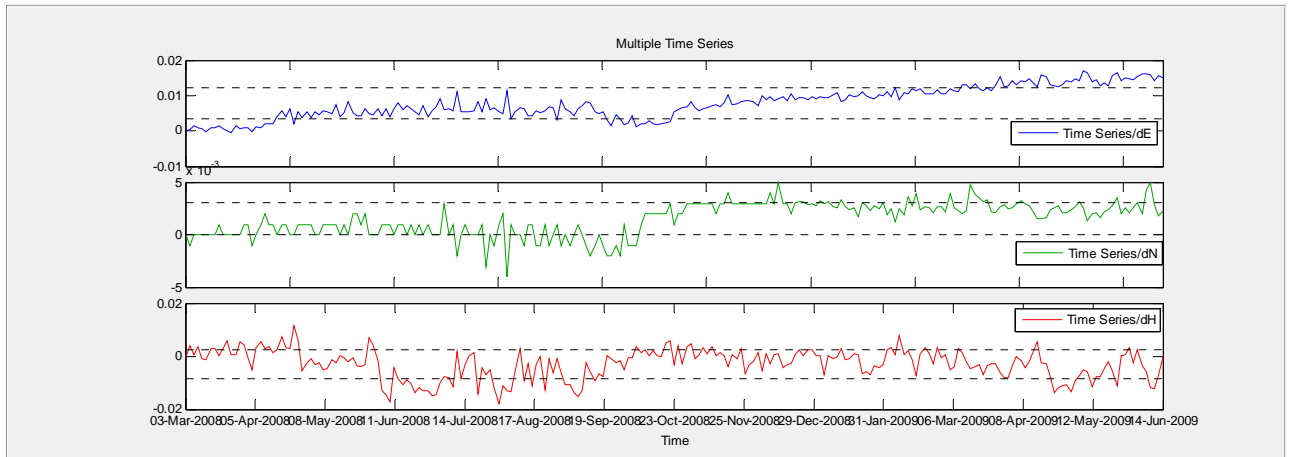


Figura 21: Serie temporali della stazione F2 (*tratteggiata la deviazione standard*)

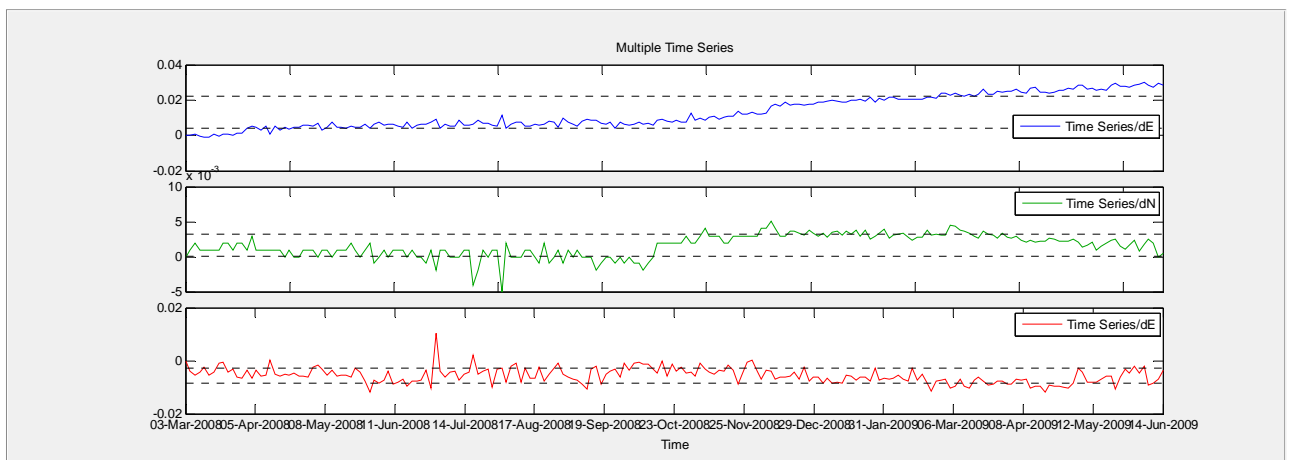


Figura 22: Serie temporali della stazione F3 (*tratteggiata la deviazione standard*)

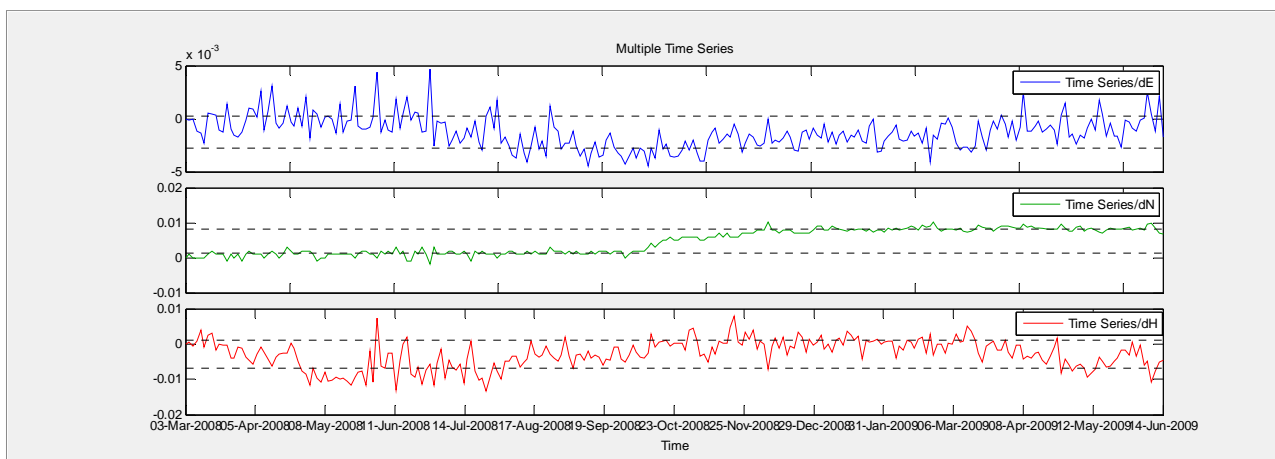


Figura 23: Serie temporali della stazione F4 (*tratteggiata la deviazione standard*)

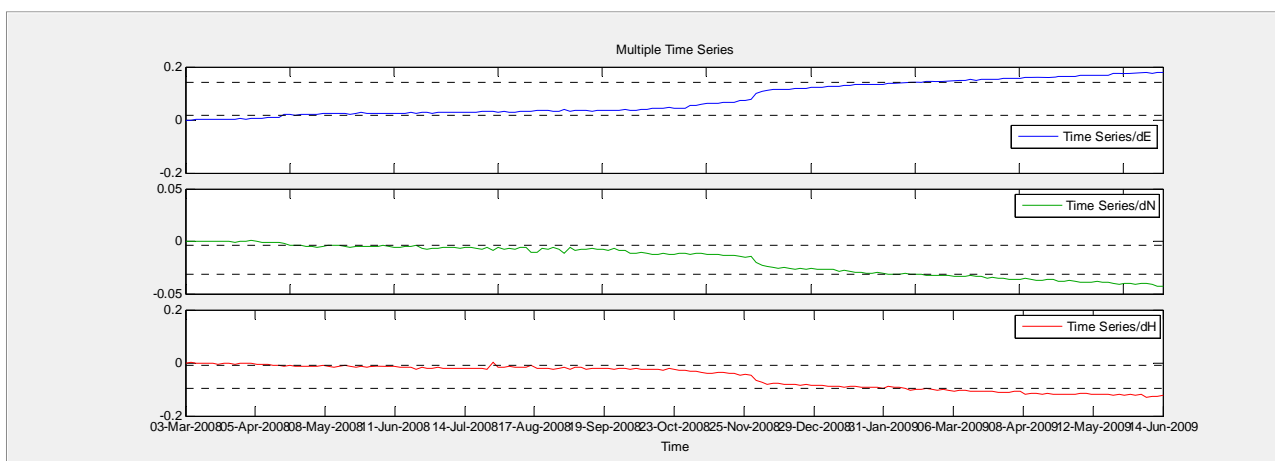


Figura 24: Serie temporali della stazione F5 (*tratteggiate le deviazioni standard*)

4.1.2 Elaborazione e analisi delle sessioni Real Time

Il monitoraggio geodetico della zona oggetto di studio, interessata da movimento franoso, è stato condotto su dati relativi agli ultimi tre anni, ricevuti da sei stazioni della *Rete di Lago*, avviata nel luglio 2007.

In seguito si espongono alcune prove finalizzate alla valutazione della precisione nella determinazione delle coordinate delle stazioni di controllo in funzione della durata delle sessioni di misura e quindi all'individuazione, per questa rete, della durata delle sessioni minime che consenta di seguire adeguatamente gli spostamenti del versante in caso di accelerazione dei movimenti.

Al fine di testare il sistema, l'acquisizione dei dati è stata articolata in più fasi pertanto i file RINEX, creati da Leica *Spider* sul PC del CRED di Lago, sono stati archiviati e elaborati con diverse modalità:

- inizialmente nel periodo dal 26 giugno 2007 al 11 luglio 2007 con campionamento 1 secondo e lunghezza delle sessioni di 5 minuti;
- dal 11 luglio 2007 con campionamento 1 secondo e lunghezza delle sessioni di 30 minuti;
- da marzo 2008 a oggi con campionamento a 30 secondi e durata di 24h (contemporaneamente alla creazione di file in RT 30min 1sec).

Nel periodo successivo a marzo 2008 il sistema è stato impostato per elaborare anche sessioni di lunghezza di 1e 2h con campionamento a 1 sec. Infine, è stata testata anche una durata delle sessioni di 2h e campionamento a 30s.

Lo stage ha previsto quindi l'analisi dei risultati dell'elaborazione per ciascun periodo considerando degli intervalli campione.

Al fine di definire le condizioni ottimali di acquisizione delle sessioni sono stati presi in considerazione alcuni parametri statistici in grado di esprimere la bontà e la qualità delle misure. Tale analisi è stata applicata a un gruppo di dati acquisiti dalla stazione F3 posta nella parte mediana del versante in studio e soggetta a spostamenti significativi legati al movimento di frana.

Nelle figure sottostanti sono riportati i grafici relativi all'analisi dei dati GPS acquisiti durante i periodi suddetti di monitoraggio.

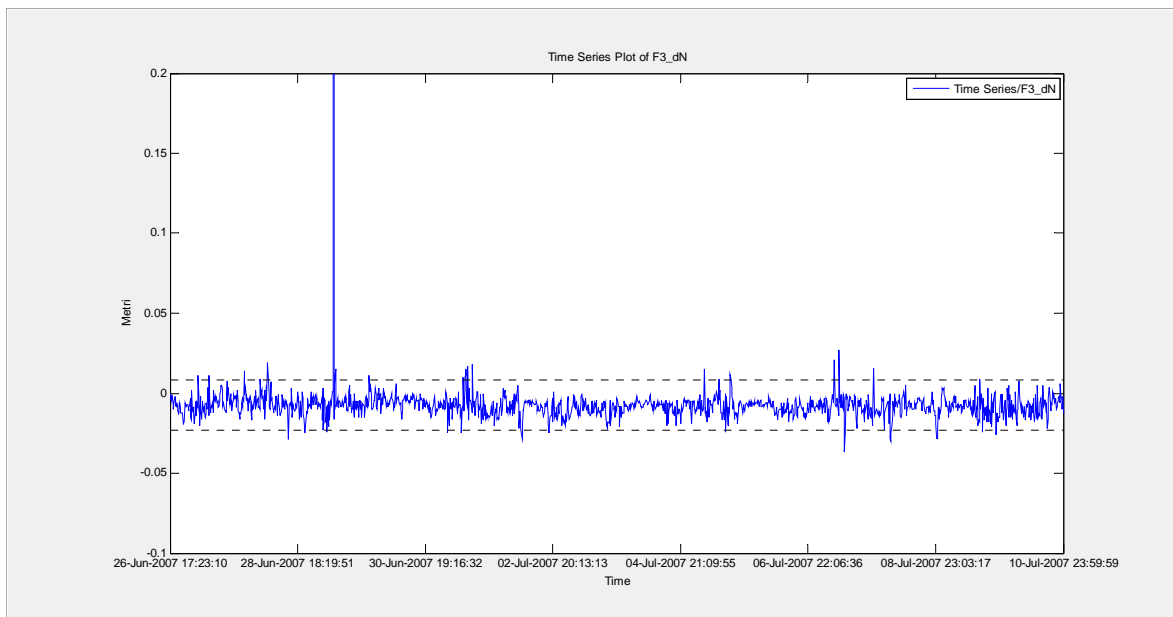


Figura 25: Serie temporale della stazione F3 (dN) con campionamento 1 secondo e lunghezza delle sessioni di 5 minuti (*tratteggiata la deviazione standard*)

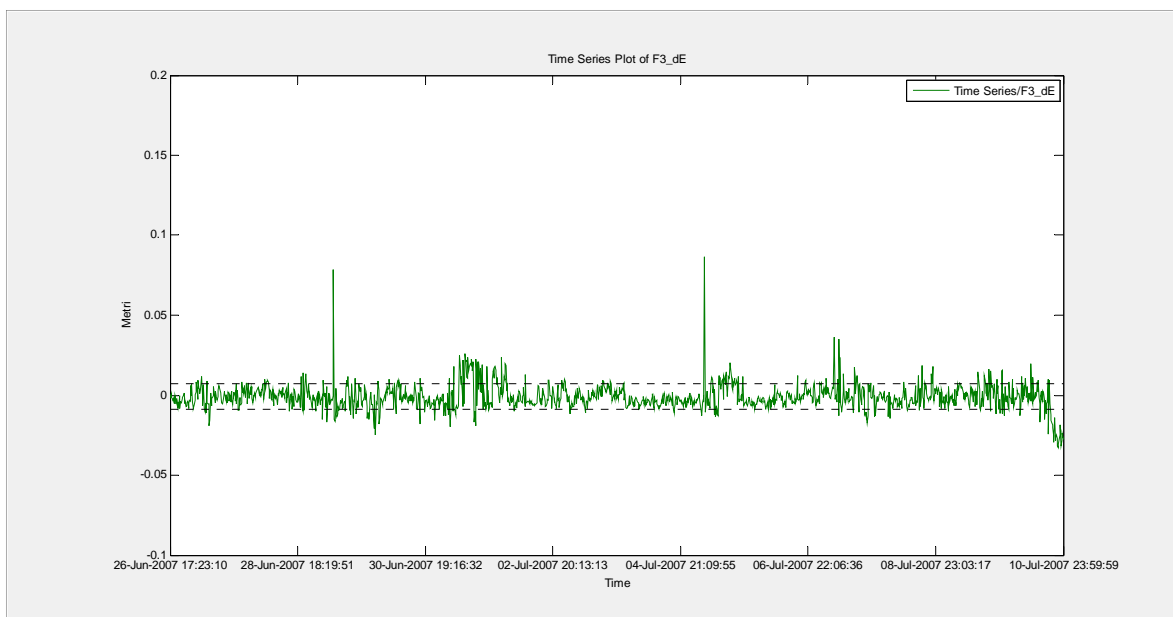


Figura 26: Serie temporale della stazione F3 (dE) con campionamento 1 secondo e lunghezza delle sessioni di 5 minuti (*tratteggiata la deviazione standard*)

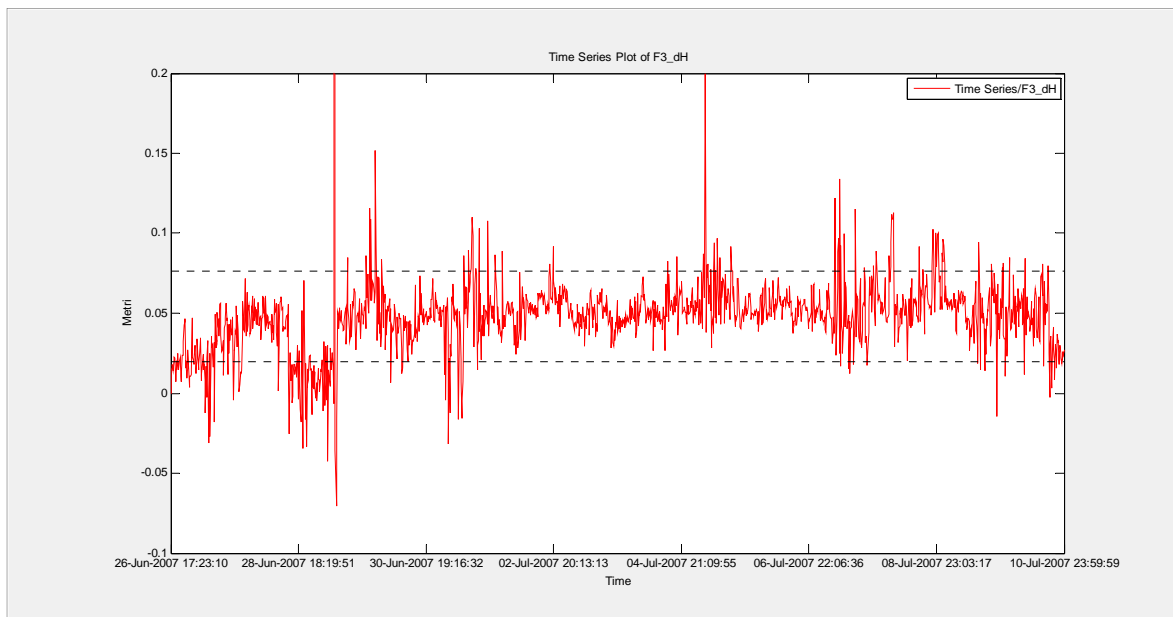


Figura 27: Serie temporale della stazione F3 (dH) con campionamento 1 secondo e lunghezza delle sessioni di 5 minuti (*tratteggiata la deviazione standard*)

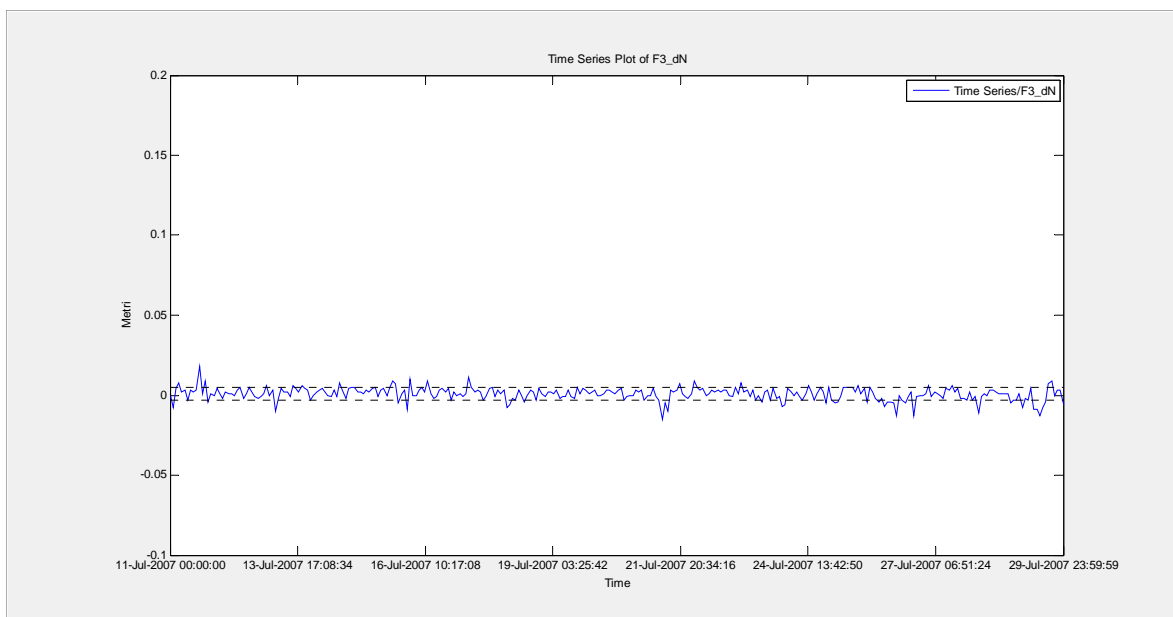


Figura 28: Serie temporale della stazione F3 (dN) con campionamento 1 secondo e lunghezza delle sessioni di 30 minuti (*tratteggiata la deviazione standard*)

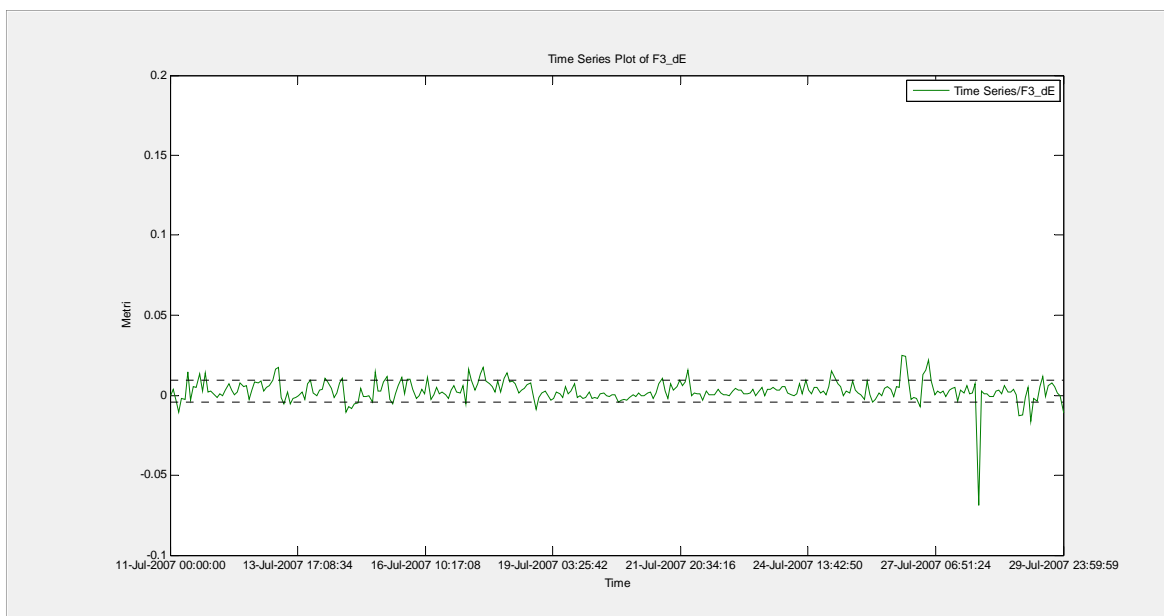


Figura 29: Serie temporale della stazione F3 (dE) con campionamento 1 secondo e lunghezza delle sessioni di 30 minuti (*tratteggiata la deviazione standard*)

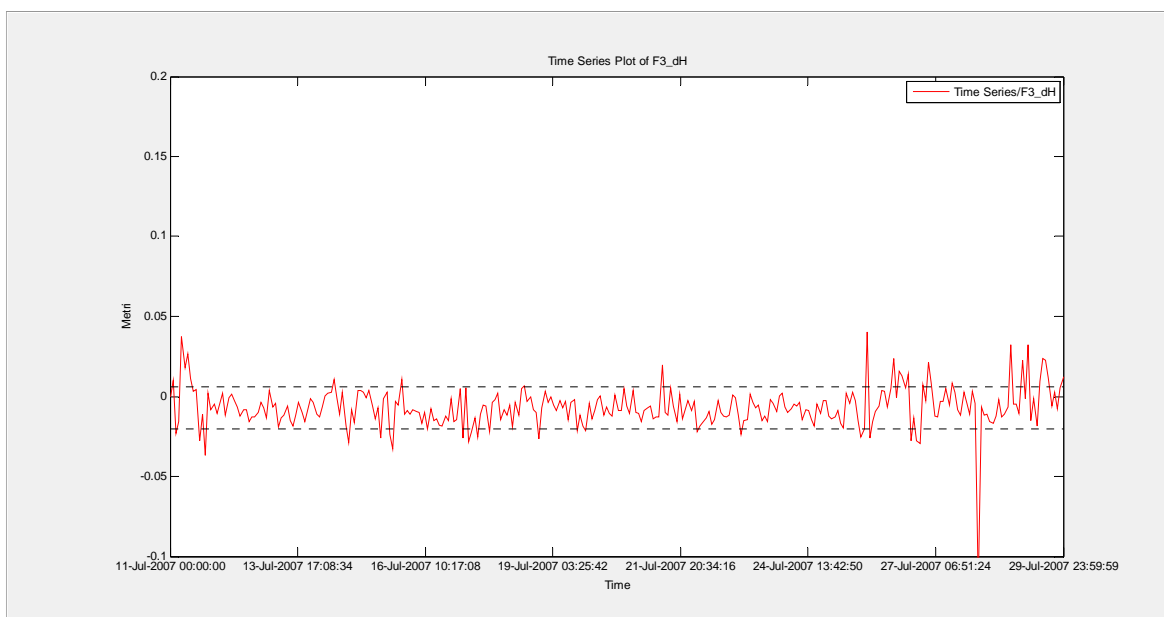


Figura 30: Serie temporale della stazione F3 (dH) con campionamento 1 secondo e lunghezza delle sessioni di 30 minuti (*tratteggiata la deviazione standard*)

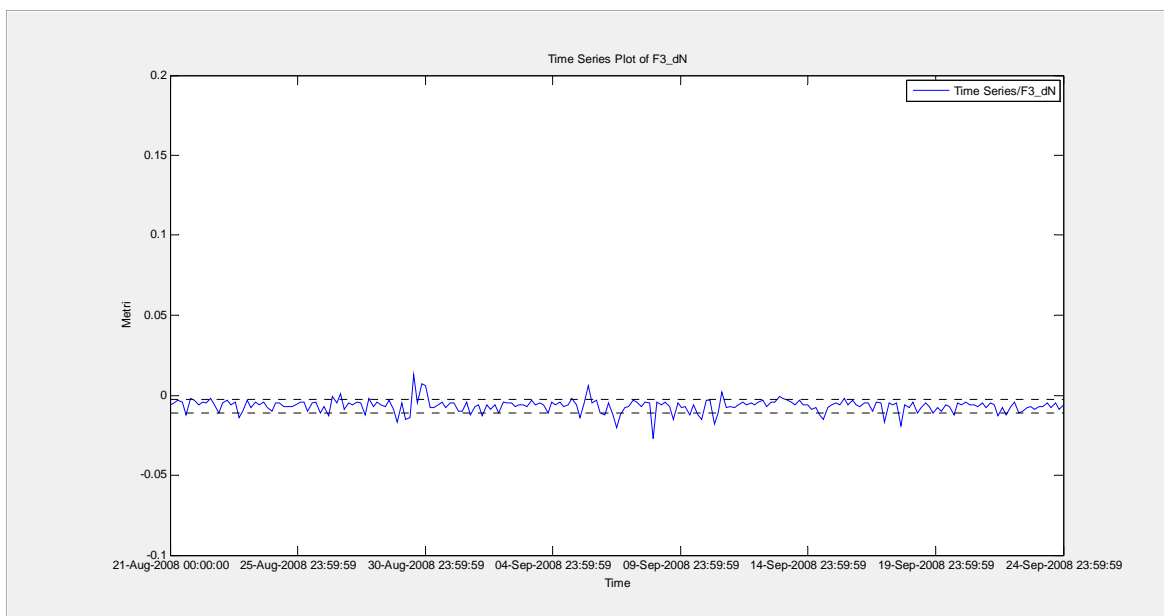


Figura 31: Serie temporale della stazione F3 (dN) con campionamento 1 secondo e lunghezza delle sessioni di 1 ora (*tratteggiata la deviazione standard*)

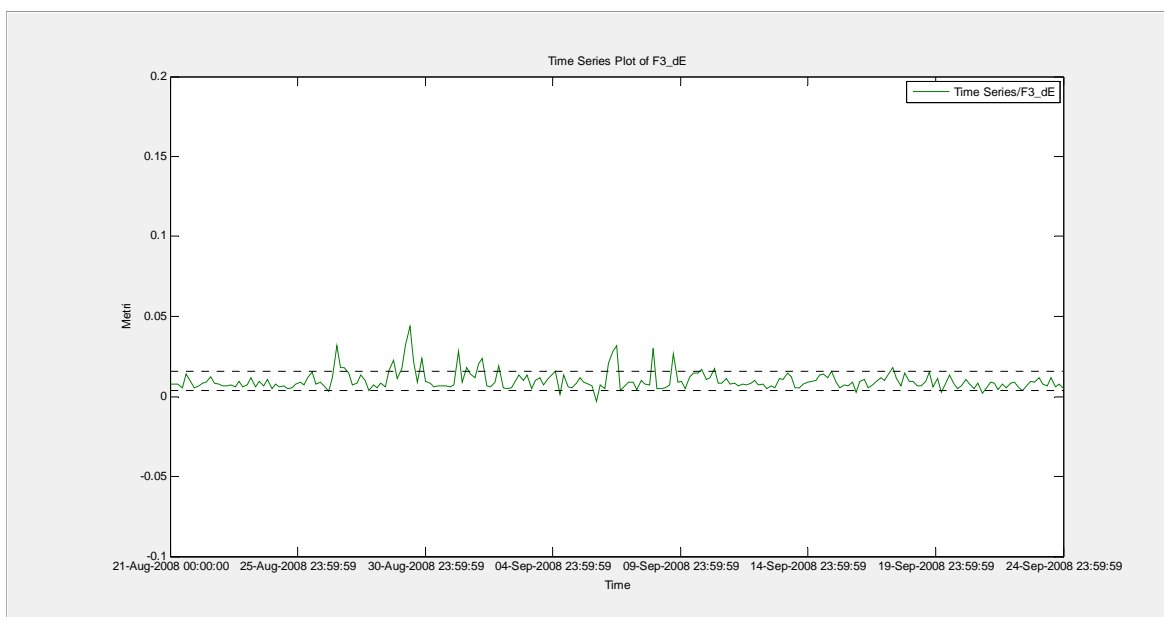


Figura 32: Serie temporale della stazione F3 (dE) con campionamento 1 secondo e lunghezza delle sessioni di 1 ora (*tratteggiata la deviazione standard*)

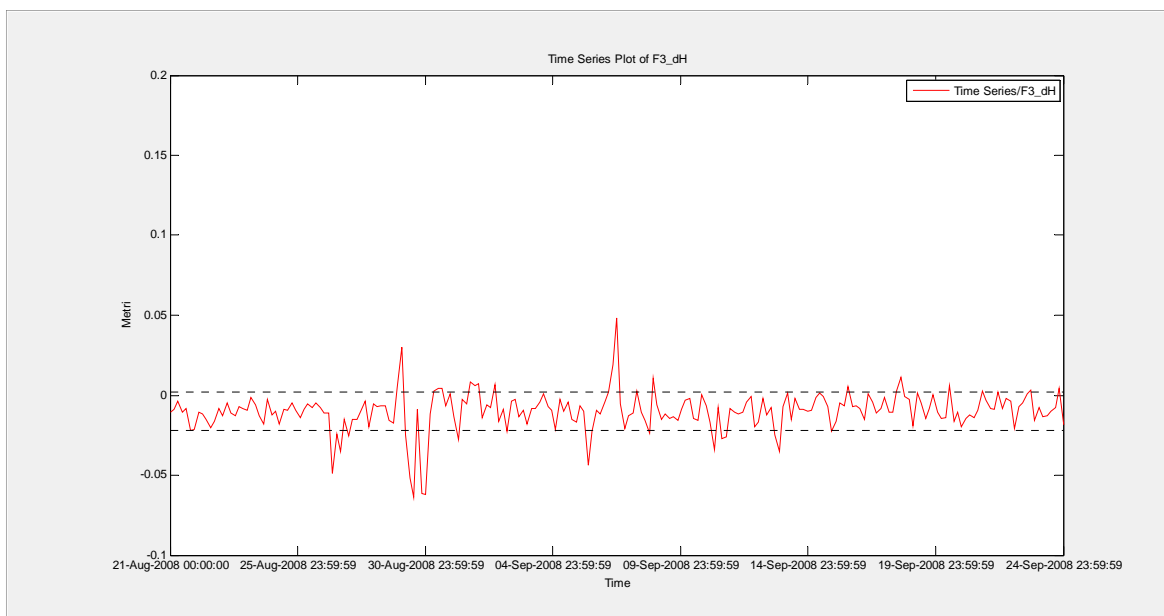


Figura 33: Serie temporale della stazione F3 (dH) con campionamento 1 secondo e lunghezza delle sessioni di 1 ora (*tratteggiata la deviazione standard*)

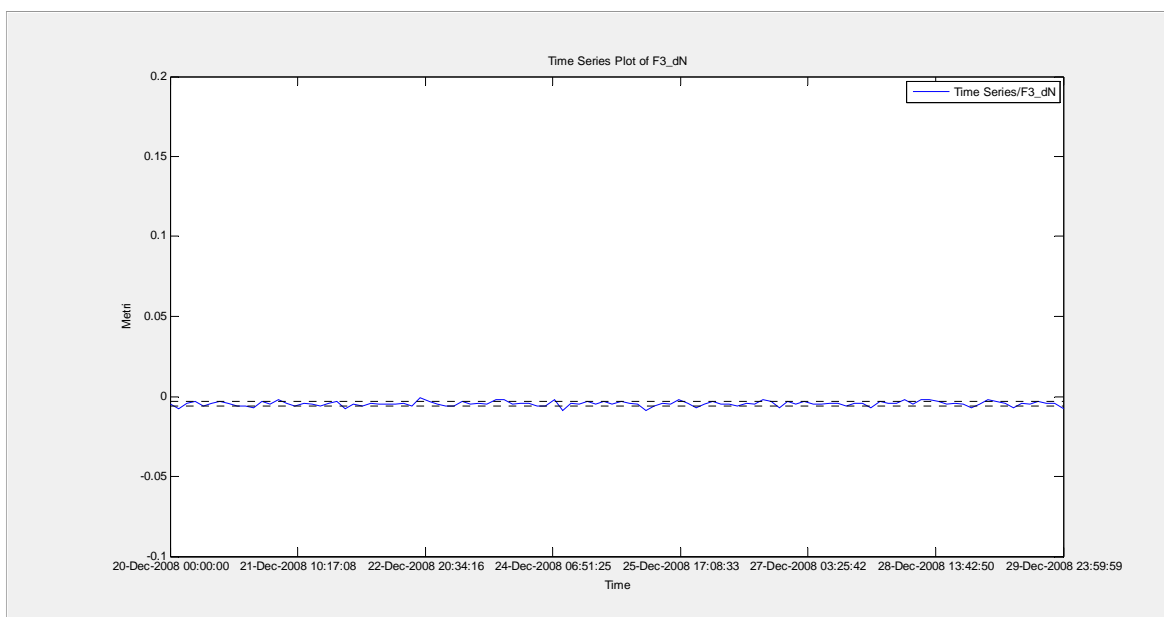


Figura 34: Serie temporale della stazione F3 (dN) con campionamento 1 secondo e lunghezza delle sessioni di 2 ore (*tratteggiata la deviazione standard*)

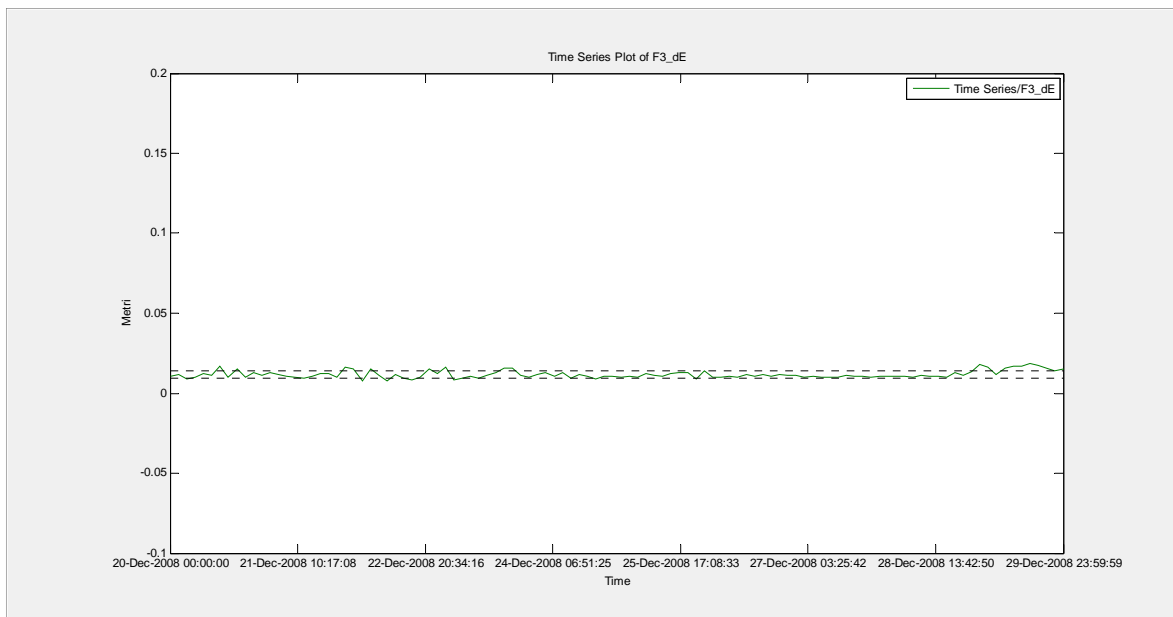


Figura 35: Serie temporale della stazione F3 (dE) con campionamento 1 secondo e lunghezza delle sessioni di 2 ore (*tratteggiata la deviazione standard*)

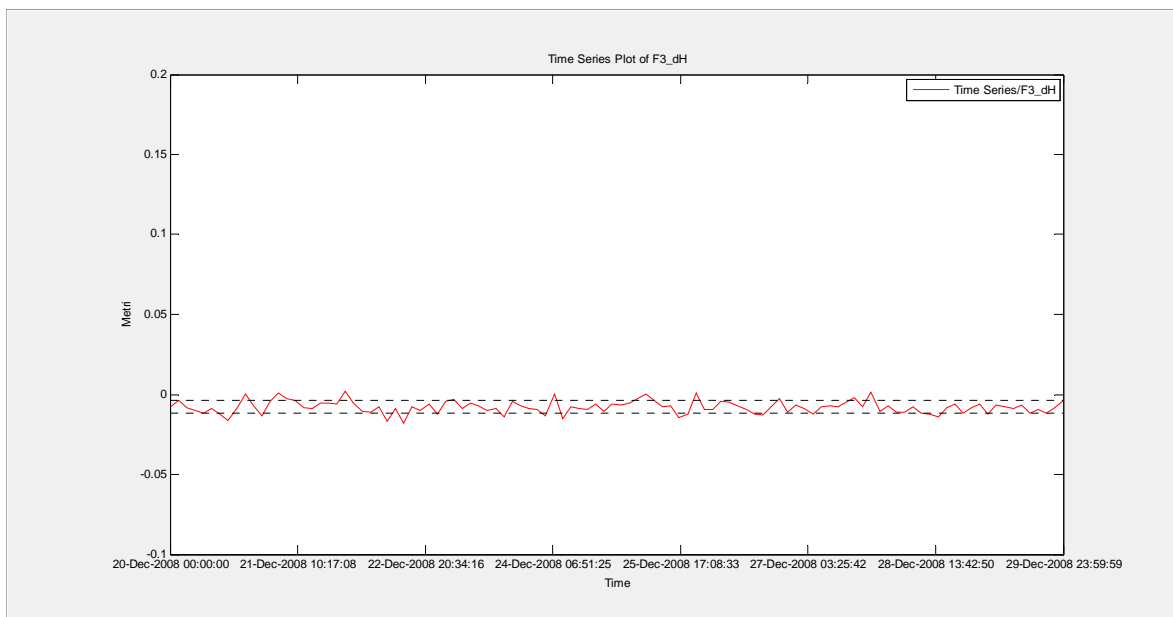


Figura 36: Serie temporale della stazione F3 (dH) con campionamento 1 secondo e lunghezza delle sessioni di 2 ore (*tratteggiata la deviazione standard*)

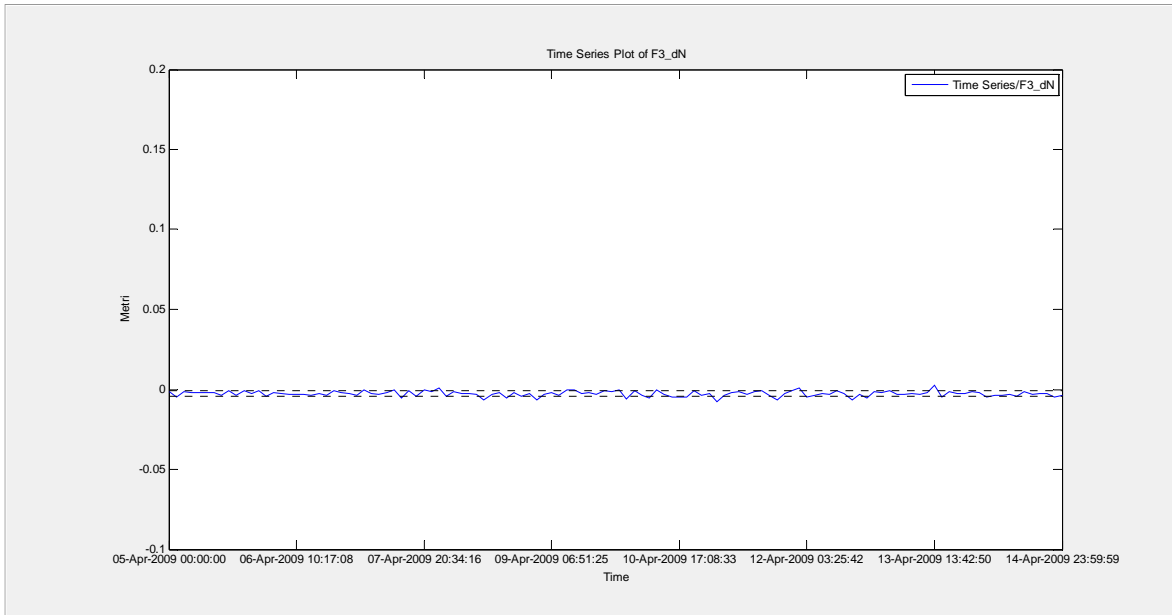


Figura 37: Serie temporale della stazione F3 (dN) con campionamento 30 secondi e lunghezza delle sessioni di 2 ore (*tratteggiata la deviazione standard*)

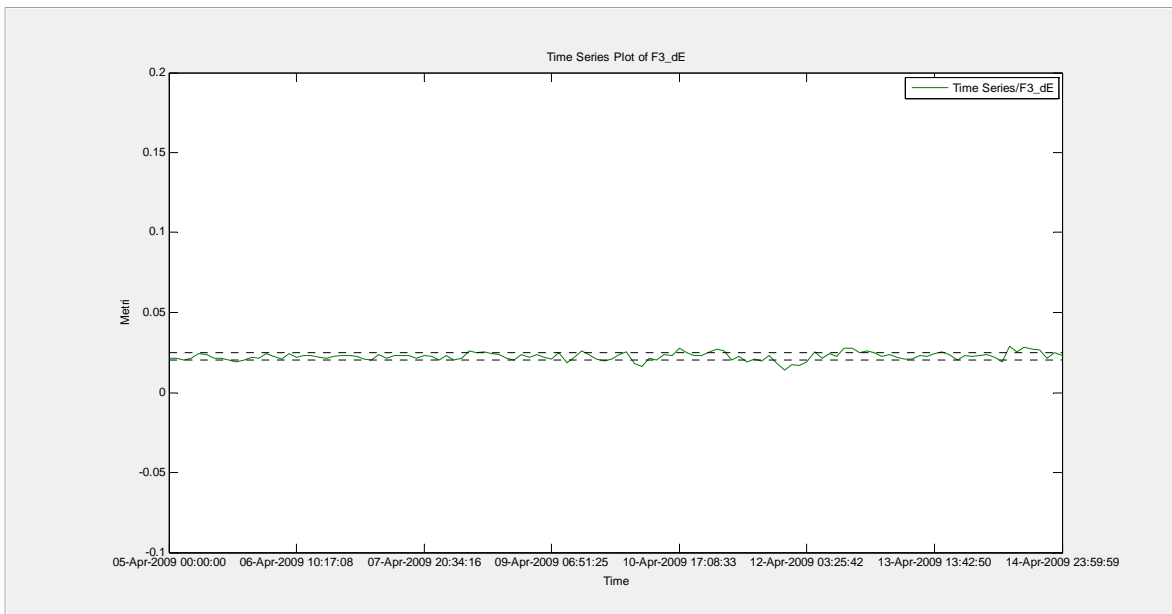


Figura 38: Serie temporale della stazione F3 (dE) con campionamento 30 secondi e lunghezza delle sessioni di 2 ore (*tratteggiata la deviazione standard*)

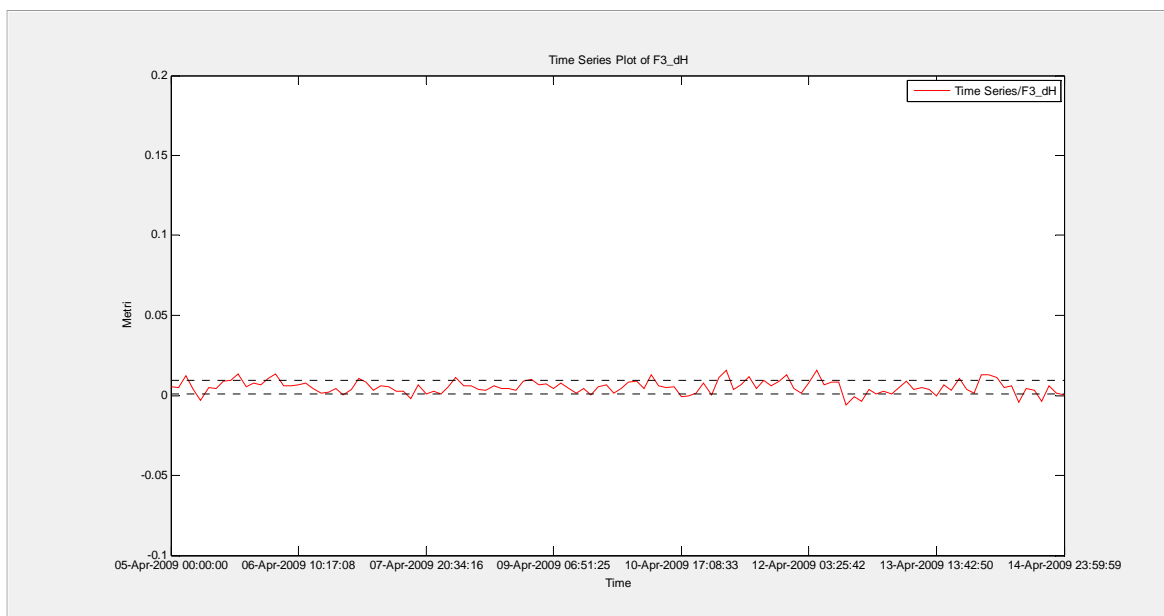


Figura 39: Serie temporale della stazione F3 (dH) con campionamento 30 secondi e lunghezza delle sessioni di 2 ore (*tratteggiata la deviazione standard*)

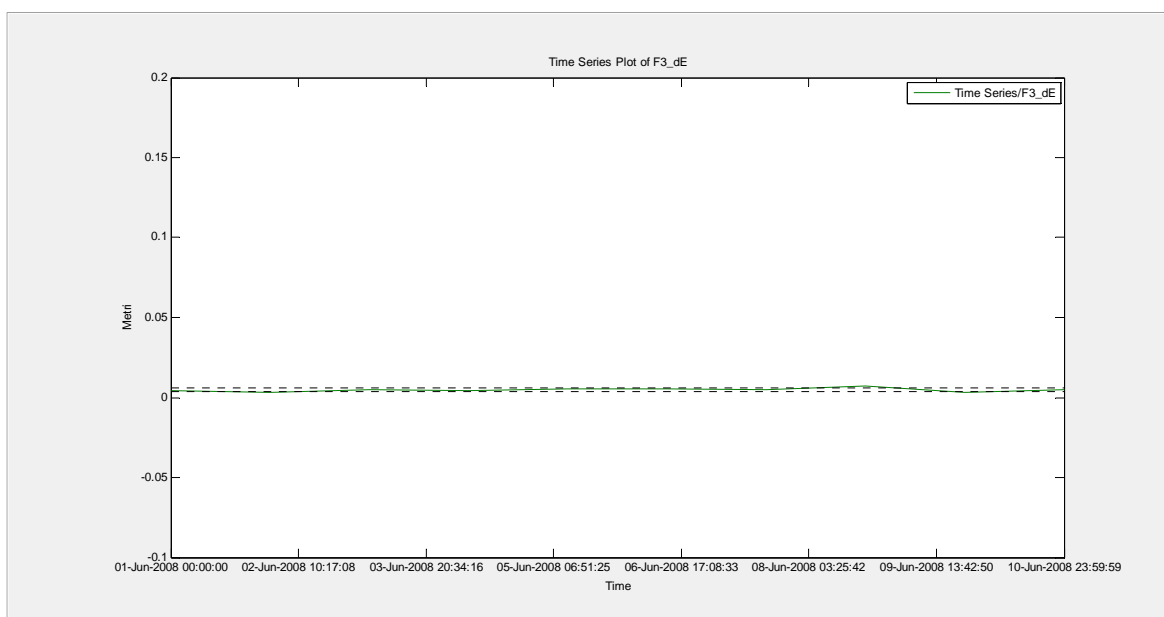


Figura 40: Serie temporale della stazione F3 (dE) con campionamento 30 secondi e lunghezza delle sessioni di 24 ore (*tratteggiata la deviazione standard*)

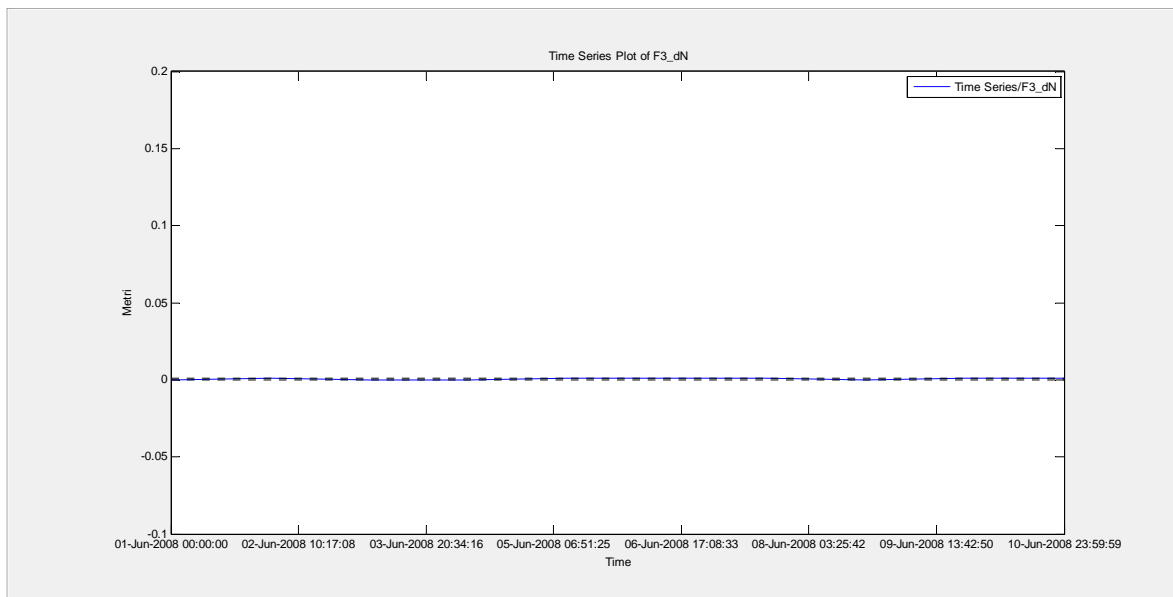


Figura 41: Serie temporale della stazione F3 (dN) con campionamento 30 secondi e lunghezza delle sessioni di 24 ore (*tratteggiata la deviazione standard*)

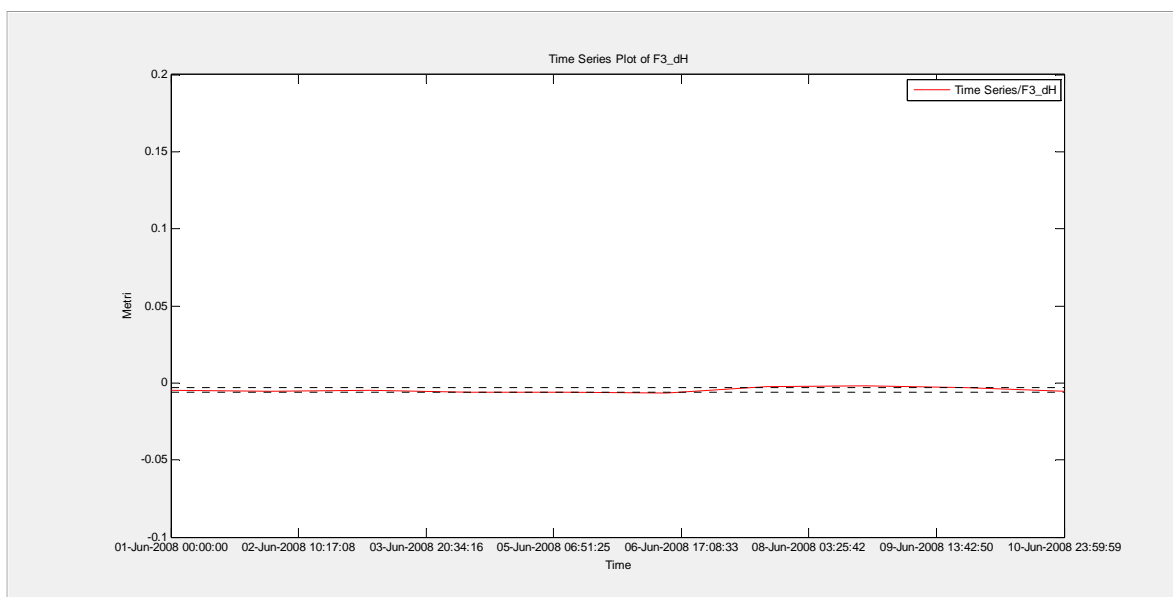


Figura 42: Serie temporale della stazione F3 (dH) con campionamento 30 secondi e lunghezza delle sessioni di 24 ore (*tratteggiata la deviazione standard*)

Dalle soluzioni ottenute sono stati calcolati i valori significativi per l'analisi dei residui. Dall'analisi si evince come la serie temporale migliora all'aumentare della lunghezza della sessione.

Capitolo 5.

Analisi dei risultati e conclusioni

Le analisi condotte in questo lavoro, delineano in maniera prominente l'aspetto della metodologia e della tipologia di elaborazione, nonché la possibilità di trascurare le correlazioni tra le basi indipendenti, e ottenere una soluzione veloce e indicativa (soprattutto per spostamenti maggiori del centimetro), particolarmente interessante per il monitoraggio con stazioni permanenti per zona in frana.

Le tabelle sottostanti riportano i valori di massimo, minimo, media, deviazione standard, e regressione lineare, calcolati per ciascuna delle elaborazioni dei dati di F3 a diverse sessioni e intervallo di campionamento.

F3 5 min	Max (m)	Min (m)	Media μ (m)	Dev. St. σ (m)	Regr. Lin. (m)
dE	0,086600000	-0,032700000	-0,001031596	0,007905062	-0,000000926
dN	0,566000000	-0,037000000	-0,007415702	0,015749802	-0,000002443
dH	0,785877100	-0,070640800	0,047806694	0,028214303	0,000015319

Tabella 5: residui ottenuti in Spider per la stazione F3 con campionamento di 1 secondo e lunghezza delle sessioni di 5 minuti

F3 30 min	Max (m)	Min (m)	Media μ (m)	Dev. St. σ (m)	Regr. Lin. (m)
dE	0,024700000	-0,068600000	0,002528105	0,006872960	-0,000006399
dN	0,018000000	-0,015000000	0,000754902	0,004097910	-0,000011450
dH	0,040490000	-0,129948200	-0,006968440	0,013177370	0,000010553

Tabella 6: residui ottenuti in Spider per la stazione F3 con campionamento di 1 secondo e lunghezza delle sessioni di 30 minuti

F3 1 h	Max (m)	Min (m)	Media μ (m)	Dev. St. σ (m)	Regr. Lin. (m)
dE	0,043500000	-0,002900000	0,009871041	0,005926020	-0,000010367
dN	0,013000000	-0,027000000	-0,006669683	0,004255891	-0,000008219
dH	0,048073100	-0,063735200	-0,010011422	0,012133576	0,000027432

Tabella 6: residui ottenuti in Spider per la stazione F3 con campionamento di 1 secondo e lunghezza delle sessioni di 1 ora

F3 2 h	Max (m)	Min (m)	Media μ (m)	Dev. St. σ (m)	Regr. Lin. (m)
dE	0,018300000	0,007600000	0,011687963	0,002366616	0,000016158
dN	-0,000999999	-0,009000000	-0,004518518	0,001589791	0,000004906
dH	0,002219000	-0,017845100	-0,007934544	0,003967164	-0,000007741

Tabella 7: residui ottenuti in Spider per la stazione F3 con campionamento di 1 secondo e lunghezza delle sessioni di 2 ore

F3 2 h 30 sec	Max (m)	Min (m)	Media (m)	Dev. St. σ (m)	Regr. Lin. (m)
dE	0,029057176	0,013764514	0,022572011	0,002527378	0,000014561
dN	0,002672704	-0,007792035	-0,002756209	0,001699201	-0,000004644
dH	0,015738249	-0,006202356	0,005240691	0,004166480	-0,000014714

Tabella 8: residui ottenuti in Spider per la stazione F3 con campionamento di 30 secondi e lunghezza delle sessioni di 2 ore

F3 24 h	Max (m)	Min (m)	Media (m)	Dev. St. σ (m)	Regr. Lin. (m)
dE	0,007100000	0,003200000	0,004810000	0,001090367	0,000096364
dN	0,001000000	0,000000000	0,000600000	0,000489898	0,000072727
dH	-0,001663300	-0,006406700	-0,004634860	0,001516898	0,000213918

Tabella 9: residui ottenuti in Spider per la stazione F3 con campionamento di 30 secondi e lunghezza delle sessioni di 24 ore

È evidente dai risultati, il notevole miglioramento delle soluzioni man mano che si passa ad un maggiore durata delle sessioni.

Dalle tabelle, inoltre, si evince che è minima la differenza sulle deviazioni standard tra i residui ottenuti con campionamento sessioni di 24 ore a 30 secondi, sessioni di 2 ore a 30 secondi e sessioni di 2 ore a 1 secondo, permettendo così uno schema di monitoraggio con sessioni brevi, necessario in situazioni di emergenza.

Le figure che seguono mostrano la serie storica completa per F3 nelle componenti planimetriche. A differenza della serie ottenute con Spider, questa contiene anche le soluzioni per i giorni nei quali, per vari problemi, Spider non ha fornito soluzione a 24 ore. Per tali giorni, si è effettuato il concatenamento dei dati archiviati per le elaborazione in tempo reale (dati di sessioni brevi), ottenendo sessioni di almeno 6 ore. Infine, per i periodi in cui si è interrotto il collegamento radio tra le stazioni di controllo e il CRED di Lago, gli intervalli mancanti sono stati recuperati utilizzando i dati grezzi, opportunamente trasformati, salvati sulle memorie dei ricevitori.

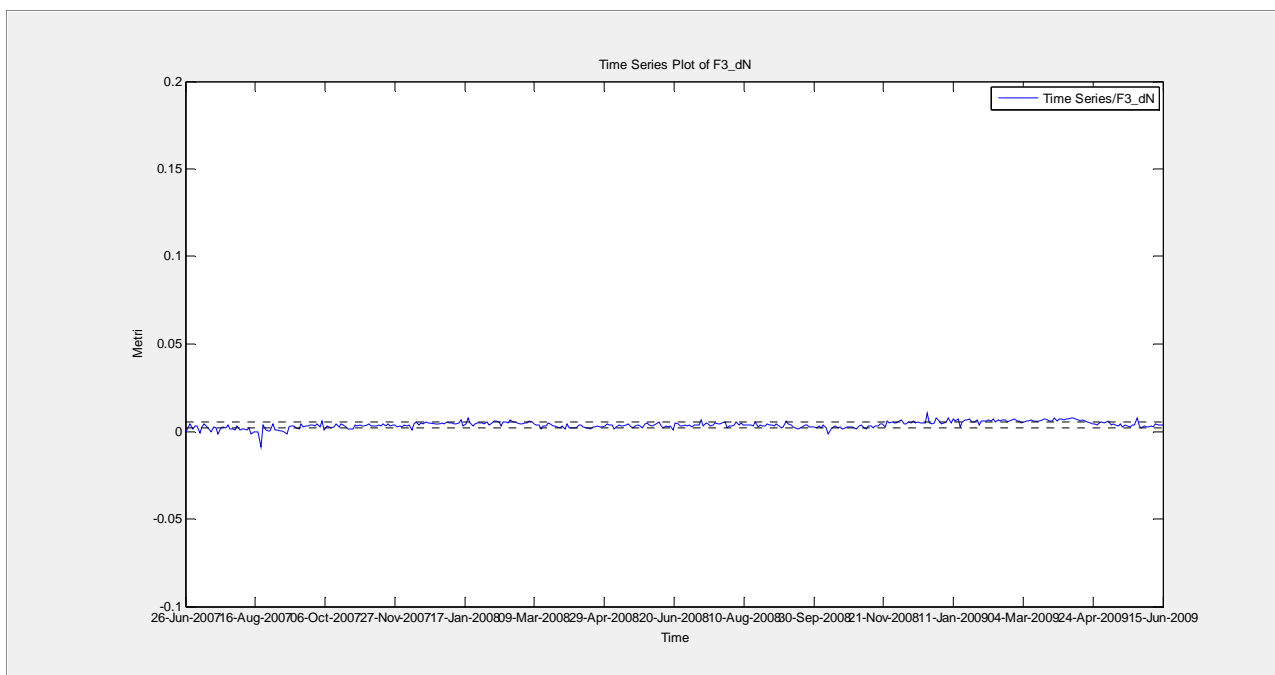


Figura 43: Serie temporale della stazione F3 (dN) con campionamento 30 secondi e lunghezza delle sessioni di 24 ore per gli anni 2007-2008-2009 (*tratteggiata la deviazione standard*)

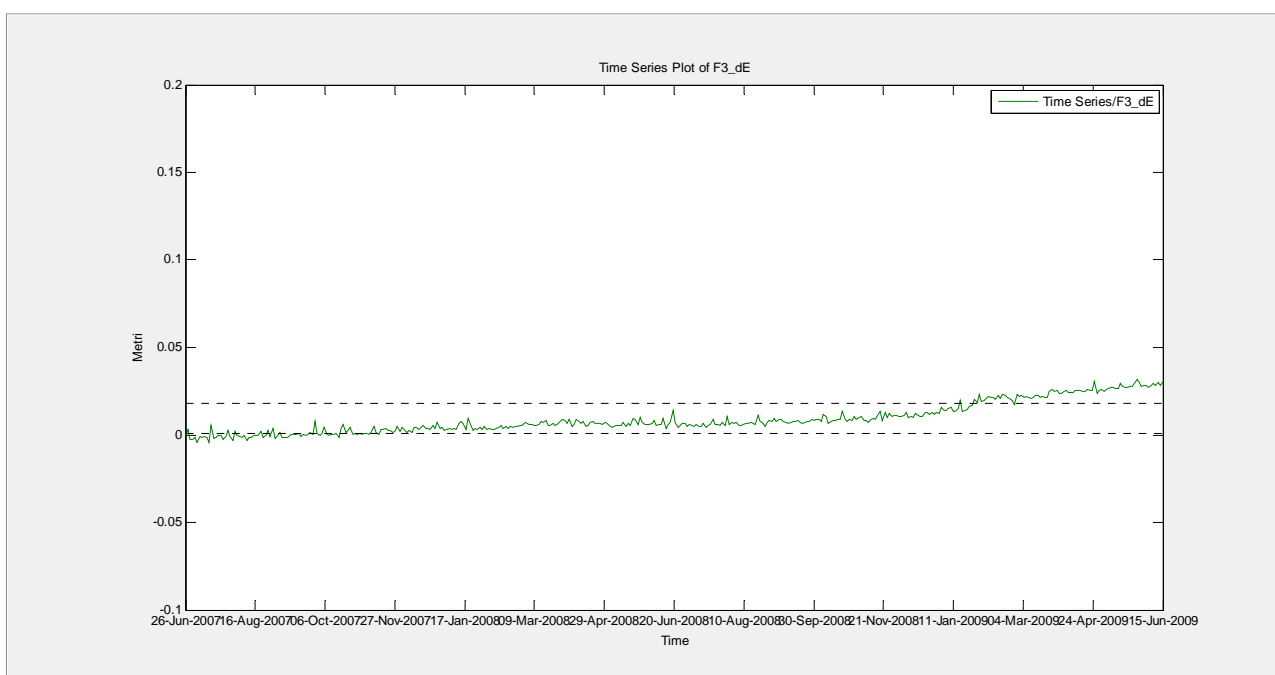


Figura 44: Serie temporale della stazione F3 (dE) con campionamento 30 secondi e lunghezza delle sessioni di 24 ore per gli anni 2007-2008-2009 (*tratteggiata la deviazione standard*)

F3 24 h	Max (m)	Min (m)	Media μ (m)	Dev. St. σ (m)	Regr. Lin. (m)
dE	0,029979243	-0,001200000	0,012990680	0,008922360	0,000141953
dN	0,005000001	-0,005000000	0,001600595	0,001575735	0,000013281
dH	0,010326000	-0,012074181	-0,005617191	0,002937972	-0,000016989

Tabella 10: residui ottenuti in Spider per la stazione F3 con campionamento di 30 secondi e lunghezza delle sessioni di 24 ore per gli anni 2007 ÷ 2009

Un altro aspetto importante per l'analisi dei risultati si basa sulle caratteristiche statistiche della serie temporale e l'analisi spettrale di quest'ultima.

In questo studio si valuta una delle componenti della serie temporale: il **trend**, cioè l'andamento nel periodo della serie. Esso è rappresentato con una funzione lineare o multilineare i cui parametri sono stimabili attraverso una regressione lineare della variabile rispetto al tempo. La regressione è una funzione che esprime matematicamente la relazione tra la variabile attesa o predetta o teorica e la variabile empirica od attuale. La retta di regressione, che meglio descrive la distribuzione dei punti, è costruita mediante il metodo dei minimi quadrati (*least squares*), secondo cui deve essere minima la somma dei quadrati degli scarti di ogni punto dalla sua proiezione verticale.

La serie temporale rappresenta un processo stocastico non stazionario. La non stazionarietà è dovuta al fatto che la serie, nelle tre componenti X, Y, Z (o N, E, H, nel sistema di riferimento locale) presenta un trend lineare che rappresenta l'andamento del punto misurato al passare del tempo.

Il metodo della regressione lineare ai minimi quadrati spiega in che modo il trend può essere rimosso rendendo la serie temporale un processo stazionario adatto alle analisi di Fourier.

Lo spettro di Fourier, infatti, rileva la presenza di componenti periodiche, in quanto sia i processi deterministici e stocastici sono caratterizzati da una funzione della frequenza, detta spettro di potenza. In particolare il metodo della FFT (*Fast Fourier Transform*) effettua l'analisi spettrale, calcolando prima l'autocorrelazione dei dati, poi la finestra temporale, e infine si esegue la trasformata, avvalendosi del *periodogramma*, un'operazione che evidenzia nel dominio delle frequenze, quello che potrebbero essere le armoniche caratteristiche della serie stessa, indicandone la potenza.

Di seguito sono rappresentate le analisi, in ambiente *Matlab*, sulle medie mobili e i trend della serie temporale, e periodogramma, relative alla stazione F3 nel periodo 2007÷2009.

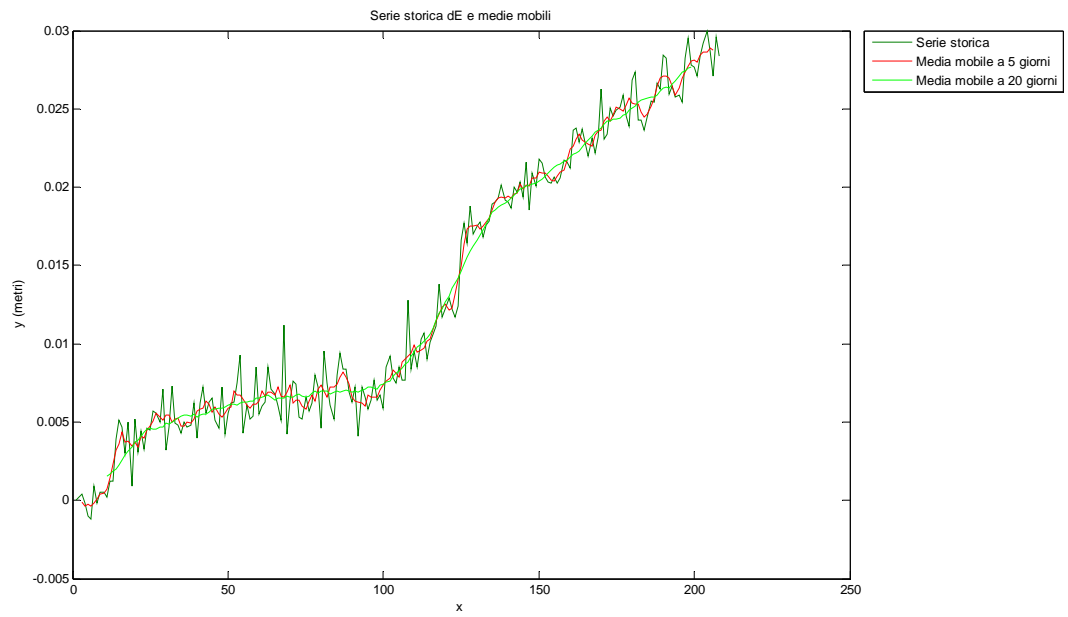


Figura 45: serie storica dE e medie mobili

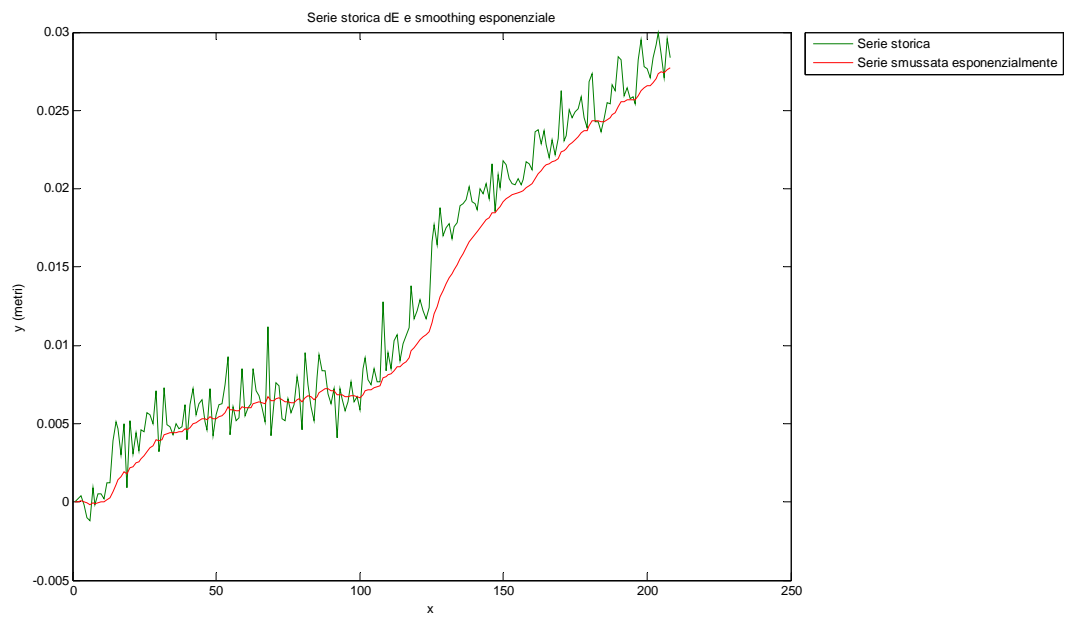


Figura 46: serie storica dE e smoothing esponenziale

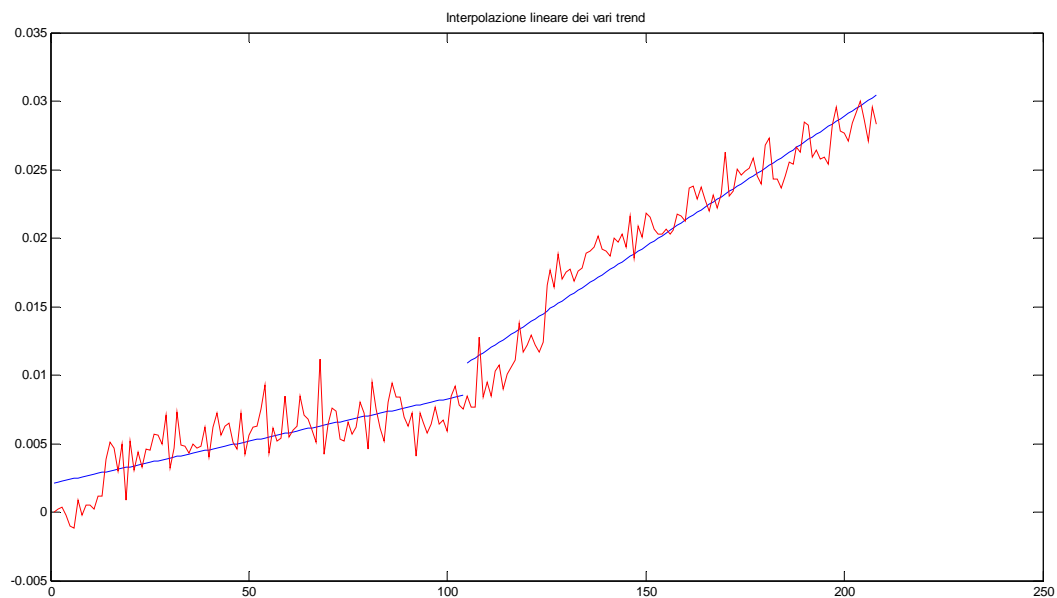


Figura 47: serie storica dE e interpolazione lineare

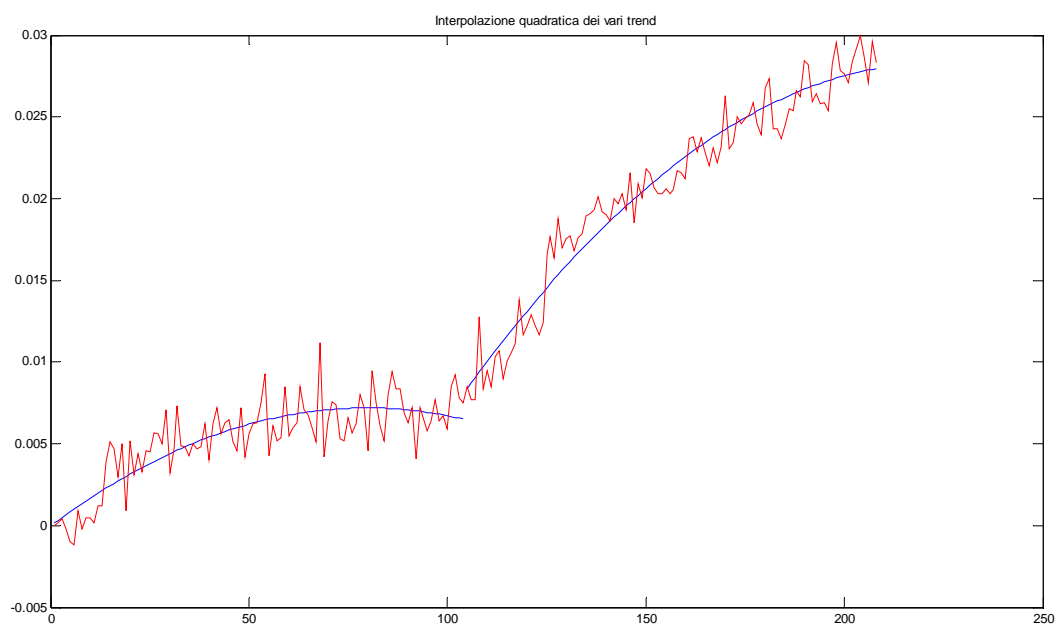


Figura 48: serie storica dE e interpolazione quadratica

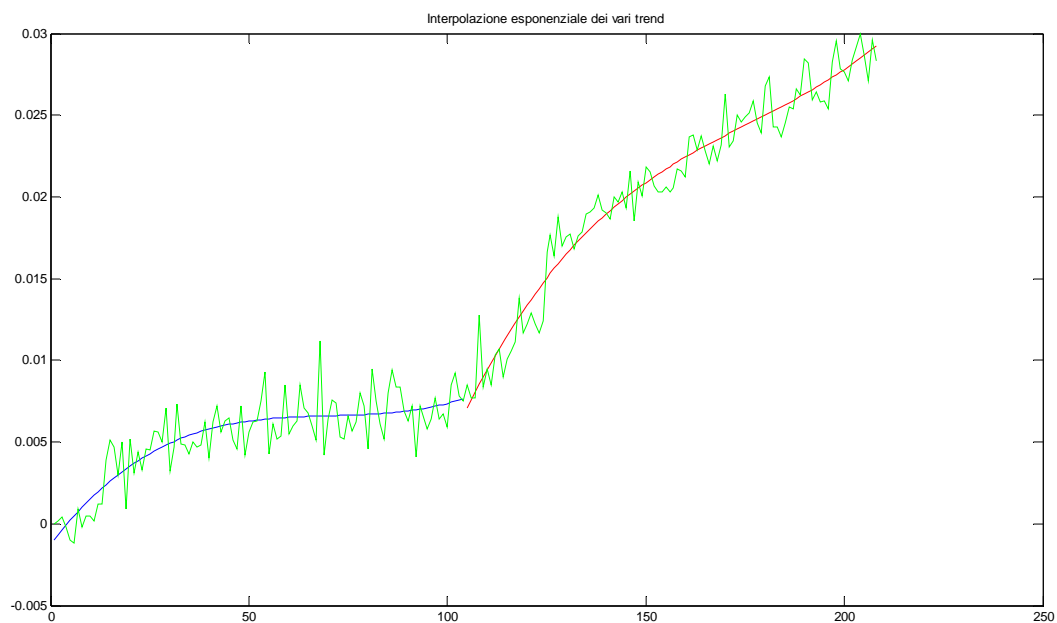


Figura 49: serie storica dE e interpolazione esponenziale

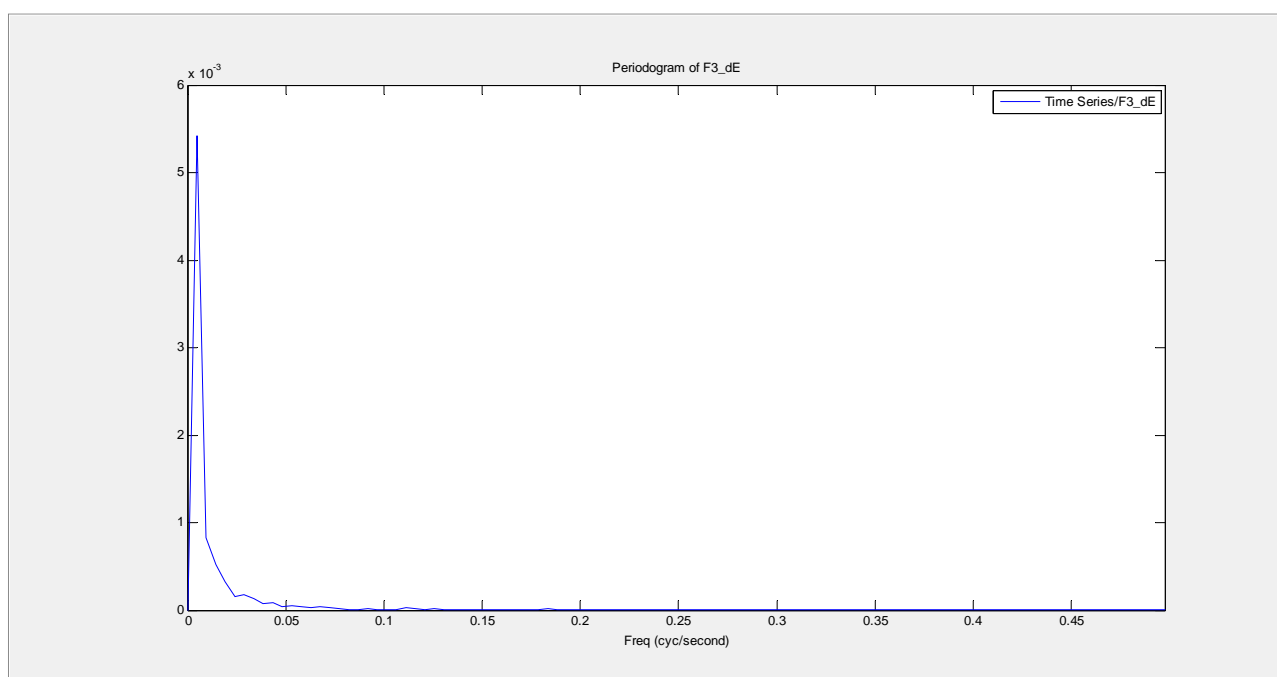


Figura 50: analisi spettrale della serie storica dE

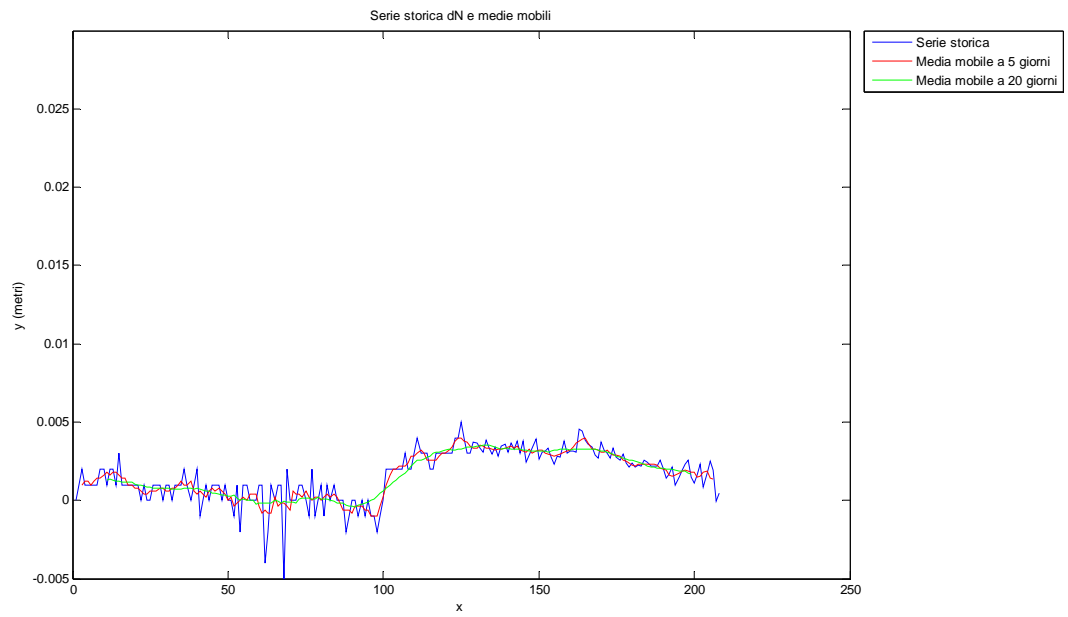


Figura 51: serie storica dN e medie mobili

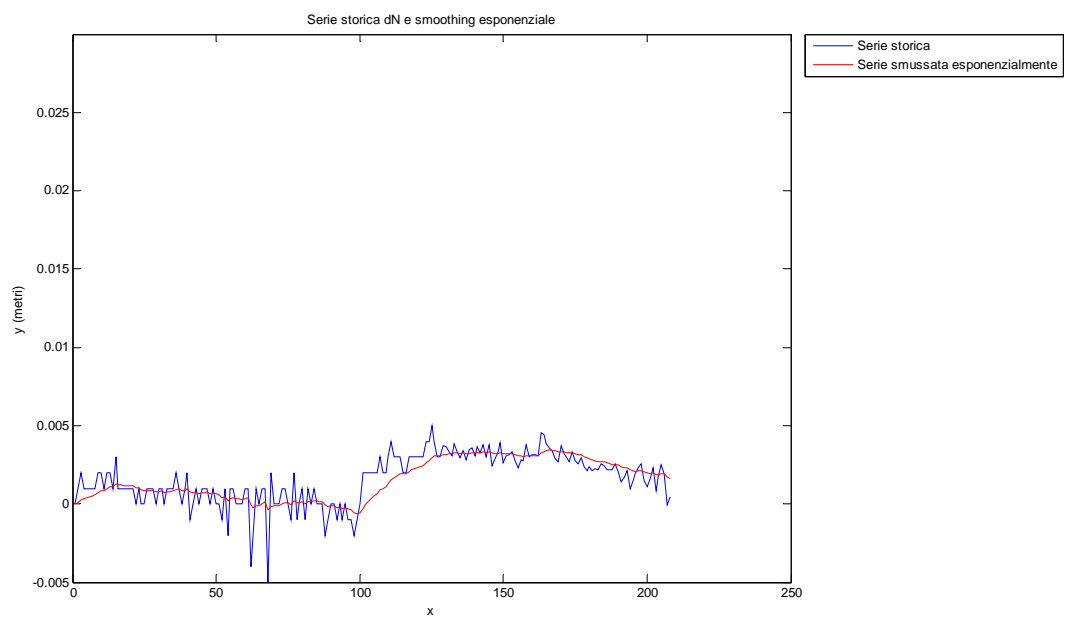


Figura 52: serie storica dN e smoothing esponenziale

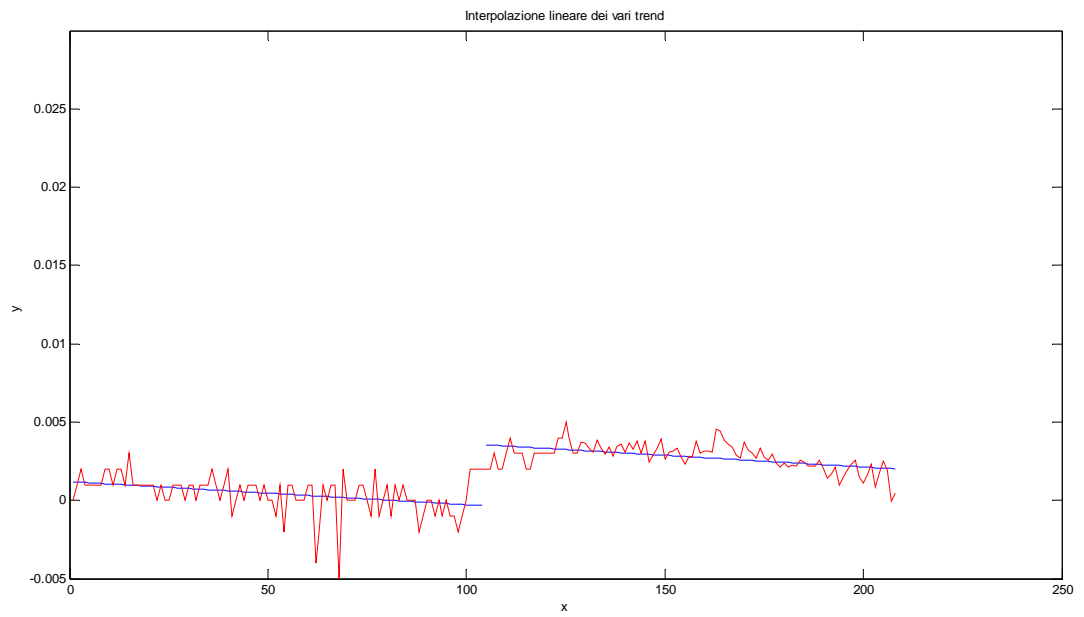


Figura 53: serie storica dN e interpolazione lineare

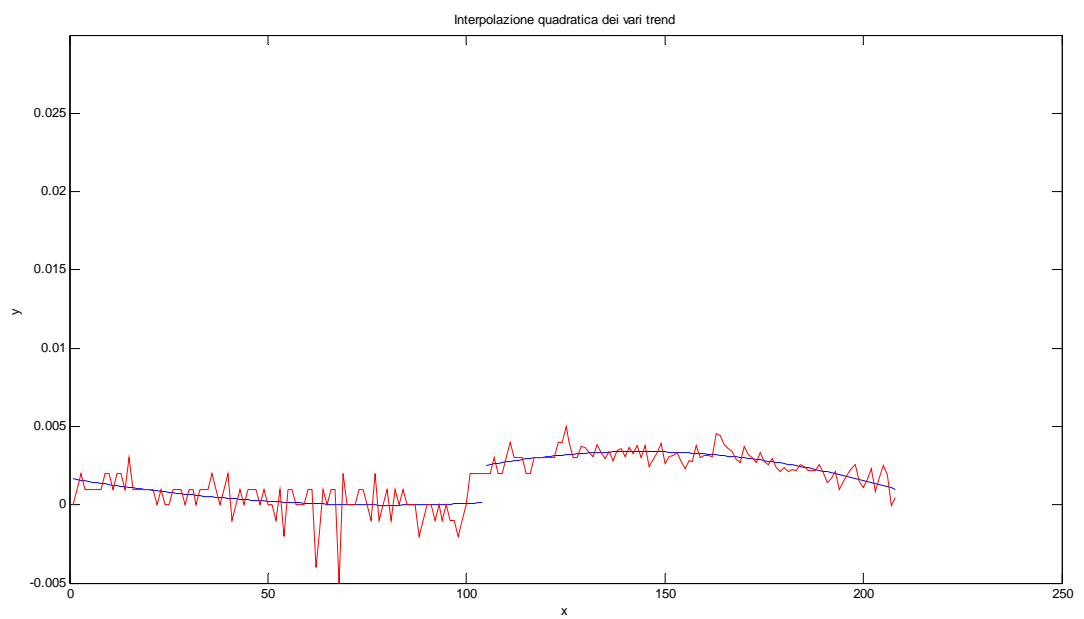


Figura 54: serie storica dN e interpolazione quadratica

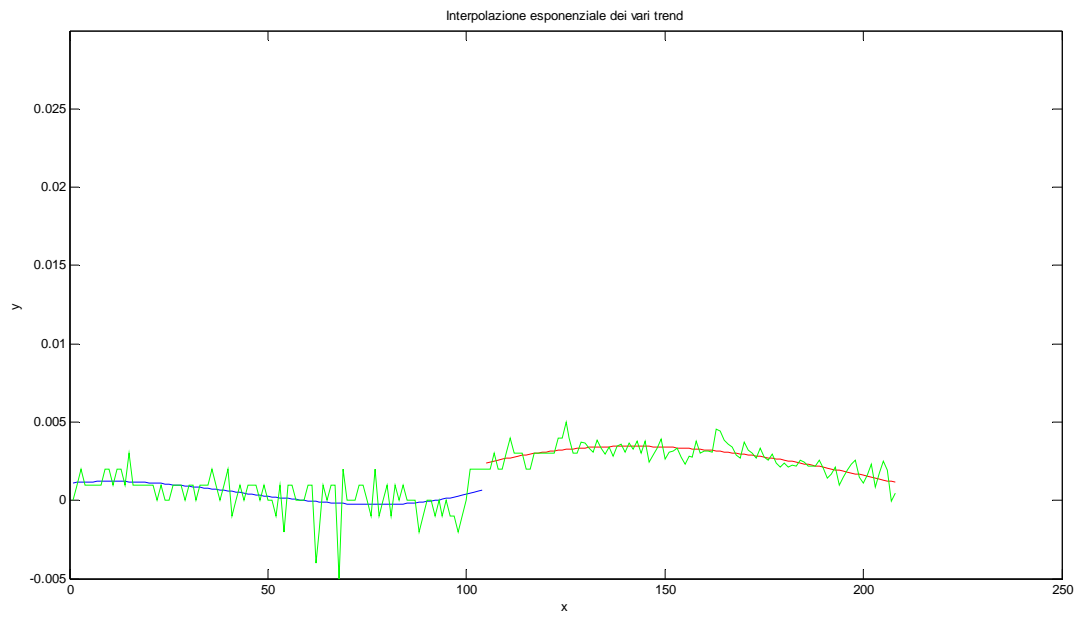


Figura 55: serie storica dN e interpolazione esponenziale

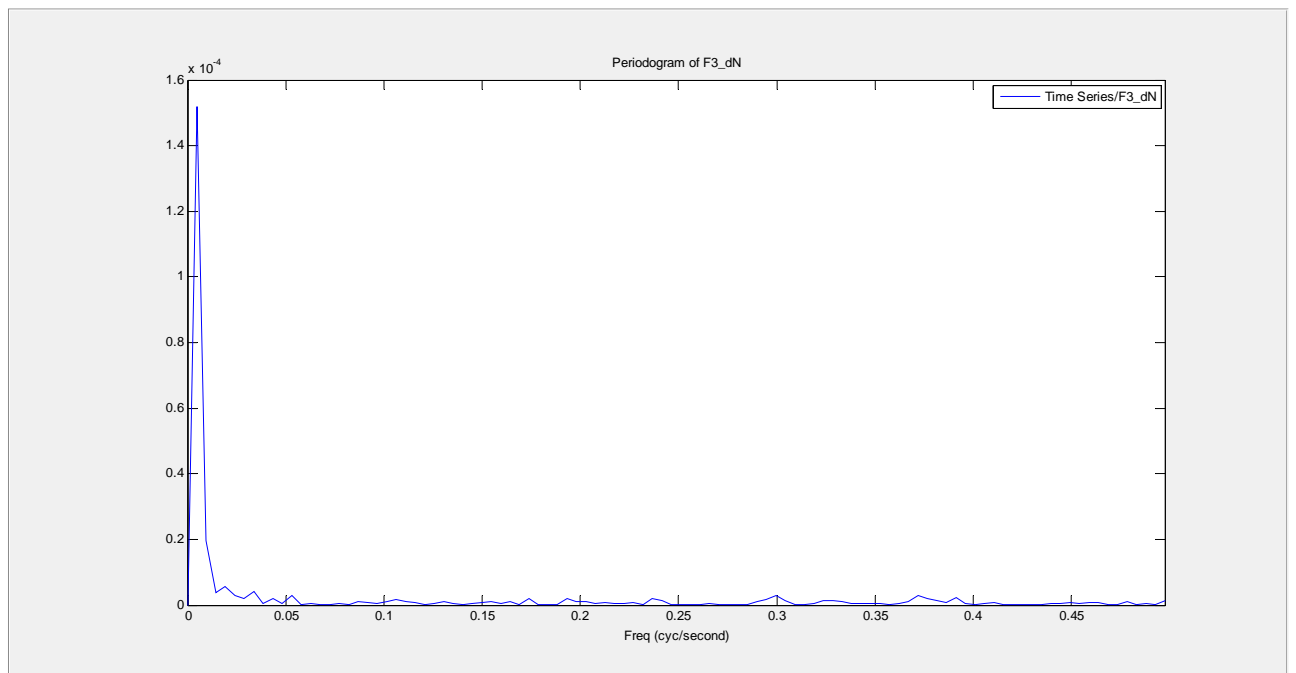


Figura 56: analisi spettrale della serie storica dN

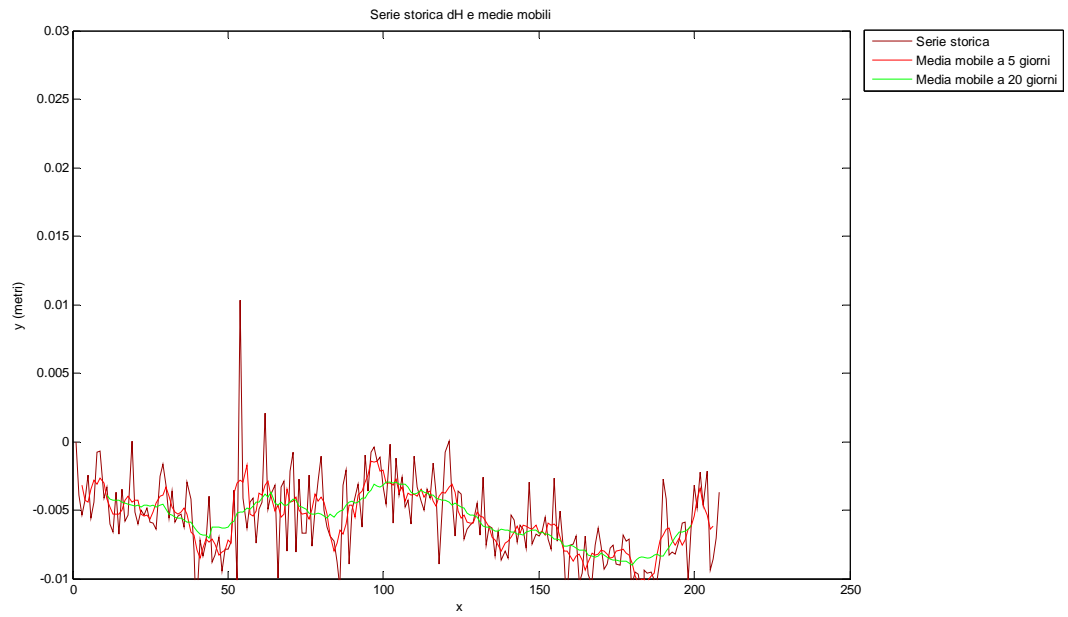


Figura 57: serie storica dH e medie mobili

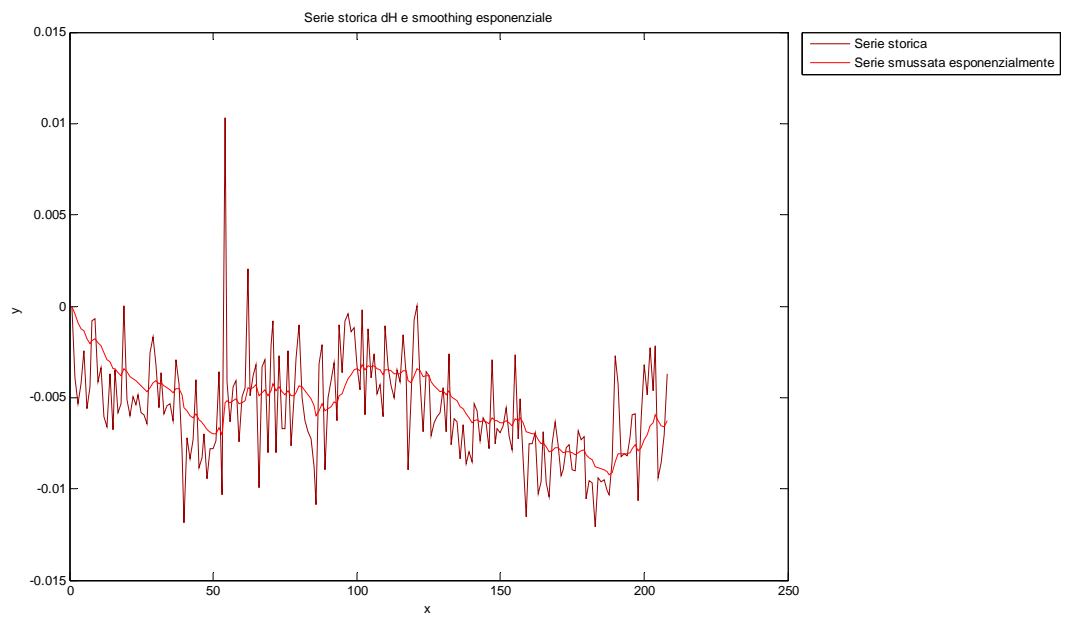


Figura 58: serie storica dH e smoothing esponenziale

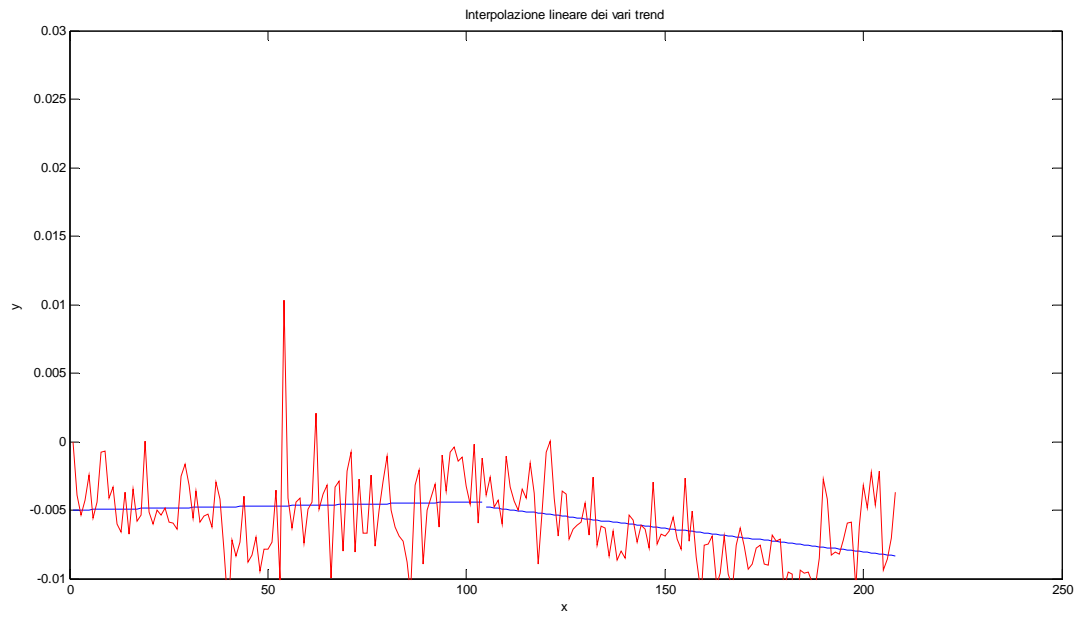


Figura 58: serie storica dH e interpolazione lineare

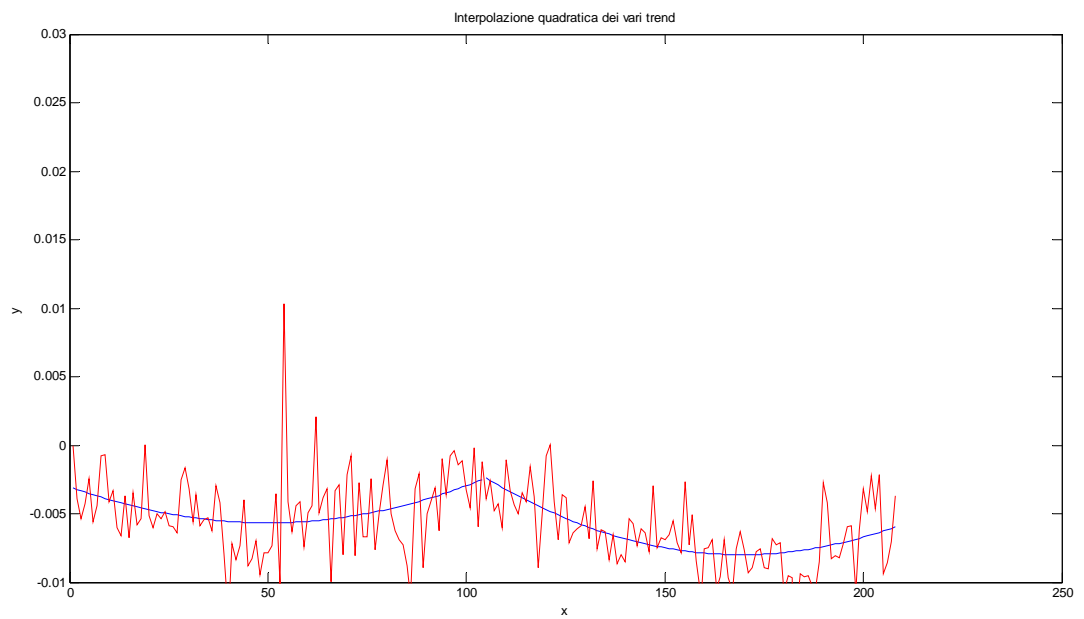


Figura 59: serie storica dH e interpolazione quadratica

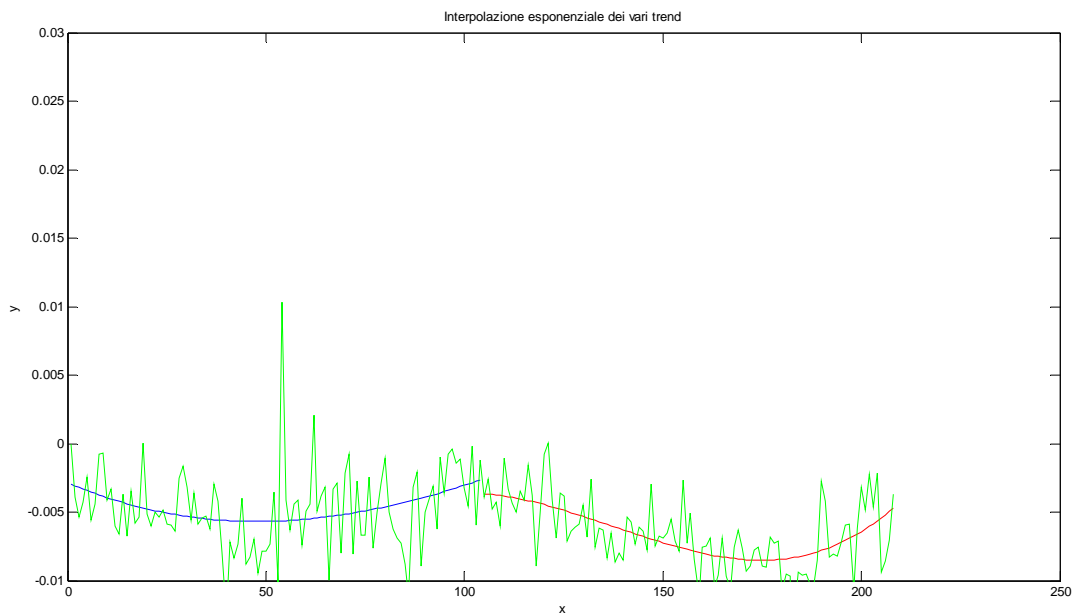


Figura 60: serie storica dH e interpolazione esponenziale

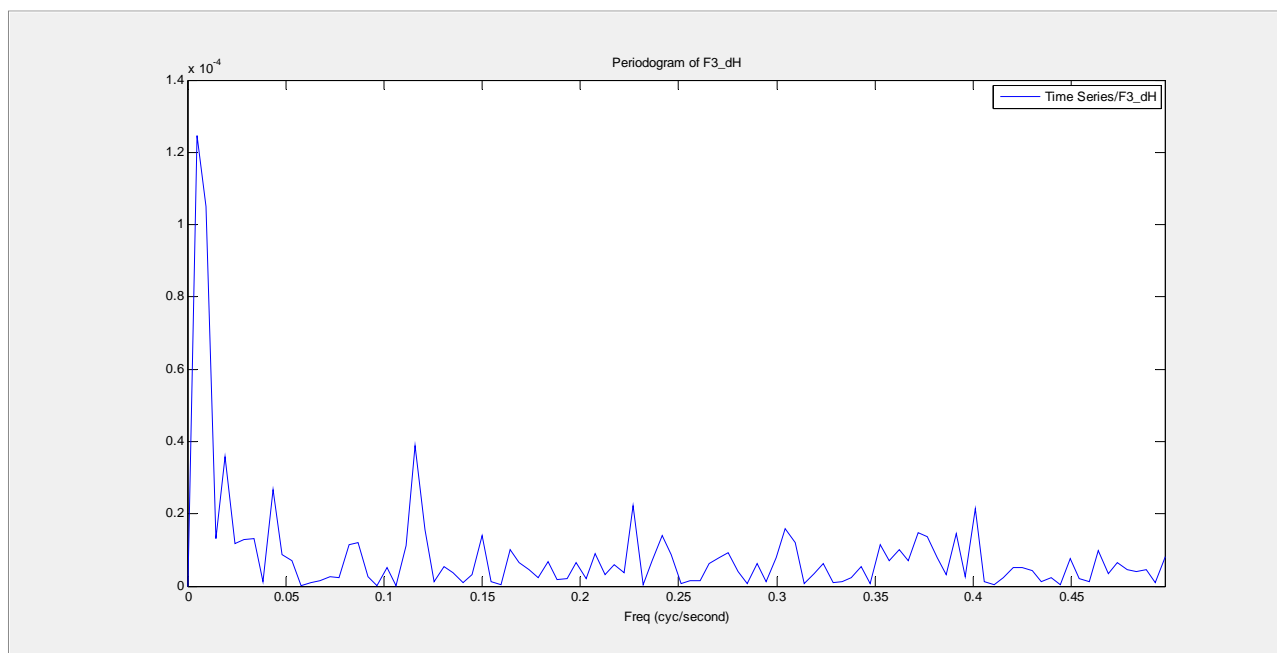


Figura 61: analisi spettrale della serie storica dH

La lettura dell'analisi spettrale mostra quali funzioni periodiche all'interno del segnale intero denotano un peso maggiore.

Le tabelle che seguono riportano i valori residui di media e deviazione standard, ottenuti per tutte le stazioni F1 F2 F3 F4 e F5, nelle tre le direzioni E, N, H.

Spider		Media μ (m)	Dev. St. σ (m)
	dE	0,001656144	0,002306356
F1	dN	0,003628818	0,003229629
	dH	-0,005147876	0,003198676
	dE	0,007831751	0,004326312
F2	dN	0,001503911	0,00153731
	dH	-0,002937198	0,005527817
	dE	0,01299068	0,00892236
F3	dN	0,001600595	0,001575735
	dH	-0,005617191	0,002937972
	dE	-0,001274816	0,001538156
F4	dN	0,004592431	0,003436918
	dH	-0,002860257	0,003999848
	dE	0,078818049	0,060869782
F5	dN	-0,017670349	0,013850911
	dH	-0,053629357	0,043834303

Tabella 11: residui ottenuti per le serie temporali delle stazioni F1, F2, F3, F4, F5 in Spider

Il Trimble Total ControlTM si è prestato in maniera soddisfacente alle elaborazioni, raggiungendo errori dello stesso ordine di Spider, che al massimo hanno subito oscillazioni più forti per quelle stazioni la cui strumentazione è stata oggetto di sfortunate vicissitudini durante l'anno 2008.

TTC		Media μ (m)	Dev. St. σ (m)	Offset Dev. St. (m)
	dE	0,0009	0,079571626	0,0016
F1	dN	0,0041	0,059692346	0,0023
	dH	-0,0172	0,062609026	0,0055
	dE	0,0065	0,004359130	0,0003
F2	dN	0,0019	0,001899549	0,0002
	dH	-0,00110	0,040907938	0,0044
	dE	0,0139	0,008878588	0,0004
F3	dN	0,0008	0,001071562	0,0002
	dH	-0,0083	0,034685366	0,0004
	dE	-0,0009	0,001238048	0,0002
F4	dN	0,0049	0,003420262	0,0002
	dH	-0,0060	0,024275014	0,0004
	dE	0,0785	0,060794211	0,0025
F5	dN	-0,0182	0,112456256	0,0007
	dH	-0,0597	0,304450935	0,0020

Tabella 12: residui ottenuti per le serie temporali delle stazioni F1, F2, F3, F4, F5 in TTC

Le deviazioni standard, per entrambi i software, raggiungono valori dell'ordine del centimetro. Tuttavia per Spider le accuratze ottenute sono migliori: spesso l'errore è sub-

centimetrico; mentre per TTC ha raggiunto valori al centimetro e raramente al decimetro. Di seguito si riportano le differenze tra le deviazioni standard ottenute.

Spider -TTC		$\Delta\sigma$ (m)	$ \Delta\sigma $ (m)
	dE	-0,077265270	0,077265270
F1	dN	-0,056462717	0,056462717
	dH	-0,059410350	0,059410350
	dE	-0,000032818	0,000032818
F2	dN	-0,000362239	0,000362239
	dH	-0,035380121	0,035380121
	dE	0,000043772	0,000043772
F3	dN	0,000504173	0,000504173
	dH	-0,031747394	0,031747394
	dE	0,000300108	0,000300108
F4	dN	0,000016656	0,000016656
	dH	-0,020275166	0,020275166
	dE	0,000075571	0,000075571
F5	dN	-0,098605345	0,098605345
	dH	-0,260616632	0,260616632
valore medio $\Delta\sigma$		-0,042614518	
valore medio $ \Delta\sigma $			0,042739889

Tabella 13: differenza dei residui ottenuti in Spider con quelle ottenute in TTC

L'elaborazione dei dati GPS eseguite in automatico, da remoto, mediante il software di gestione *Spider* ha generato residui, sulle analisi delle serie temporali, dell'ordine del sub-centimetro, garantendo un'accuratezza soddisfacente allo scopo di fornire elementi che definiscono la cinematica delle deformazioni e i parametri di precisione delle posizioni delle coordinate, utili alla individuazione di soglie d'allarme.

La differenza delle deviazioni standard tra i due software, non risulta particolarmente significativa, nonostante TTC mostra dei residui talora maggiori, le cui cause dovranno essere approfondite. L'utilizzo di software automatico come Spider appare quindi adeguato nei casi di monitoraggio dei versanti in frana, per i quali consente di spingere il monitoraggio a frequenze di controllo in tempo quasi reale.

Sebbene i software commerciali permettono elaborazioni facili e veloci dei dati GPS o GNSS, va sottolineato, tuttavia, che il rigore statistico dei risultati richiede l'impiego di software scientifici, quali, ad esempio, il *Bernese*, che forniscono analisi di dati per il controllo delle deformazioni ad un livello superiore di precisione, a discapito di tempi e calcoli più lunghi e più complessi ma i cui risultati sono comunque indispensabili per la gestione e il controllo di zone a rischio naturale.

Bibliografia

Antronico L., Bonci L., Campi F., Cesi C., Eulilli V., Gullà G., Lucidi A., Pulsinelli C., Sorriso-Valvo M., Tansi C. & Vullo F., 1999, *Metodologie integrate per il monitoraggio dei fenomeni franosi: l'esempio di Lago (Cosenza)*. Atti della Conferenza Nazionale Informazioni Territoriali e Rischi Ambientali, Napoli (Italy), Novembre 1999, I, 129-138.

Barbarella M. ,2008, *Controllo movimenti e analisi dei risultati*, corso di aggiornamento Convegno Nazionale SIFET.

Bonci L., Calcaterra S., Cametti A., Crespi M., De Vendictis L., Gambino P., Luzietti L., Merli K., 2004, *Definizione di un protocollo operativo per il monitoraggio degli spostamenti superficiali* , Boll. Soc It. di Fotogrammetria e Topografia, N° 3, pp. 145-155.

Bonci L., Calcaterra S., Gambino P., Giuliani R., Mattone M., 2005, *Le reti GPS del Servizio Geofisica di Apat*. Atti del Convegno SIFET, Palermo, 2005.

Calcaterra S., Cesi C., Gambino P., 2008, *Reti di monitoraggio integrato GPS-geotecnico delle frane di Lago (CS) e Costa La Gaveta (PZ)*, Atti 12° Conferenza Nazionale ASITA.

Caporali A., R. Maseroli, M. Pierozzi, 2002, *Coordinate ETRS89 delle Stazioni GPS permanenti in Italia* , GNGTS – Atti del 21° Convegno Nazionale / 07.10, CD-Rom.

Caporali A., 2003, *Analisi statistica di serie temporali di coordinate di stazioni permanenti GPS della rete EUREF* , GNGTS – Atti del 22° Convegno Nazionale / 10.02.

Cina A., 2000, *GPS: Principi, modalità, tecniche di posizionamento*, CELID.

Gullà G., Aceto L., Antronico L., Bonci L., Calcaterra S., Campi F., Cesi C., D'Onofrio D., Eulilli V., Gambino P., Guardia S., Lucidi A., Matarazzo D., Niceforo D., Pulsinelli C., Reali C., Sorriso-Valvo M., Valli F. & Vullo F., 2003, *Rete GPS nel Sackung di Lago (CS): configurazione attuale e previsione definitiva*. Atti I Conferenza regionale di Cartografia: "La cartografia per il controllo e la gestione del territorio", Lamezia Terme (Italy), Giugno 2003, CD ROM.

Gullà G., Sorriso Valvo M., Bonci L., Cesi C., Calcaterra S., Eulilli V., Gambino P., Niceforo D., Reali C., Vullo F., et al., 2007, *Displacements on a slope affected by deep-seated gravitational slope deformation: Lago, Calabria, Italy*. Geoitalia 2007, Sesto Forum Italiano di Scienze della Terra, Rimini 12-14 settembre 2007, Epitome, vol. 2.

Manzino A., 2002, *Stazioni permanenti GNSS in Italia: scopi, usi e prospettive*. Relazione Invitata ASITA in Atti della VI Conferenza Nazionale ASITA, Perugia – novembre 2002

Maseroli R., 2009, *La rete dinamica Nazionale ed il nuovo Sistema di Riferimento Geodetico*, Convegno GPS-RTK: un servizio di posizionamento in tempo reale in Friuli Venezia Giulia, Udine, 7 Ottobre 2009.

Merli K., 2001, *Strategie di elaborazione dati nelle reti GPS finalizzate al monitoraggio di movimenti franosi*, Tesi di Laurea in Ingegneria dell'Ambiente e Territorio.

Lachapelle G., Alves P., Fortes L. P., Cannon M. E., Townsend B., 2000, *DGPS RTK positioning using a reference network*, in Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 2000), Salt Lake City, Utah, 19-22 settembre 2000.

Sansò F., de Lacy M. C., 2001, *Uno studio sulle diverse applicazioni del GPS e sul futuro sviluppo della rete di stazioni permanenti GPS sul territorio italiano orientate alla creazione di un servizio geodetico nazionale*, International Geoid Service.

Sorriso-Valvo M., Gullà G., Antronico L., Tansi C., Amelio M., 1999, *Mass movement, geologic structure and morphologic evolution of the Pizzotto-Greci slope (Calabria, Italy)*. Geomorphology, 30, 147-163.

Santamaria R., 2008, *Dispense Fondamenti di Cartografia e Navigazione* corso di Laurea in Scienze e Tecnologie.

u-bolx AG, 2007, *Essentials of Satellite Navigation, Compendium*.

Siti Internet:

<http://www.trimble.com>, 30/10/2009

<http://www.laica.com>, 30/10/2009

<http://www.igmi.org>, 18/11/2009

<http://www.apat.it>, 23/09/2009

http://geomatica.como.polimi.it/corsi/geodetic_monitoring, 30/09/2009

http://geomatica.como.polimi.it/corsi/monitoraggio_deformazioni, 30/09/2009