

Prime analisi delle elaborazioni GNSS orarie del sito di Madonna del Sasso

Ambrogio Maria Manzino ^(a), Alberto Cina ^(a), Stefano Gandolfi ^(b)

^(a) DIATI, Politecnico di Torino, C.so Duca degli Abruzzi 24 10129 Torino, 011/0907675, (ambrogio.manzino; alberto.cina)@polito.it

^(b) DICAM, Alma Mater Studiorum Università di Bologna Viale del Risorgimento 2 40136 Bologna 051/2093102. Stefano.gandolfi@unibo.it

Riassunto

Nell'ambito di un progetto di ricerca del CSI Piemonte che il Politecnico di Torino – DIATI ed altri enti hanno terminato nel 2018, sono state installate cinque stazioni di monitoraggio GNSS prototipali in siti nei quali, con diversi metodi e sensori geomatici, si sono rilevati spostamenti e deformazioni. Uno di questi è stato il sito di Madonna del Sasso su cui sono stati installate due stazioni con ricevitori GNSS mass market che inviano in tempo reale i propri dati a un server presso il Politecnico di Torino. Di questi cinque siti viene attualmente calcolata la posizione trasformando i dati in tempo reale in dati Rinex e gestendo il calcolo con cadenza giornaliera, usufruendo delle stazioni permanenti della rete interregionale SPIN. Di uno dei due siti impiantati a Madonna del Sasso avviene anche la memorizzazione e il calcolo delle baseline GNSS con cadenza oraria e, attualmente, tale calcolo riguarda un periodo di tempo di circa nove mesi. Per quanto i risultati ottenuti siano molto rumorosi, per via di diversi fattori tra cui l'utilizzo di una sola frequenza, la qualità del ricevitore (u-Blox EVK-8T) e dell'antenna, è stato comunque possibile eseguire una analisi della serie temporale volta ad estrarre un segnale da poter poi più facilmente interpretare. I dati, specie a causa di interruzioni di comunicazione, non sempre sono continui e, per motivi di manutenzione, le antenne sono state rimosse e riposizionate. È pertanto stato necessario comprendere se la rimozione ha anche di poco, ma significativamente, spostato l'antenna rispetto al riferimento iniziale e ricucire così la serie storica. Il segnale risultante, dopo la ricucitura e la rimozione del trend è stato infine analizzato in frequenza, utilizzando un metodo che tiene in conto della non uniformità dei dati a disposizione.

I risultati ottenuti non mostrano significativi segnali per le componenti planimetriche, ma un segnale molto netto in altimetria che ha una ampiezza di un paio di cm ed un massimo attorno alla fine di gennaio 2018. Si sottolinea che il risultato è frutto dell'elaborazione di singole baselines che usano come riferimento la stazione permanente di Gozzano, a circa 6 km dal sito di Madonna del Sasso. Per discernere da dove aveva origine lo spostamento, si sono utilizzati anche i dati giornalieri di questa stazione permanente per valutare eventuali movimenti a subsidenze. Ciò ha permesso, usando circa un anno di misure e le tecniche di posizionamento PPP di comprendere che il fenomeno è realmente di pertinenza della stazione monitorata.

I posizionamenti GNSS

Si è già parlato (Cina A. et al., 2018) del monitoraggio con strumentazione a basso costo di cinque siti in frana, alcuni dei quali con metodologie GNSS. In uno di questi, Madonna del Sasso, oltre al calcolo giornaliero eseguito con il software RTKPOST delle routines RTKLIB (Takasu, T, Yasuda A., 2009), si esegue anche il calcolo orario. Il posizionamento differenziale avviene ad ogni ora in modo automatico con l'uso dei dati della rete interregionale SPIN di Piemonte e Lombardia. In questo lavoro parleremo dei trattamenti orari dei dati GNSS acquisiti da ogni centralina, a circa 50 m di distanza, dal ricevitore u-Blox NEO M8T. In un server, presso il Politecnico di Torino vengono ricevuti in tempo reale i flussi RTCM di questi ricevitori. Alcune procedure automatiche schedulano la trasformazione del flusso in files orari in formato RINEX 3.1 che, ad ogni ora, sono trattati alle differenze doppie. Tenendo conto che la stazione permanente di Gozzano è sita a circa 9 km dal ricevitore rover, il fissaggio delle ambiguità di fase dei dati orari avviene facilmente in più del 95% dei casi. Si sono analizzati in seguito i risultati dei posizionamenti ad ambiguità fissata con *ratio* superiore a 4, usando i dati delle frequenze L1 ed E1 di GPS e Galileo

Su queste coordinate erano necessarie due tipologie di analisi, eseguite in "quasi tempo reale" e in post processing. Le prime, eseguite ogni ora, riguardano la ricerca di eventuali spostamenti e la ricerca di trend significativi. In post processing si sono eseguite operazioni di "ricucitura" di spostamenti dovuti a rimozioni temporanee dell'antenna e la ricerca e l'analisi di eventuali fenomeni periodici. Il principale risultato del trattamento alle differenze doppie di fase del software RTKPOST è stato inserito in un file di nome "SASAh.txt" in cui ogni ora vengono aggiunti i risultati delle coordinate di "Madonna Del Sasso Alta".

Per le analisi di queste serie storiche di coordinate è stato scritto un programma in linguaggio MATLAB® che viene eseguito ad ogni ora.

Per quanto riguarda la verifica di spostamenti improvvisi, la procedura prevede il calcolo, con metodi robusti, di una retta di tendenza, con l'uso di tutti i dati tranne quelli dell'ora corrente. Viene predetto il valore della posizione dell'ora corrente e i relativi scarti quadratici medi delle tre coordinate.

Viene costruito un vettore che definisce un indice di significatività degli spostamenti per le tre componenti (E, N ed h) riportato nel file "sunto.txt". Se lo spostamento corrente è all'interno dell'intervallo di due volte il valore dello scarto quadratico medio del valore previsto, non viene segnalata alcuna anomalia, il segnale in tal caso è "semaforo verde" che corrisponde nel file a un valore numerico pari a 1; in caso contrario, si fornisce all'interno del report un "semaforo giallo", che corrisponde al valore 2. Nel caso in cui questo l'indice semaforico giallo persista per almeno due epoche di misura, allora viene segnalato un "semaforo rosso" il cui codice numerico associato è il numero 3. Tale valore può essere presente solo se in precedenza era presente il valore 2. Per il secondo controllo, inerente la significatività della velocità, vengono utilizzati tutti i dati della serie con valore di *ratio* maggiore o uguale a una costante letta da un file. Dopo aver calcolato con metodo robusto i parametri della retta di tendenza viene verificata la significatività della velocità ad una probabilità prefissata e letta anch'essa da un file. Viene calcolato anche il valore assoluto di questa velocità che sarà espressa in millimetri di spostamento per cento giorni teorici di misura.

La non significatività della velocità o il non superamento di un valore minimo parametrico viene espressa con il numero zero nel file "sunto.txt". Un valore diverso da zero, indica la velocità in mm per 100 giorni su ogni componente.

La ricerca e rimozione di spostamenti dovuti a manutenzione

Nel giorno giuliano 346 del 2018, ARPA Piemonte ha rimosso le antenne GNSS per poi ricollocarle, con discreta precisione, dopo le misure topografiche.

Il riposizionamento tuttavia non è avvenuto con cura millimetrica e le coordinate ne hanno mostrato riscontro anche graficamente.

Per poter calcolare correttamente le deformazioni e la loro velocità era necessario calcolare il valore di queste discontinuità ed eseguire poi una ricucitura. Allo scopo sono state seguite due semplici metodologie di seguito spiegate nel dettaglio anche se, dopo l'analisi critica dei risultati, è stata adottata la seconda.

Conoscendo il giorno di misura, le coordinate ricavate sono state suddivise in due file differenti che nomineremo "prima" e "dopo" essendo prima e dopo il DOY 346. La prima strada procede dall'ipotesi che i dati prima e dopo il salto abbiano una discontinuità di ordine zero, ma non di ordine uno. L'ipotesi è cioè che la pendenza prima e dopo il salto sia la medesima. Per valutare il salto si è calcolata l'ordinata dell'intercetta della retta di regressione del primo insieme e l'ordinata dell'intercetta del secondo insieme, entrambe nel giorno 346 e per le tre coordinate.

E prima	valore	E dopo	valore
Giorno Giuliano(fine)=	345.6663	Giorno Giuliano(inizio)=	346.0065
Pendenza (b(2))=	-1.62	Pendenza (b(2))=	1.70
Intercetta (b(1))=	451384.1312	Intercetta (b(1))=	451384.1120
Estremo retta tendenza=	451384.1256	Estremo retta tendenza=	451384.1179
SALTO E= - 0.0076			

N prima	valore	N dopo	valore
Giorno Giuliano(fine)=	345.6663	Giorno Giuliano(inizio)=	346.0065
Pendenza (b(2))=	-1.35	Pendenza (b(2))=	2.38
Intercetta (b(1))=	5070731.9855	Intercetta (b(1))=	5070731.9681
Estremo retta tendenza=	5070731.9809	Estremo retta tendenza=	5070731.9763
SALTO N= - 0.0046			

H prima	valore	H dopo	valore
Giorno Giuliano(fine)=	345.6663	Giorno Giuliano(inizio)=	346.0065
Pendenza (b(2))=	45.81	Pendenza (b(2))=	-6.83
Intercetta (b(1))=	683.2171	Intercetta (b(1))=	683.3996
Estremo retta tendenza=	683.3755	Estremo retta tendenza=	683.3760
SALTO H= 0.0005			

Tabella 1: Calcolo del salto per le tre coordinate all'estremo della retta. Pendenze in mm/100gg, intercette e salti in m

Ciò che si è verificato tuttavia è che i due insiemi avevano pendenze (velocità) significativamente differenti, addirittura di segno opposto, principalmente a motivo della durata limitata delle due serie. Se ciò ha poi consigliato l'adozione di un secondo metodo di ricucitura, ha tuttavia consigliato di verificare anche l'ipotesi della presenza di un segnale ondulatorio di diversi giorni di periodo.

Nonostante ciò, è stato valutato il salto in corrispondenza del DOY 346. Dal primo metodo si è appurato che le pendenze del "prima" e del "dopo" sono diverse: il fenomeno quindi non è stazionario neppure sulle derivate. Per ricavare la dimensione del salto si è scelto allora un altro criterio: valutarlo in modo locale prima che epoche molto avanti nel tempo evidenzino qualche tendenza. Localmente dunque, sino a 24-48 ore, abbiamo assunto l'ipotesi di assenza di trend. Confrontando solo una coppia di coordinate prima e dopo il salto il calcolo della discontinuità risentirebbe però troppo dell'errore di misura e, in caso contrario, si correrebbe il rischio di mediare anche fenomeni ondulatori. La scelta è stata semplicemente quella di confrontare i valori medi di un ugual numero campionario di triplette di coordinate, aumentando l'insieme, aggiungendo via via un'ora dai risultati dei posizionamenti, sino a raggiungere il massimo di significatività del test sulla differenza delle due medie.

Il procedimento utilizzato consiste nel valutare la media e la deviazione standard di due insiemi con un numero di coordinate crescente: dall'epoca del salto in poi, nel file "dopo" e dall'epoca del salto a ritroso sul file "prima". A partire dai primi o dagli ultimi valori, aumentando in progressione la numerosità, si sono calcolate la media e deviazione standard ogni volta. La numerosità minima dei due insiemi presi in considerazione è tre, perché per un numero minore di dati il test: la t di Student, sarebbe privo di significato. Per la realizzazione di questi calcoli è stato utilizzato un foglio elettronico ma il procedimento può essere reso automatico con un software dedicato.

La media è sempre stata indicata con \bar{Y} in [1] e nelle tabelle 2, 3 e 4 con Y ; il test della differenza tra medie di due variabili aleatorie indipendenti eseguito è:

$$T = \frac{\bar{Y}_A - \bar{Y}_B}{\sqrt{\frac{s_A^2}{n} + \frac{s_B^2}{n}}} = \frac{(Y_A - Y_B)\sqrt{n}}{\sqrt{\frac{s_A^2}{n} + \frac{s_B^2}{n}}} \quad t_{(2n-2)} \quad [1]$$

Incrementando il numero di dati, i gradi di libertà "n" aumenteranno a loro volta. Alle varie numerosità si sono ricavate le probabilità corrispondenti.

Il calcolo si conclude quando la probabilità che i due insiemi siano distinti è molto vicina al valore unitario. Il valore del salto corrisponde alla differenza dei valori medi dei due insiemi evidenziati in giallo nelle Tabb. 2, 3, 4.

Nelle tabelle 2, 3 e 4, la prima colonna rappresenta le soluzioni orarie usate per il confronto in avanti ed indietro nel tempo.

I tre salti medi di E, N ed h sono: 8,0 mm, 4,2 mm e 3,5 mm. Come si nota, le coordinate planimetriche, meno rumorose, evidenziano una probabilità subito molto elevata: gli insiemi sono distinti già dopo poche epoche.

Si è scelto di usare come valore rappresentativo del salto nelle tre coordinate, la differenza dei valori medi dei due insiemi corrispondenti alla massima probabilità rilevata che testimonia la loro diversità. Questo avviene in epoche diverse per le tre coordinate.

n° di punti	PRIMA Est		DOPO Est		Y=Y _b -Y _a	T	v	Prob	Y _{media}
	Media(Y _a)	σ _a	Media(Y _b)	σ _b					
3	451384.127	0.002	451384.118	0.001	-0.009	-6.89	4	0.9988	-0.0091
4	451384.126	0.003	451384.118	0.001	-0.008	-4.96	6	0.9987	-0.0084
5	451384.126	0.003	451384.118	0.001	-0.008	-6.30	8	0.9999	-0.0083
6	451384.125	0.003	451384.118	0.001	-0.007	-5.83	10	0.9999	-0.0081
7	451384.125	0.003	451384.117	0.002	-0.008	-6.24	12	1	-0.0080

n° di punti	PRIMA Nord		DOPO Nord		Y=Y _b -Y _a	T	v	Prob	Y _{media}
	Media(Y _a)	σ _a	Media(Y _b)	σ _b					
3	5070731.979	0.004	5070731.976	0.004	-0.003	-0.90	4	0.7905	-0.0033
4	5070731.979	0.004	5070731.976	0.004	-0.003	-1.04	6	0.8308	-0.0031
5	5070731.980	0.004	5070731.976	0.004	-0.004	-1.74	8	0.94	-0.0035
6	5070731.980	0.004	5070731.977	0.004	-0.003	-1.20	10	0.8711	-0.0033
7	5070731.981	0.004	5070731.977	0.004	-0.004	-1.79	12	0.9507	-0.0034
8	5070731.981	0.004	5070731.977	0.004	-0.005	-2.40	14	0.9846	-0.0036
9	5070731.981	0.004	5070731.977	0.004	-0.004	-2.51	16	0.9884	-0.0037
10	5070731.981	0.004	5070731.976	0.004	-0.004	-2.80	18	0.9941	-0.0038
11	5070731.981	0.003	5070731.976	0.003	-0.004	-2.96	20	0.9961	-0.0039
12	5070731.981	0.003	5070731.976	0.003	-0.004	-3.18	22	0.9995	-0.0039
13	5070731.981	0.003	5070731.977	0.003	-0.004	-3.33	24	0.9986	-0.0039
14	5070731.981	0.003	5070731.977	0.003	-0.004	-3.46	26	0.9991	-0.0039
15	5070731.981	0.004	5070731.976	0.003	-0.005	-3.90	28	0.9997	-0.0040
16	5070731.981	0.004	5070731.976	0.003	-0.005	-4.19	30	0.9999	-0.0041
17	5070731.981	0.004	5070731.976	0.003	-0.005	-4.62	32	1	-0.0042

n° di punti	PRIMA altezza		DOPO altezza		Y=Y _b -Y _a	T	v	Prob	Y _{media}
	Media(Y _a)	σ _a	Media(Y _b)	σ _b					
3	683.383	0.012	683.377	0.005	-0.006	-0.79	4	0.7631	-0.0060
4	683.385	0.011	683.381	0.008	-0.005	-0.67	6	0.7361	-0.0052
5	683.384	0.010	683.379	0.008	-0.005	-0.86	8	0.7926	-0.0051
6	683.383	0.010	683.379	0.007	-0.003	-0.63	10	0.7286	-0.0046
7	683.380	0.010	683.379	0.006	-0.001	-0.25	12	0.5966	-0.0039
8	683.379	0.010	683.378	0.007	-0.001	-0.29	14	0.6120	-0.0035
9	683.379	0.010	683.377	0.007	-0.001	-0.33	16	0.6272	-0.0032
10	683.378	0.009	683.377	0.006	-0.001	-0.29	18	0.6124	-0.0029
11	683.379	0.009	683.377	0.006	-0.001	-0.33	20	0.6276	-0.0027
12	683.380	0.009	683.377	0.007	-0.003	-0.92	22	0.8162	-0.0027
13	683.380	0.009	683.376	0.007	-0.004	-1.27	24	0.8919	-0.0028
14	683.380	0.009	683.375	0.007	-0.004	-1.52	26	0.9297	-0.0030
15	683.380	0.008	683.375	0.007	-0.005	-1.87	28	0.9640	-0.0031
16	683.380	0.008	683.374	0.007	-0.006	-2.10	30	0.9779	-0.0033
17	683.380	0.008	683.374	0.007	-0.006	-2.32	32	0.9866	-0.0035

Tabelle 2, 3 e 4: calcolo della significatività delle differenze medie E, N, h

Calcolo dei fenomeni periodici

Dopo aver "ricucito" le discontinuità nelle serie storiche, occorre studiare eventuali fenomeni periodici nelle serie. Per fare ciò è necessario che i dati siano stazionari, almeno al primo ordine. Allo scopo, per le tre serie ricucite, è stata calcolata una retta di tendenza da rimuovere ai dati originari.

Per l'analisi in frequenza è stato utilizzato un programma scritto in linguaggio Matlab che implementa e stima un periodogramma con l'approccio di Lomb-scargle.

Tale approccio è particolarmente indicato su serie geodetiche e preferibile alla classica stima mediante Fast Fourier Transformation in quanto non è necessario che gli istanti di misura siano equispaziati. Sulla base di criteri statistici l'approccio di Lomb-Scargle restituisce per ogni frequenza indagata la probabilità in termini di potenza di presenza nella serie temporale. Individuate quindi le prima frequenze più potenti in termini statistici (per le serie geodetiche non son

quasi mai più di 5) ne viene valutata l'ampiezza e la fase mediante stima ai minimi quadrati.

Le ampiezze (A1, A2), la periodicità e le frequenze inerenti alle tre coordinate per la prima e la seconda frequenza di studio, sono riportate nella tabella seguente:

	nf	ampiezza (m)		frequenza	periodo (giorni)
		A1	A2		
Est	1°	0.00109	-0.00030	2.0040	0.4990
	2°	0.00020	0.00093	0.9988	1.0012
Nord	1°	-0.00048	-0.00117	8.6237	0.1160
	2°	-0.00080	0.00037	0.0062	160.8951
Altezza	1°	0.00857	-0.00255	0.0061	163.0735
	2°	0.00357	0.00140	0.0874	11.4364

Tabella 5: Calcolo delle ampiezze (A1, A2), della frequenza e del periodo in E, N e h per il 1° e 2° numero di frequenza fondamentale

Per quanto riguarda la coordinata Est, la frequenza più bassa cioè il periodo più alto risulta poco sopra l'unità (nel nostro caso corrisponde alla seconda frequenza fondamentale). Anche la significatività è bassa e le ampiezze sono poco significative.

Per tali ragioni, non possiamo parlare di periodicità fisicamente significativa, anche in quanto il segnale tende a ripetersi ogni giorno.

L'analisi delle coordinate Nord ha mostrato due frequenze fondamentali ma la seconda, di periodo di circa 161 giorni ha ampiezza inferiore al millimetro e la prima è ancora meno significativa.

Diverso risultato si ha invece sulla componente altimetrica in quanto la prima frequenza fondamentale, di circa 163 giorni di periodo, ha ampiezza di quasi 9 mm. La seconda di 11 giorni di periodo ha ampiezza di 3.6 mm.

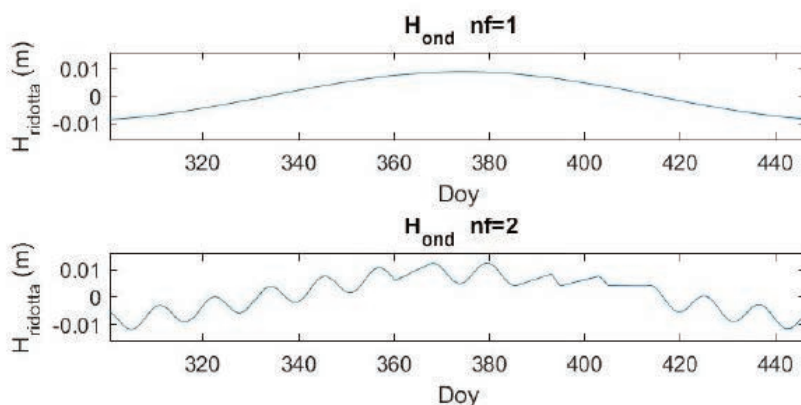


Figura 1: Analisi delle prime due frequenze fondamentali: $nf = 2$ per la coordinata altezza a Madonna del Sasso

Le serie temporali delle coordinate della stazione di Gozzano

Ricordiamo che le coordinate del sito del Madonna del Sasso, oggetto dei trattamenti descritti, derivano da un trattamento alle differenze doppie di fase, utilizzando come stazione di riferimento la stazione permanente di Gozzano. Per tale motivo sono a rigori delle differenze di coordinate.

Nel valutare le deformazioni non si conosce dunque a priori se una variazione nelle coordinate è dovuta principalmente a spostamenti del sito monitorato o a causa di movimenti della stazione di riferimento.

Per dirimere la scelta è stato necessario valutare, in un periodo di tempo analogo e corrispondente, l'andamento delle coordinate di Gozzano in un sistema di riferimento globale.

Allo scopo si è deciso di valutare in modalità PPP, cioè Precise Point Positioning un anno di dati della stazione permanente di Gozzano, con l'uso del software scientifico Gipsy-X.

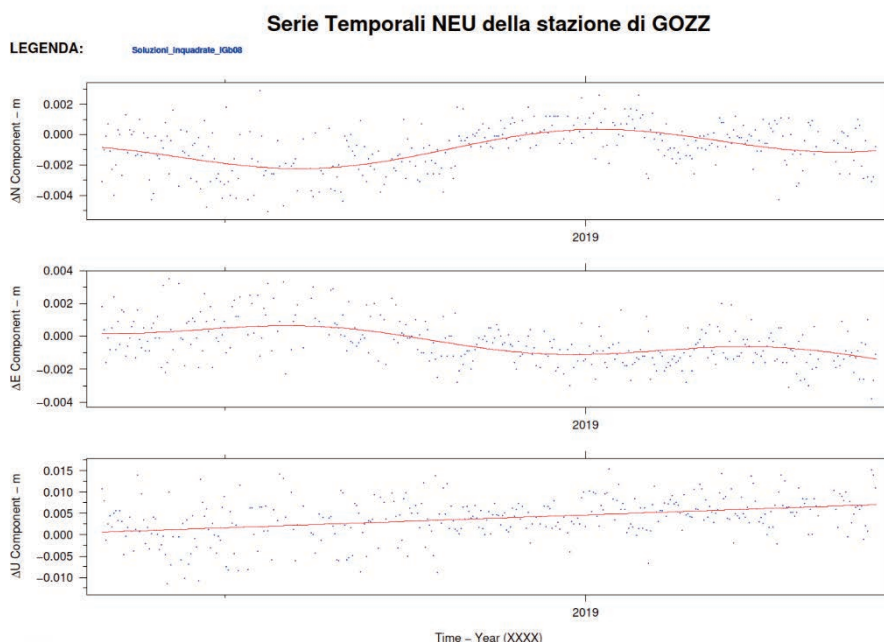


Figura 2 Analisi in frequenza della serie temporale della stazione di Gozzano

Le soluzioni di Gipsy sono state inquadrate inizialmente nel frame IGB08 utilizzando 14 stazioni presenti nel territorio italiano e in zone limitrofe e poi reinquadrate nel frame ETRF00 utilizzando i 14 parametri di Altamimi per eliminare il moto medio di placca europea.

Dopo ciò sulla soluzione giornaliera di 12 mesi di dati sono stati indagati eventuali fenomeni periodici.

Gli unici fenomeni periodici osservati sono in planimetria, hanno lunghezza d'onda semestrale, ma hanno ampiezze molto modeste, di circa 1,5 mm, più pronunciata per la componente Nord.

Per la componente altimetrica si osserva solo un trend lineare di circa 4 mm/anno ma nessuna periodicità.

Da tali risultati, si può affermare che i fenomeni periodici osservati in Madonna del Sasso sono realmente locali, cioè dovuti a spostamenti della stazione rover e non a quelli della stazione di riferimento di Gozzano.

Conclusioni

Il lavoro riporta i risultati del monitoraggio GNSS del sito di Madonna del Sasso con alcune peculiarità innovative:

- ∞ l'uso di ricevitori di basso costo e di procedure automatiche di calcolo;
- ∞ la ricerca delle modalità di ricucitura di serie temporali;
- ∞ la ricerca di fenomeni periodici nei dati non equispaziati.

Al termine di tale esperienza si può affermare che, anche con strumentazione di basso costo, con una serie numerosamente popolata di misure, si possono monitorare alcuni fenomeni franosi che attualmente sono monitorati con strumentazione geodetiche ben più costose ed a frequenze molto più basse.

Bibliografia

Cina A, Manzino A, Piras M. (2002). "Controllo delle deformazioni con GPS in tempo reale". In: Atti conferenza nazionale ASITA "Geomatica per l'ambiente, il territorio e il patrimonio culturale. vol. 1, p. 807-812.

Takasu T., Yasuda A., (2009), "Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB", International Symposium on GPS/GNSS, International Convention Center Jeju, Korea, November 4-6, 2009

Dabove P., Manzino A. M., De Agostino M., (2012) "Achievable positioning accuracies in a network of GNSS reference stations". INTECH Open Access Publisher.

Bellone T., Dabove P., Manzino A.M., Taglioretti C., (2014) "Real-time monitoring for fast deformations using GNSS low-cost receivers". Geomatics, Natural Hazards and Risk, 1-13. <http://dx.doi.org/10.1080/19475705.2014.966867>

Dabove, P., Manzino, A.M. (2014). "GPS & GLONASS Mass-Market Receivers: Positioning Performances and Peculiarities". Sensors 2014, 14, 22159-22179

Cina A., Piras M. (2015). "Performance of low-cost GNSS receiver for landslides monitoring: test and results". Geomatics, Natural Hazards and Risk Vol. 6, Iss. 5-7.

Gandolfi S., Tavasci L., Poluzzi L., (2017), "Study on GPS-PPP precision for short observation sessions GPS Solutions", Springer-Verlag pagg. 887-896

Gandolfi S., Tavasci L., Poluzzi L., (2016), Improved PPP performance in regional network, GPS Solut 20: 485. doi:10.1007/s10291-015-0459-z

Cina A., Manzino A. M., Battino A., Bendea I. H, Maschio P., Mollo P., Borri R., Scarafia S., Ferrero C., Boeris Frusca M., Maglioli M., Pipino M., Vallero V., De Agostino M. (2018) "Il monitoraggio dei movimenti e delle deformazioni con tecniche geomatiche di basso costo". Atti ASITA pagg. 355-364.