

Monitoraggio della diga “Castello” di Bivona (AG) con tecniche GNSS

G. Dardanelli (*), V. Franco (*), N. Perfetti (**), L. Puccio (*)

(*) DICAM, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali, Università di Palermo

Viale delle Scienze, 90118 Palermo, Tel. 09123896228, Fax 091588853,
e-mail: gino.dardanelli@unipa.it, vincenzo.franco@unipa.it; luigi_puccio@libero.it

(**) GEOTOP S.r.l., Via Breccie Bianche 152, 60131 Ancona
Tel. 071213251, Fax 07121325282, e-mail: nicolaperfetti@geotop.it

Riassunto

Le dighe di grandi dimensioni, di terra o di cemento, sono infrastrutture che rivestono un ruolo critico nella fornitura idrica e nella produzione energetica. Come è noto in letteratura, il carico e lo scarico delle forze sottopone la diga a elevate sollecitazioni strutturali che devono essere monitorate. Queste possono essere dovute alle fluttuazioni del livello dell'acqua, all'assestamento della struttura, all'attività di frane situate nelle vicinanze o all'attività sismica. Rilevare preventivamente i potenziali problemi consente di adottare le misure necessarie per evitare che si verifichi una catastrofe, o mitigarne gli effetti. Il lavoro proposto è in corso di svolgimento presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale Aerospaziale, dei Materiali (DICAM) dell'Università degli Studi di Palermo e ha come scopo il monitoraggio della Diga “Castello”, sbarramento di materiali sciolti situato tra i comuni di Bivona e Alessandria della Rocca in provincia di Agrigento, mediante il posizionamento sul coronamento di tre ricevitori GNSS. Le antenne sono state monumentate su appositi pilastri in acciaio fissati al suolo mediante piccola fondazione in cls; il *rate* impostato ai ricevitori è stato di 30 sec., l'angolo di *cut-off* di 10°. La campagna di rilevamento è in corso e ad oggi sono stati archiviati 12 mesi di dati con cadenza settimanale. Verificata la buona qualità dei dati a disposizione si è proceduto con l'elaborazione degli stessi mediante i software *NDA Professional* e *Bernese GPS 5.0*.

Abstract

The big earth dams or concrete, are facilities that play a critical role in water supply and energy production. As is known in the literature, the loading and discharge of the dam forces submit high structural stresses that must be monitored. These may be due to fluctuations in water level, settling of the structure, activity in the vicinity of landslides or seismic activity. Proactively detect potential problems can take the necessary measures to prevent a catastrophe from occurring or mitigate its effects. The proposed work is underway at the Department of Civil Engineering, Environmental, Aerospace, Materials (DICAM), University of Palermo and has as its purpose the monitoring of the dam “Castello”, rockfill dam located between the towns Bivona and Alessandria della Rocca in the province of Agrigento (Italy), by positioning in the culmination of three GNSS receivers. The antennas have been placed on special steel pillars fixed to the ground by means of small foundation concrete; the rate set to the receivers was 30 sec., the angle of cut-off of 10 °. The measurement campaign is underway and to date have been stored 12 months of data on a weekly basis. After verifying the quality of the available data we have proceeded with the development of such software by *NDA Professional* and *Bernese GPS Software*, referring to the permanent stations at an early stage of Palermo, Trapani and Agrigento, then we opted for the stations of Prizzi and Agrigento, all managed by DICAM.

Introduzione

Gli avvenimenti che caratterizzano in diverso modo le funzionalità delle strutture consentono di rendere più diffusa la cultura del controllo: alla base di questa non può che esserci una delle fondamentali operazioni topografiche, il monitoraggio, che si sta affermando come uno degli strumenti gestionali più efficaci per garantire la sicurezza in servizio dell'opera. Il monitoraggio delle strutture, o in generale il monitoraggio ambientale, riveste un ruolo fondamentale nell'ambito della sicurezza, perché consente di valutare nel tempo le modificazioni del fenomeno in esame, con l'obiettivo ultimo di riconoscere l'insorgere di situazioni di pericolo per cose o persone e quindi consentire un'efficace allarmistica. Il monitoraggio strutturale non è, di per sé, un argomento di studio recente; al contrario ha una lunga tradizione in diverse discipline. Per quanto riguarda le tecniche di monitoraggio geodetico, i metodi tradizionalmente utilizzati per il controllo delle strutture possono essere suddivisi, come è ben noto, in due categorie: quelli che permettono di determinare spostamenti verticali (livellazione geometrica o trigonometrica, livellazione idrostatica), e quelli che permettono di determinare spostamenti orizzontali (triangolazione, collimatore, pendoli dritti e rovesci). Tali metodi, che consentono di raggiungere elevate precisioni, sono ormai ben consolidati e largamente utilizzati, ma hanno il limite di non fornire una descrizione continua del fenomeno, nel senso che si eseguono campagne periodiche di misura con la presenza di personale tecnico; inoltre le tecniche citate difficilmente si prestano all'automatizzazione delle procedure di acquisizione o di un sistema di allarme. Per questi motivi, tra le nuove metodologie sviluppate nel tempo, da affiancare ai metodi tradizionali di monitoraggio, un ruolo importante è ricoperto dal posizionamento satellitare GPS di precisione, che permette di avere una maggior risoluzione temporale e una strumentazione che ben si presta all'automatizzazione delle misure e alla realizzazione di un sistema di allarme semi-automatico. Altro vantaggio del metodo risiede nel fatto che il sistema GPS fornisce contemporaneamente le deformazioni nelle tre dimensioni.

La diga di terra oggetto del nostro studio è costruita in materiali sciolti con manto di tenuta in conglomerato bituminoso ubicato presso Bivona, in provincia di Agrigento, con andamento planimetrico costituito da due tratti rettilinei laterali, di 165,00 m. quello in destra e di 317,00 m. quello in sinistra, raccordati da un arco di cerchio dello sviluppo di 309,80 m., con raggio di 268,08 m. e concavità rivolta verso valle.

La sezione trasversale di massima altezza ha forma trapezoidale, con larghezza in testa di 9,00 m. e larghezza alla base di 214,00 m. circa; il paramento di valle, rivestito con manto erboso su terreno vegetale, è costituito da una linea spezzata, interrotta da due banchine di larghezza 2,50 m. alle quote di 284,00 m.s.m. e 272,00 m.s.m.

La diga è costituita da materiale omogeneo a grana grossa (alluvioni di fondo valle e formazioni calcaree), con uno strato di sottofondo del manto bituminoso di monte, dello spessore di 2,00 m. costituito da pietrame selezionato, regolarizzato con uno strato di 15 cm. di pietrisco, sul quale poggia il manto di tenuta formato da un pacchetto costituito, dall'interno verso l'esterno: da uno strato di conglomerato bituminoso semiaperto tipo binder) dello spessore di 10 cm., da un sovrastante strato di conglomerato bituminoso chiuso, impermeabile, di 5 cm., da un successivo strato di conglomerato bituminoso drenante dello spessore di 8 cm., seguito da un altro strato di conglomerato impermeabile di 8 cm., su cui è realizzato un sigillo in mastice dello spessore di 1,5-2 mm. Il manto di tenuta si attesta su una struttura di c.a. munita di sottostante paratia in c.a., dello spessore di 80 cm., che si immerge nella formazione argillosa di base; tale struttura è percorsa da un cunicolo ispezionabile lungo tutto il suo sviluppo, ove recapita il sistema di raccolta dei drenaggi, costituito da tubi di raccolta degli stessi dal manto di tenuta, che confluiscono nella parte alta del cunicolo, lato valle, e da tubi di raccolta dei drenaggi del sottofondo del manto, che confluiscono nella parte bassa del cunicolo. Al cunicolo longitudinale si accede tramite due torrette di estremità e tramite un cunicolo trasversale che fa capo, a valle, a un pozzo verticale. I terreni di fondazione sono costituiti da materiali alluvionali di spessore variabile, poggianti sulla formazione di argille marnose, risalente al Miocene. Sulle sponde la coltre dei terreni di ricoprimento della formazione è costituita da argille rimaneggiate con frequenti inclusioni di gesso e di calcare, di spessore variabile da 5,00 a 10,00 m. ed anche più in sponda sinistra, dove l'instabilità superficiale riscontrata ha reso necessario un intervento di placcaggio.

Background

Negli ultimi venti anni molti studi scientifici sono stati prodotti con le finalità di monitoraggio di dighe di terra con metodi GPS, come quelli legati alle applicazioni di reti di stazioni permanenti. L'analisi seguente riporta i principali casi studio e non ha la pretesa di essere esaustiva.

Il più importante esempio di monitoraggio di dighe in terra è lo studio effettuato dal “*Metropolitan Water District of Southern California – USA*” in collaborazione con il “*Department of Geodesy and Geomatics Engineering*”, Università di New Brunswick in Canada. Il sistema di monitoraggio automatico è stato pienamente operativo dal 2000 e oggetto di tali studi è stato il “*Diamond Valley Lake*”, che comprende tre grandi dighe di terra. Dato che il lago si trova in una zona sismicamente attiva, il progetto è stato implementato da una rete di monitoraggio GPS in continuo collegata alle stazioni di riferimento (CORS) della California (Duffy et al., 2001). Lo studio è stato inoltre sviluppato in un secondo momento dal *Canadian Centre for Geodetic Engineering* (Chrzanowski et al., 2003, 2008).

In Cina ci sono circa 22.000 dighe e un sistema di monitoraggio continuo è stato realizzato dall’*Università di Hohai* a Nanjing e dal *Politecnico di Hong Kong* (He et al., 2004). Dagli autori di tale studio è stato sviluppato un sistema multi-antenna GPS che è stato posizionato su ogni punto da monitorare, con l’ausilio di un unico ricevitore (GMAS), abbattendo notevolmente i costi di realizzazione e gestione.

In Europa, dal 2006, molte ricerche sono state indirizzate al fine di monitorare dighe di terra: un esempio è lo studio effettuato dall’*Istanbul Technical University Department of Geomatics* sulla diga di Atatürk, in Turchia (Kalkan et al., 2010), con la cooperazione del prestigioso *Turkish General Directorate of State Hydraulic Works*, attraverso l’impiego di metodi geodetici avanzati come quelli GNSS.

Inoltre, negli ultimi anni le applicazioni GNSS al monitoraggio strutturale come quello delle dighe hanno aperto nuovi mercati nel mondo e in questo lavoro è significativo riportare le nuove esperienze commerciali di alcune ditte leader (Drummond, 2010, Van Cranenbroeck, 2011).

In Italia, invece, non sono state riscontrate in letteratura metodi GNSS per il monitoraggio di dighe in terra, dato che generalmente vengono adottate le tecniche tradizionali. Uno studio significativo è stato svolto sulla diga di Cixerri in Sardegna dal *Politecnico di Milano* (Barzaghi et al., 2009).

La sperimentazione

Il sito scelto è rappresentato dalla Diga “*Castello*”, sbarramento di materiali sciolti situato tra i comuni di Bivona e Alessandria della Rocca, in provincia di Agrigento, in collaborazione con l’Assessorato Regionale dell’Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità – Dipartimento Regionale dell’Acqua e dei Rifiuti - Servizio 3 – Gestione Infrastrutture per le Acque. Sono state utilizzate attrezzature hardware *Topcon*, ed in particolare due antenne PG-A1 con ground plate e una G3-A1, ubicate sul coronamento dello sbarramento in appositi pilastri in acciaio inox prodotti dalla “*Geotop S.r.l.*”, fissati al suolo mediante piastre in acciaio e successivo getto di calcestruzzo; alle antenne sono stati accoppiati due ricevitori GB-500 e uno NET-G3A.

Prima di iniziare la registrazione dei dati, i ricevitori sono stati impostati in Laboratorio con un intervallo di campionamento di 30 sec. Le sessioni di registrazione sono iniziate il giorno 8 Aprile 2011 (EPOCH_MJD: 55659) e sono attualmente in corso; per questo lavoro si è scelto di elaborare un arco temporale di 6 mesi di dati (8/4/2011 – 8/10/2011). Fase preliminare all’elaborazione è stata il pretrattamento dei dati mediante l’utilizzo di due software utilizzati in ambito internazionale: *TECQ* e *QC2SKY* (Estey, 1999). È stata utilizzata anche un’altra tipologia di analisi per la verifica della qualità iniziale dei dati, utilizzando un software sviluppato dalla “*Galileian Plus s.r.l.*” denominato *Network Deformation Analysis* (NDA), nella versione *Lite*.

A tale pacchetto, che presenta avanzati livelli di automazione, è stato aggiunto un modulo *Data Quality Evaluation* (DQE), per il controllo di qualità dei dati GPS che rappresenta un potente strumento di diagnosi per valutare l’attendibilità delle soluzioni ottenute (Briano e Chersich, 2003).

Il processamento dei dati è stato impostato con soluzione su singola linea di base che con soluzione di rete, correzione della posizione del centro di fase dell'antenna, effemeridi precise dei satelliti GPS, oltre alle effemeridi relative al Sole e alla Luna ottenute dal *Jet Propulsion Laboratory* (JPLEPH). Con lo scopo di garantire maggiore precisione nella stima delle coordinate, sono stati caricati all'interno del programma i parametri relativi alle maree oceaniche. Successivamente si è scelto quale modellazione utilizzare per il calcolo e la correzione dell'errore ionosferico e dell'errore troposferico.

Per modellare l'errore ionosferico è stato scelto il modello di *Klobuchar* (1996), utilizzando i parametri giornalieri forniti dal CODE dell'Osservatorio Astronomico dell'Università di Berna, mentre per ciò che riguarda la modellazione della troposfera sono stati utilizzati sia il modello di *Saastamoinen* sia quello di *Hopfield*, entrambi modificati con la mapping function di *Niell* (1996). Infine, per ciò che riguarda il fissaggio delle ambiguità si è scelto di utilizzare il metodo LAMBDA associato ad un test secondario sul ratio, che ad oggi risulta una delle metodologie maggiormente utilizzate in letteratura.

La prima fase di impostazione del software ha riguardato la creazione della rete ed il suo setting. Innanzitutto è stato fissato come sistema di riferimento terrestre rispetto al quale il programma avrebbe successivamente calcolato le stime delle coordinate l'IGS08, che rappresenta l'ultima realizzazione del sistema ITRF2008; il processamento dei dati è stato impostato con soluzione su singola linea di base sulle SP della Rete UNIPA.

La seconda fase di impostazione del software è stata quella di settare le stazioni della rete: si è convenuto di utilizzare 4 stazioni permanenti della rete GNSS dell'Università di Palermo e precisamente Agrigento (AGRI), Palermo (PALE), Prizzi (PRIZ) e Trapani (TRAP) per il pre-inquadramento; poi per monitorare i punti di controllo monumentati sul coronamento della Diga (BIV1, BIV 2, BIV 3) si sono utilizzate sia le stazioni più prossime di PRIZ e AGRI, che quelle più lontane di PALE e TRAP.

Analisi dei risultati

Di seguito vengono riportati in figura 1 i diagrammi delle stime delle coordinate calcolate con NDA Professional delle tre stazioni in diga BIV1, BIV2 e BIV3, processate dalle stazioni permanenti della rete UNIPA di Palermo, Agrigento, Trapani e Prizzi; i ricercatori del DICAM utilizzano questo software per determinare le coordinate delle stazioni permanenti già da alcuni anni (Dardanelli e Sciortino, 2010).

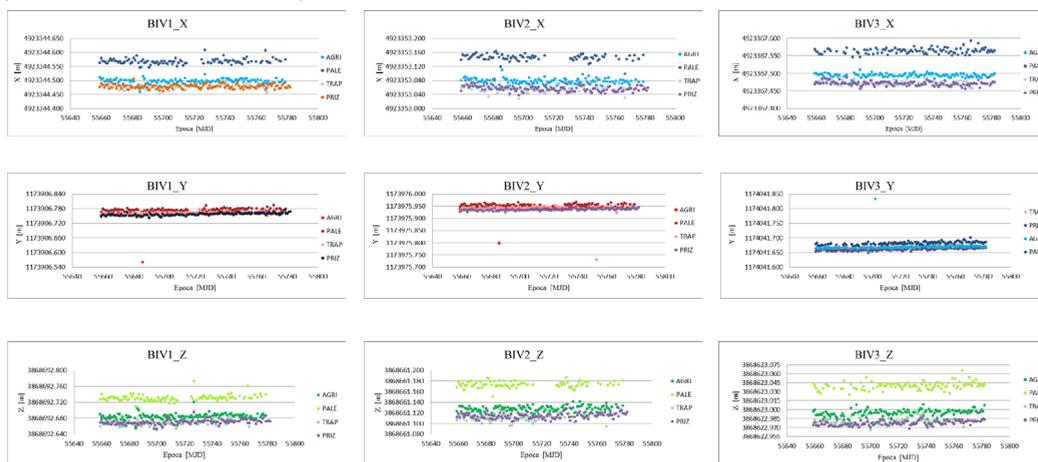


Figura 1. Valori delle stime delle coordinate X, Y e Z delle stazioni BIV1, BIV2 e BIV3.

In generale, le stime delle coordinate dalle tre stazioni permanenti di Agrigento (AGRI), Prizzi (PRIZ) e Trapani (TRAP) si sono presentate dello stesso ordine di grandezza e con andamento temporale pressoché sovrapponibile in tutte e tre le direzioni del sistema di riferimento (IGS05) X, Y e Z. Per quel che riguarda la stima delle coordinate dalla Stazione di Palermo (PALE) nelle due direzioni X e Z, l'andamento si è presentato simile a quello delle altre tre Stazioni con una differenza costante di circa 60 mm. Tale margine è da attribuire alle deformazioni annue del sistema ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) di circa 100 mm. rispetto al sistema dinamico ITRS (*International Terrestrial Reference System*).

Per ciò che riguarda invece l'andamento temporale degli SQM (Scarti Quadratici Medi) si ottengono risultati dello stesso ordine di grandezza per tutte e stazioni monitorate, submillimetrico; in particolare dalla stazione AGRI l'andamento è pressoché rettilineo e si mantiene, salvo qualche outlier (in corrispondenza del MJD 55731), al di sotto di 1.00 mm.; dalle stazioni di PALE e di TRAP l'andamento è sempre rettilineo e, nelle direzioni X e Z assume valori compresi nell'intervallo 0,7÷0,9 mm., mentre nella direzione Y valori compresi tra 0,3÷0,5; dalla stazione di PRIZ, in tutte le direzioni, l'andamento è rettilineo e il valore di SQM è compreso sempre nell'intervallo 0,3÷0,9 mm (Tabella 1).

	BIV 1			BIV 2			BIV 3		
SP	X (mm)	Y(mm)	Z(mm)	X (mm)	Y(mm)	Z(mm)	X (mm)	Y(mm)	Z(mm)
AGRI	1.00	0.40	0.80	0.90	0.40	0.60	0.80	0.30	0.60
PALE	0.90	0.30	0.70	0.80	0.30	0.60	0.70	0.30	0.60
PRIZ	1.00	0.30	0.80	0.90	0.30	0.70	0.70	0.30	0.60
TRAP	1.00	0.50	0.80	1.00	0.50	0.80	0.80	0.30	0.50

Tabella 1. Valori dello SQM delle tre stazioni sulla diga.

Si è valutato pertanto, considerate le notevoli lunghezze delle baselines e le modalità previste in letteratura, di scartare i risultati provenienti dalle stazioni permanenti di Palermo (PALE) e di Trapani (TRAP), valutando le coordinate dalle sole stazioni più prossime dalla diga e quindi da AGRI e PRIZ, attraverso una trasformazione di sistemi di riferimento.

Trasformazione dal Sistema Globale al Sistema Locale e considerazioni sui risultati

Al fine di valutare meglio il comportamento delle tre stazioni in diga è stato opportuno effettuare una trasformazione di sistemi di riferimento. Dato un sistema di riferimento e l'eventuale ellissoide associato, per descrivere la posizione di un punto sono possibili diversi metodi di rappresentazione. Per problemi di controllo locale, quali ad esempio l'analisi metrica di deformazioni e quindi il monitoraggio di fenomeni locali, le coordinate locali costituiscono un sistema di coordinate ortogonali: definito un punto origine per un'area di interesse, le coordinate degli altri punti sono date come Nord, Est e Up rispetto all'origine. Si consideri un punto P_0 di coordinate:

$$[\varphi_0 \ \lambda_0 \ h_0]^T \Leftrightarrow [X_0 \ Y_0 \ Z_0]^T \quad [1]$$

In un sistema di coordinate locali avente come origine P_0 , le coordinate degli altri punti sono date dalla:

$$\begin{bmatrix} E \\ N \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \lambda_0 & \cos \lambda_0 & 0 \\ -\sin \varphi_0 \cos \lambda_0 & -\sin \varphi_0 \sin \lambda_0 & \cos \varphi_0 \\ \cos \varphi_0 \cos \lambda_0 & \cos \varphi_0 \sin \lambda_0 & \sin \varphi_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_P - X_0 \\ Y_P - Y_0 \\ Z_P - Z_0 \end{bmatrix} = E_{P_0} \Delta x_{P_0,P} \quad [2]$$

È stata assunta come campagna “zero” la prima registrazione dei dati, quindi quella effettuata in data 08 Aprile 2011. Stimate le coordinate X, Y, e Z delle tre stazioni in diga BIV1, BIV2 e BIV3

dalle due stazioni permanenti di Agrigento (AGRI) e Prizzi (PRIZ), per ottenere delle coordinate su cui poi effettuare il cambio di sistema di riferimento si è effettuata la media aritmetica.

Quindi sono state calcolate le differenze fra le coordinate stimate nei successivi giorni e quelle del primo giorno di registrazione, calcolando in questo modo le delta X, delta Y e delta Z.

Dopo tale calcolo si è effettuato il cambio di sistema di riferimento, da quello globale (X,Y,Z) a quello locale (Est, Nord, Up), utilizzando la matrice (eq. 2) di trasformazione (Biagi et. al., 2009).

Di seguito si riportano le serie temporali delle delta Est, delta Nord e delta Up per ogni stazione in diga.

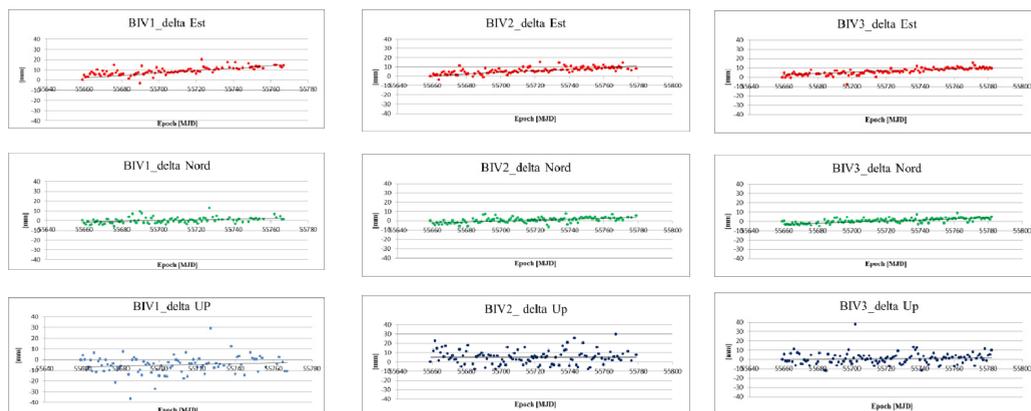


Figura 2. Serie temporali delta Est, delta Nord, delta Up di BIV1, BIV2 e BIV3.

Le serie temporali delle tre stazioni in direzione Est e in direzione Nord, nonostante un trend limitato, evidenziano variazioni di coordinate di circa 5 mm., ordine di grandezza conforme ai movimenti e alle velocità annuali della placca euro-asiatica. Per quel che riguarda la serie temporale in direzione Up, per le stazioni BIV1 e BIV3, che sono quelle monumentale in destra e in sinistra idraulica, presentano variazioni di coordinata dell'ordine di 2÷3 mm., risultato sovrapponibile alle campagne di rilievo effettuate mediante livellazione dall'Ente Gestore della diga. La stazione BIV2, quella monumentata al centro del coronamento, soggetta al maggiore carico idrodinamico, non presenta quasi nessuna variazione di coordinata: è lecito correlare tale risultato, così come gli altri, alle variazioni di quota dell'invaso.

Il trattamento dei dati con Bernese 5.0

Al fine di comparare e validare il processamento dei dati effettuati con la versione Professional di NDA, è stato utilizzato il Bernese GPS Software Version 5.0, sviluppato dall'Università di Berna, un pacchetto software completo per l'analisi di dati provenienti dalla rete GPS e da altre reti GNSS. Il software permette la localizzazione precisa delle stazioni satellitari riceventi e di dati utili nella costruzione di modelli dell'atmosfera terrestre, della rotazione terrestre e di altri parametri. Per l'approfondimento di tale software si rimanda a testi specifici messi a disposizione e facilmente consultabili sul web al sito: <http://www.bernese.unibe.ch/>.

Bernese 5.0, a differenza di NDA Professional, processa le baselines strutturandole ad "albero", elaborando quelle che, nell'arco delle 12 ore, hanno avuto il maggior numero di ambiguità.

Le stazioni utilizzate per le elaborazioni sono le tre stazioni in diga BIV1, BIV2 e BIV3 e le due SP della rete UNIPA, Agrigento (AGRI) e Prizzi (PRIZ). È stato valutato, in sede di progettazione, di vincolare nelle elaborazioni la stazione di Agrigento (AGRI).

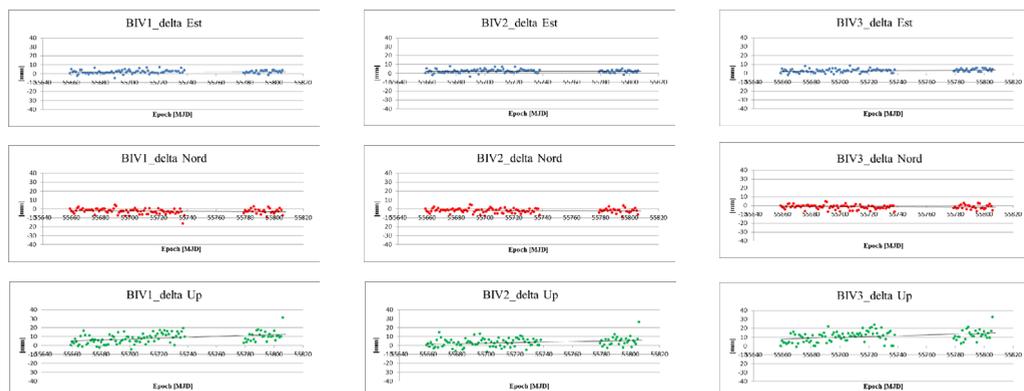


Figura 3. Serie temporali di BIV1, BIV2 e BIV3 calcolate con Bernese 5.0.

Bernese 5.0 ha confermato che le stime delle coordinate e le loro evoluzioni temporali delle tre stazioni in diga BIV1, BIV2 e BIV3 presentano sia nel sistema di riferimento globale che in quello locale un andamento conforme ai movimenti della placca euro-asiatica, alle caratteristiche costruttive della diga e alle variazioni di quota di invaso. Per ciò che riguarda l'andamento della serie temporale relativa alla stazione BIV1, così come nelle altre due stazioni, il software non ha computato e stimato, dato il numero eccessivo di ambiguità da fissare, le coordinate nei giorni MJD compresi nell'intervallo 55740-55776.

Nelle direzioni Y e Z si registra una variazione positiva di coordinata dell'ordine di 2 mm.; in direzione X una variazione di 5 mm.

Conclusioni

Le stime delle coordinate e le loro evoluzioni temporali delle tre stazioni in diga dalle tre Stazioni Permanenti di Agrigento (AGRI), Prizzi (PRIZ) e Trapani (TRAP) si sono presentate dello stesso ordine di grandezza e con andamento temporale pressoché sovrapponibile in tutte e tre le direzioni del sistema di riferimento (IGS05) X, Y e Z. Per quel che riguarda la stima delle coordinate dalla Stazione di Palermo (PALE) nelle due direzioni X e Z, l'andamento si è presentato simile a quello delle altre tre Stazioni con una differenza costante di circa 60 mm.

Tale margine è da attribuire alle deformazioni annue del sistema ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) di circa 100 mm. rispetto al sistema dinamico ITRS (*International Terrestrial Reference System*). Si è valutato di “scartare” le due stazioni più lontane dal corpo diga, quelle di Palermo (PALE) e Trapani (TRAP). È stato opportuno passare dal sistema di riferimento globale (X,Y,Z) al sistema di riferimento locale (Est, Nord, Up), per avere una piena visione del fenomeno.

I risultati di tale elaborazione sono sovrapponibili a quelli della livellazione che ogni due mesi viene effettuata in diga: gli spostamenti registrati in direzione Est e Nord sono conformi ai movimenti della placca euro-asiatica; quelli in direzioni Up sono compatibili con i risultati della livellazione.

Si è evidenziato inoltre che i risultati ottenuti con NDA Professional sono, nelle tre direzioni (Est, Nord, Up), compatibili con quelli ottenuti con Bernese GPS Software.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare l'Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità, Dipartimento dell'Acqua e dei Rifiuti, Gestione delle infrastrutture per le acque della Regione Sicilia, ed in particolare il Dirigente Ing. Francesco Greco, il responsabile della Diga “Castello” Ing. Mario Alfonso e del Geom. Gaglio per la documentazione fornita.

Un ringraziamento speciale all'Ing. Fabrizio Cairone, tecnico responsabile della Diga, per la disponibilità incondizionata e l'entusiasmo al lavoro di sperimentazione.

Bibliografia

- Van Cranenbroeck, J., 2011. State of the Art in Structural Geodetic Monitoring Solutions for Hydro Power Dams. In: *Proceedings of FIG Working Week 2011 Bridging the Gap between Cultures*, Marrakech, Marocco, 18-22 May
- Drummond, P., 2010. Combining Cors Networks, Automated Observations and Processing, for Network Rtk Integrity Analysis and Deformation Monitoring. In: *Proceedings, 15th FIG Congress 2010, Facing the Challenges – Building the Capacity*, Sydney, Australia, 11-16 April
- Dardanelli, G., Sciortino, M., (2010). Time series analysis in the UNIPA NRTK GNSS network. In: *Proceedings, 5° International Conference And Exhibition Melaha 2010, Location Technologies and Solutions: The Next Frontier*, Cairo, Egypt
- Kalkan Y., Alkan, R.M., Bilgi, S., 2010. Deformation Monitoring Studies at Atatürk Dam. In: *Proceedings, 15th FIG Congress 2010, Facing the Challenges – Building the Capacity*, Sydney, Australia, 11-16 April
- Barzaghi, R., Cannizzaro, L., Gaetani, M.E., Pinto, L. 2009. Il monitoraggio di una diga a gravità mediante GPS. In: *Atti della 13ª Conferenza Nazionale ASITA*, Bari, Italy.
- Biagi, L. 2009. *I fondamentali del GPS*. Geomatic Workbooks, Vol. 8.
- Chrzanowski, A. S., Chrzanowski, A., Massiera, M., Bazanowski, M., Whitaker, C., 2008. Study of a long-term behavior of large earth dam combining monitoring and finite element analysis results. In: *13th FIG International Symposium on Deformation Measurements and Analysis*, Lisbon, Portugal, May 12-15 2008
- He, X., Yang, G., Ding, X., Chen, Y., 2004. Application and evaluation of a GPS multi-antenna system for dam deformation monitoring, *Earth Planets Space*, n. 56, pp. 1035–1039.
- Briano, P., Chersich, M. 2003. NDA-DQE: un software italiano per l'Analisi in Automatico del Dato GPS. In: *Atti della 7ª Conferenza Nazionale ASITA*, Verona, Italy.
- Chrzanowski, A. S., Chrzanowski, A., Massiera, M., 2003. Use of geodetic monitoring measurements in solving geomechanical problems in structural and mining engineering. In: *Proceedings, 11th FIG Symposium on Deformation Measurements*, Santorini, Greece, 2003
- Duffy, M., Hill, C., Whitaker, C., Chrzanowski, A., Lutes, J., Bastin, G., 2001. An automated and integrated monitoring program for Diamond Valley Lake in California. In: *Proceedings of the 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements*, Orange, USA, pp. K-1 to K-23.
- Estey, L. H., Meertens, C. M., 1999. TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS data. *GPS Solutions*, vol. 3, n. 1, pp. 42-49.
- Klobuchar, J. A., 1996. *Global Positioning System: Theory and Applications*". Volume I, Cap. XII: Ionospheric effects on GPS, pp. 485-515, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc.
- Niell, A. E., 1996. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *Journal of Geophysical Research*, vol. 101, n. B2, pp. 3227-3246.