

Monitoraggio remoto delle deformazioni nell'isola di Santorini: una procedura integrata di analisi dati GPS presso la Sezione INGV di Bologna

di Arianna Pesci, Giordano Teza, Giuseppe Casula, Enzo Boschi

Il GPS (Global Positioning System) è un noto sistema di posizionamento globale in grado di fornire le coordinate spaziali di un operatore, se munito di antenna e ricevitore satellitari, in qualunque punto della terra esso si trovi, in qualunque condizione meteo ed in qualsiasi ora del giorno. Oggi al GPS, che è di proprietà del Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti d'America (US DoD), si affiancano il GLONASS (sistema analogo russo) e altri sistemi di posizionamento globale basati su tecniche interferometriche spaziali a partire da segnali a microonde, ad esempio i nascenti Galileo (europeo) e BeiDou (cinese). Per questo motivo si parla diffusamente di sistemi GNSS cioè Global Navigation Satellite System.

Su scala globale le reti di monitoraggio annoverano diverse centinaia di stazioni GNSS che operano in regime di registrazione continua e forniscono all'utenza interessata svariate possibilità come la navigazione con ricevitori portatili, la sincronizzazione dei dispositivi elettronici, servizi di monitoraggio del territorio, applicazioni topografiche e catastali, supporto per operazioni di soccorso. Negli ambiti della ricerca, inoltre, sono molti gli enti preposti alla diffusione dei dati non solo nel formato grezzo (RAW) ma anche e soprattutto nel formato di interscambio indipendente dal ricevitore (RINEX); questo oggi costituisce in Italia un task che accomuna numerose istituzioni (comuni, regioni, università, enti regionali) nonché aziende private. Inoltre, un punto importante in termini di divulgazione delle informazioni e flessibilità, è la diffusione delle soluzioni indipendenti in formato di interscambio (SINEX) ottenute dalle analisi delle reti che permettono ottenere le coordinate e velocità dei siti di interesse in diversi sistemi di riferimento, definire i parametri orbitali, i modelli troposferici e ionosferici, i parametri di orientazione terrestre (EOP), gli effetti mareali, gli effetti di sito, ecc. I centri di analisi che mettono a disposizione le soluzioni SINEX delle reti (tra i maggiori si ricordano SOPAC, MIT, JPL, EUREF, INGV e ASI) aprono agli utenti una vasta gamma di possibilità per integrare le analisi di reti locali (e non) di particolare interesse geofisico nelle soluzioni globali a basso costo e mediante operazioni veloci. E' quindi possibile da parte dell'utente processare i dati dei siti di interesse e combinarli e stabilizzarli nel sistema di riferimento adottato con l'ausilio di soluzioni e file di appoggio contenenti coordinate, velocità e quant'altro scaricate dalle predette banche dati, potendo anche scegliere il sistema di riferimento più opportuno (es. ETRF2000/2005). Si rimanda ad una vasta bibliografia per approfondire l'argomento (Adam e al. 2002; Bruyninx e al. 2001, 2004; Kenyeres e Bruyninx, 2004; ecc).

I software per l'analisi del dato GPS

Nell'ambito dei software scientifici per l'analisi del dato GPS uno dei più flessibili e potenti è senza dubbio il GAMIT/GLOBK ingegnerizzato al MIT (Massachusetts Institute

of Technology, USA) dal team coordinato da T. Herring e R. King. Questo software consente tutte le operazioni predette e viene proficuamente utilizzato dai geodeti della Sezione di Bologna dell'INGV (Casula e Pesci). I dati, raccolti in un archivio mediante procedure automatiche, vengono processati periodicamente ogni settimana mediante PC Linux OpenSuse di basso costo e le soluzioni derivanti in SINEX vengono utilizzate per differenti studi di carattere geodinamico, tettonico, di dissesto idrogeologico e monitoraggio delle aree vulcaniche attive nel territorio Italiano.

GAMIT/GLOBK funziona con il metodo delle sessioni distribuite: in pratica, si divide una rete GPS in un certo numero di sottoreti, con almeno 3 stazioni fiduciali in comune, che vengono processate in modo indipendente ma utilizzando le orbite precise IGS. Le soluzioni delle sottoreti, ottenute in termini di quasi-osservazioni, sono come dei mattoncini che saranno uniti insieme per ottenere, mediante operazioni di compensazione (in gergo detta combinazione robusta) la soluzione finale della rete intera. La finalità di questa metodologia è tra l'altro quella di consentire il processing di reti di grandi dimensioni mediante normali PC con normali prestazioni e basso costo.

Il passo finale delle analisi è la compensazione e stabilizzazione con le soluzioni ottenute da altri centri di calcolo, consentendo l'inserimento dei propri risultati nei sistemi di riferimento esterni, definiti da coordinate e velocità dei siti fiduciali disponibili online nei database dei vari centri di analisi. Nelle applicazioni descritte in questo lavoro, si è utilizzato il sistema di riferimento di EUREF (<http://www.epncb.oma.be>).

L'analisi dei dati GPS

Generalmente, le soluzioni fornite dall'INGV di Bologna vengono combinate con quelle del MIT (o del SOPAC) e dopo un procedimento di compensazione che ne consente la stabilizzazione vengono confrontate con le soluzioni di altri centri come l'EUREF per la verifica della qualità ed il confronto fra le soluzioni stesse. La flessibilità è una delle caratteristiche principali del software GLOBK, che consente la compensazione di soluzioni SINEX derivanti da altri sof-

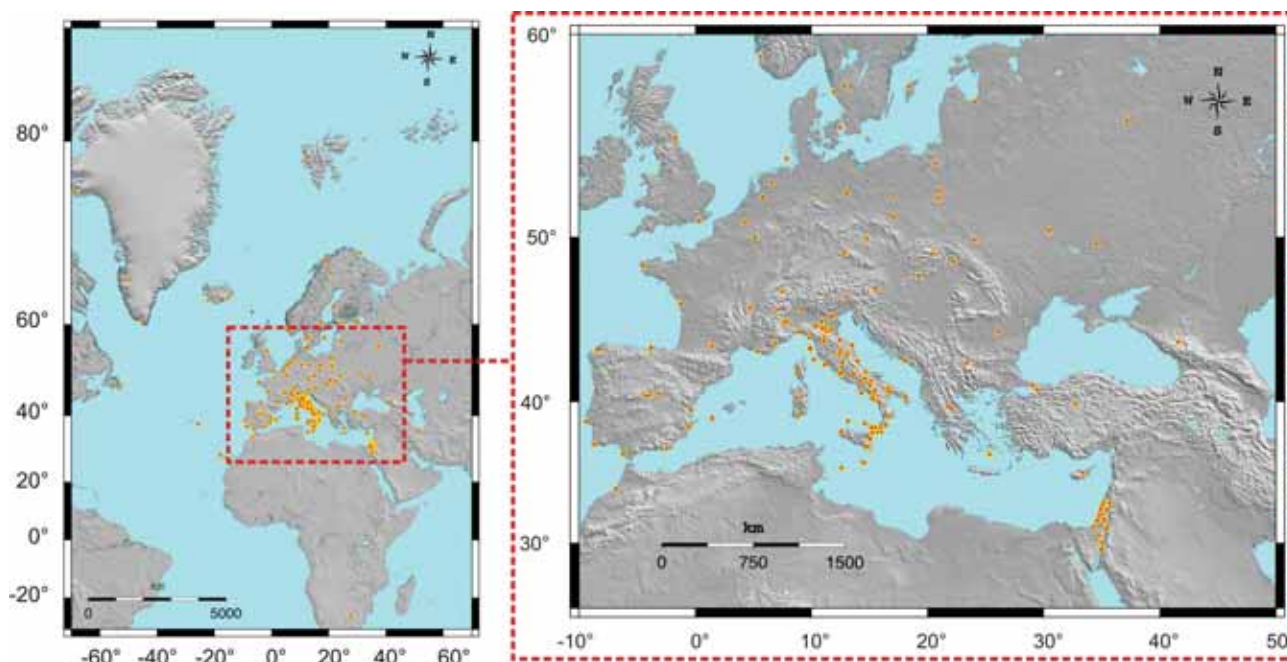


Figura 1 - Mappa delle stazioni nazionali e internazionali utilizzate per lo studio di Santorini. Ausilio della libreria grafica GMT (<http://gmt.soest.hawaii.edu>).

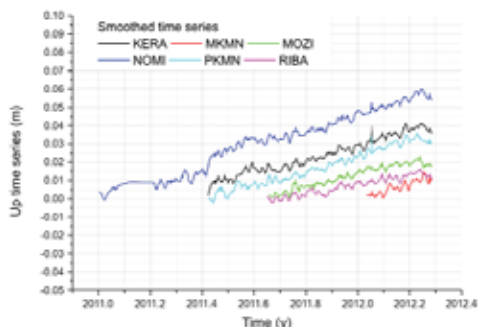
software di analisi come Bernese e Gipsy con l'ausilio di particolari file di setup. I dettagli sono descritti in (Casula et al., 2011).

Il tipo di procedura ed il metodo di analisi utilizzato nonché l'aggiornamento continuo della banca dati e l'impiego di semplici PC per la gestione del sistema ha permesso agli autori di operare con grande rapidità ed efficienza nel caso dello studio delle deformazioni attualmente in atto nell'Isola di Santorini (Newman et al., 2012; Lagios et al., 2005) che, dal 2011 ad oggi, è soggetta ad eventi sismici e movimenti del terreno che sembrano testimoniare il risveglio della caldera. I livelli di deformazione sono importanti e tutt'ora in corso, come vedremo nel seguito.

I geodeti della Sezione INGV di Bologna hanno effettuato l'analisi dei dati GPS forniti dalla rete permanente istituita da UNAVCO (University NAVSTAR Consortium, <http://www.unavco.org>), nell'isola di Santorini (Isole Cicladi, GR). La rete è costituita da 5 stazioni permanenti (KERA, MOZI, NOMI, PKMN e RIBA) attivate nel 2011, tra i mesi di gennaio e giugno, e da una stazione permanente (MKMN) attivata a inizio 2012.

Come descritto in precedenza, i dati sono stati trattati mediante il software GAMIT/GLOBK 10.4 seguendo la strategia di analisi a sessioni distribuite e le soluzioni sono state combinate con le soluzioni di SOPAC (Scripts Orbit and Permanent Array Center, <http://sopac.ucsd.edu>) applicando le procedure già ampiamente descritte nel Quaderno di Geofisica n. 91 (2011).

Figura 2 - Serie temporali delle coordinate verticali. Anche in questo caso i valori delle velocità di espansione sono notevoli.



Le predette stazioni GPS sono state inquadrate in una rete più ampia costituita da alcune stazioni permanenti greche della rete EUREF GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Permanent Network (<http://www.epncb.oma.be>) ed inserite nel sistema di riferimento IGS08 a partire dalle coordinate e velocità definite da EUREF e secondo le specifiche indicate sempre da EUREF (oltre 90 stazioni fiduciali europee), come mostrato in figura 1.

I movimenti significativi

Le serie temporali delle coordinate verticali e orizzontali delle stazioni processate per il periodo Gennaio 2011 – Aprile 2012 sono mostrate nelle figure 2 e 3 ed indicano dei movimenti significativi e tendenzialmente lineari nel tempo da cui un calcolo preliminare delle velocità mediante interpolazione lineare dei dati. Tale interpolazione è stata eseguita mediante il pacchetto MALAB SURMODERR (Pesci et al., 2009; Teza et al., 2011), il quale permette sia di studiare trend da dati ottenuti mediante stazioni permanenti, sia di ottenere ragionevoli stime degli errori dei dati ottenuti da stazioni episodiche. Nel caso di una stazione permanente, com'è il caso di tutte le stazio-

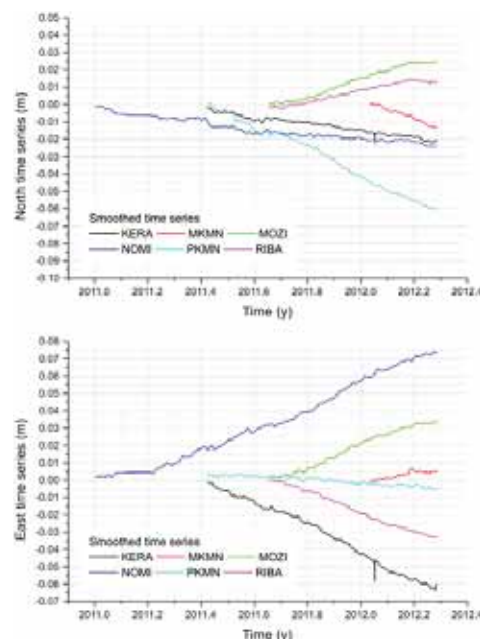


Figura 3 - Serie temporali delle coordinate orizzontali nelle componenti Est e Nord. Si noti il periodo di osservazione generalmente inferiore ad un anno ma, nel contempo, si osservino i valori elevati delle velocità estratte.

ni qui considerate, SURMODERR permette, in particolare, di filtrare i dati eliminando eventuali outliers, riducendo le componenti di rumore ad alta frequenza (nonché di tenere conto di alcune componenti di tipo stagionale).

Le stime di velocità ottenute sono rappresentate in figura 4 (a sinistra le componenti orizzontali e a destra quelle verticali). Poiché le pur poche stazioni sono ben spazialmente distribuite attorno al centro della caldera (in effetti quasi completamente sommersa), è stato possibile calcolare il corrispondente tensore di deformazione, dato certamente di sicuro interesse ai fini della valutazione di possibili attività in atto. Per fare ciò si è fatto ricorso al pacchetto MATLAB `grid_strain` (Pesci e Teza, 2007; Teza et al, 2008). Tale pacchetto permette sia di calcolare il tensore di deformazione (o tensore di strain), insieme alla corrispondente incertezza e ad una valutazione della significatività del risultato, in ciascun nodo di una griglia regolare, sia di calcolarne tale valore in punti scelti dall'utente. Nel caso specifico, la scelta di calcolare il tensore di deformazione nel baricentro dei vertici GPS è stata pressoché obbligata perché si tratta dell'unico punto caratterizzato da grande significatività dal punto di vista geometrico. Esso è anche punto di grande interesse dal punto di vista geofisico perché pressoché coincidente col centro della caldera. In questa prima analisi il tensore è calcolato tenendo conto esclusivamente delle componenti orizzontali, soluzione del resto molto ragionevole perché le componenti verticali delle velocità delle singole stazioni si discostano poco dalla media (dunque sollevamento generale), a differenza di quanto avviene per le predette componenti orizzontali.

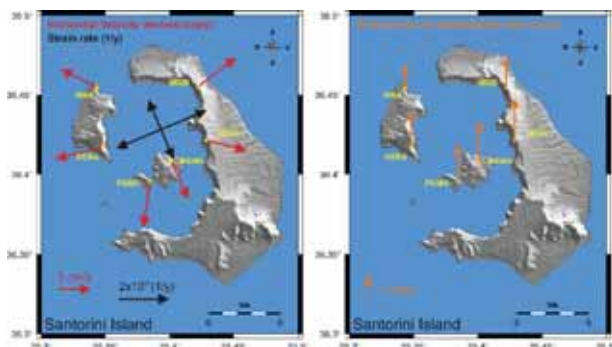


Figura 4 - Espansione della caldera del vulcano definite dalle velocità orizzontali e verticali inserite nella mappa dell'isola: il tensore di deformazione è indicato in nero primo riquadro. Ausilio della libreria grafica GMT (<http://gmt.soest.hawaii.edu>).

Risultanze

Alla luce dei risultati preliminari ottenuti riguardo alle componenti di velocità e al tensore di deformazione, si può dunque affermare che la cinematica attuale è caratterizzata da: (i) moto generale di sollevamento dell'edificio vulcanico, con piccole dispersioni; (ii) forte deformazione in estensione lungo entrambe le direzioni principali (con direzione di massima deformazione approssimativamente orientata verso ENE); (iii) fenomeno tuttora in atto.

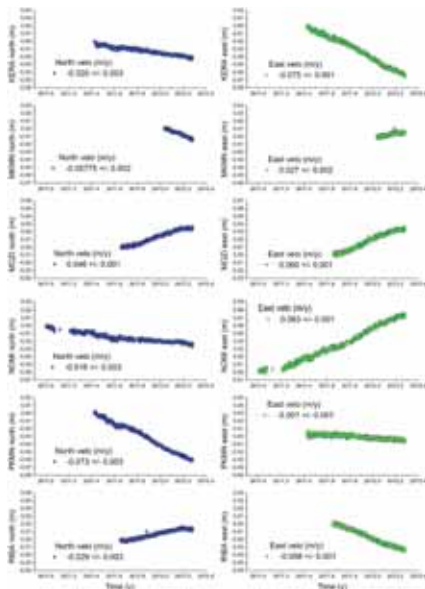
È molto importante sottolineare che il risultato fornito va inteso come risultato preliminare in quanto le stazioni permanenti utilizzate sono ancora giovani, cioè hanno operato per un tempo ancora non sufficiente per fornire un risultato stabile. Trattandosi in alcuni casi di serie temporali di alcuni mesi va considerato che la velocità verticale potrebbe essere affetta dalla sovrapposizione di rumore colorato di periodo annuale e semi-annuale tipico delle serie temporali GPS che riduce la precisione della stima della velocità. Tuttavia, si evince innegabilmente un sollevamento ed allargamento

dell'edificio vulcanico dell'isola di vari centimetri all'anno, spiegabili con un risveglio dell'attività del vulcano stesso con l'evidente fenomeno di rapida espansione.

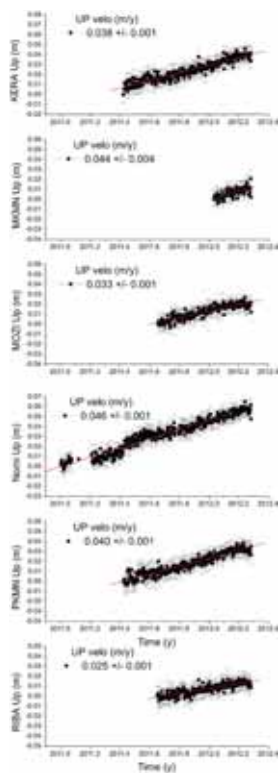
Le analisi qui descritte sono state eseguite in due soli giorni di lavoro e a costo zero, grazie all'efficienza delle procedure impiegate, ottimizzate dagli autori. In questo senso il metodo è vincente nel controllo di possibili criticità qualora esista una banca dati utilizzabile per i siti di interesse. I risultati ottenuti sono stati confrontati con il recentissimo lavoro appena pubblicato su GRL da Newman e altri (2012) nel quale sono mostrate le velocità delle stazioni permanenti (ad eccezione di MKMN) calcolate tra il gennaio 2011 e fine gennaio 2012. Nonostante 3 mesi di differenza nel contenuto di informazione, i valori delle velocità verticali ed orizzontali sono sostanzialmente gli stessi a conferma della bontà del metodo utilizzato e della validità dei risultati. Eventuali ulteriori più precise informazioni di potranno ottenere in futuro a seguito della disponibilità di serie temporali più lunghe.

Riferimenti

- ADAM J., W. AUGATH, C. BOUCHER, C. BRUYNINX, A. CAPORALI, E. GUBLER, W. GURTNER, H. HABRICH, B. HARSSON, H. HORNIK, J. IHDE, A. KENYERES, H. VAN DER MAREL, H. SEEGER, J. SIMEK, G. STANGL, J. TORRES, G. WEBER, 2002, "STATUS OF THE EUROPEAN REFERENCE FRAME - EUREF", INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEODESY SYMPOSIA, IAG SCIENTIFIC ASSEMBLY, SPRINGER, ED. J. ADAM AND K.-P. SCHWARZ, VOL. 125, PP 42-46.
- BRUYNINX C., M. BECKER AND G. STANGL, 2001, "REGIONAL DENSIFICATION OF THE IGS IN EUROPE USING THE EUREF PERMANENT GPS NETWORK (EPN)", PHYS. CHEM. EARTH, VOL. 26, No 6-8, PP.531-538.
- BRUYNINX C., 2004, "THE EUREF PERMANENT NETWORK: A MULTI-DISCIPLINARY NETWORK SERVING SURVEYORS AS WELL AS SCIENTISTS", GEOINFORMATICS, VOL 7, PP. 32-35.
- HERRING T.A., 2003. MATLAB TOOLS FOR VIEWING GPS VELOCITIES AND TIME SERIES, GPS SOLUTIONS, 7(3), 194-199.
- HERRING T, KING B AND McCLUSKY S 2010 INTRODUCTION TO GAMIT/ GLOBK REFERENCE MANUAL GLOBAL KALMAN FILTER VLBI AND GPS ANALYSIS PROGRAM. RELEASE 10.3. EAPS, MIT.
- KENYERES A. AND BRUYNINX C., 2004, "MONITORING OF THE EPN COORDINATE TIME SERIES FOR IMPROVED REFERENCE FRAME MAINTENANCE", GPS SOLUTIONS, VOL 8, No 4, PP. 200-209.
- LAGIOS E., PARCHARIDIS IS., FOUMELIS M. & SAKKAS V. (2005). GROUND DEFORMATION MONITORING OF THE SANTORINI VOLCANO USING SATELLITE RADAR INTERFEROMETRY. PROC. 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCES IN SPACE TECHNOLOGIES, 9-11 JUNE 2005. 667-672.
- NEWMAN A.V., STIROS S., FENG L., PSIMOULIS P., MOSCHAS F., SALTOGIANNI V., JIANG Y., PAPAACHOS C., PANAGIOTOPOULOS D., KARAGIANNI E., AND VAMMARAKIS D.. RECENT GEODETIC UNREST AT SANTORINI CALDERA, GREECE. GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 39, L06309, PAG. 1-5, DOI: 10.1029/2012GL051286.
- PESCI, A., TEZA, G., 2007. STRAIN RATE ANALYSIS OVER THE CENTRAL APENNINES FROM GPS VELOCITIES: THE DEVELOPMENT OF A NEW FREE SOFTWARE. BOLLETTINO DI GEODESIA E SCIENZE AFFINI, 56, 6988.
- PESCI, A., TEZA, G., CASULA, G., 2009. IMPROVING STRAIN RATE ESTIMATION FROM VELOCITY DATA OF NON-PERMANENT GPS STATIONS: THE CENTRAL APENNINE STUDY CASE (ITALY). GPS SOLUTIONS, 13(4), 249261.
- TEZA G., PESCI A., AND GALGARO A.. GRID_STRAIN AND GRID_STRAIN3: SOFTWARE PACKAGES FOR STRAIN FIELD COMPUTATION IN 2D AND 3D ENVIRONMENTS. COMPUTERS & GEOSCIENCES, VOLUME 34, ISSUE 9, SEPTEMBER 2008, PAGES 1142-1153. DOI: 10.1016/J.CAGEO.2007.07.006.
- TEZA, G., PESCI, A., CASULA, G., 2010. SURMODERR: A MATLAB TOOLBOX FOR ESTIMATION OF VELOCITY UNCERTAINTIES OF A NON-PERMANENT GPS STATION. COMPUTERS & GEOSCIENCES, 36(8), 1033-1041.
- WESSEL, P., AND W. H. F. SMITH (1998), NEW, IMPROVED VERSION OF GENERIC MAPPING TOOLS RELEASED, EOS TRANS. AGU, 79(47), 579-583.



Appendice A (sopra) – Serie temporali delle stazioni nelle componenti orizzontali.



Appendice B (a destra) – Serie temporali delle stazioni nella componente verticale.

Abstract

Remote monitoring of deformations in the island of Santorini: an integrated procedure for GPS data analysis at the INGV in Bologna

The GPS (Global Positioning System) is a well-known global positioning system capable of providing the spatial coordinates of an operator, if equipped with an antenna and a receiver satellite, at any point on the earth, and in any weather conditions and at any time of the day. Today, the GPS, which is owned by the Department of Defense of the United States of America (U.S. DoD), is aided by the GLONASS (the Russian analogue system) and other global positioning systems based on interferometry from space microwave signals, for example, the nascent Galileo (European) and Beidou (China). For this reason we talk at today about GNSS Global Navigation Satellite System.

Autore

ARIANNA PESCI - ARIANNA.PESCI@BO.INGV.IT
GIUSEPPE CASULA - xxxxxxxxxxxx@ssssss.ss

ISTITUTO NAZIONALE GEOFISICA VULCANOLOGIA
SEZIONE DI BOLOGNA V. CRETI 12, I 40128 BOLOGNA

GIORDANO TEZA - xxxxxxxxxxxx@ssssss.ss
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA, DIPARTIMENTO DI GEOSCIENZE

ENZO BOSCHI - xxxxxxxxxxxx@ssssss.ss
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BOLOGNA, DIPARTIMENTO DI FISICA

Parole chiave

GNSS, MONITORAGGIO, DEFORMAZIONI.

MicroSurvey

ALTUS
POSITIONING SYSTEMS

GPS GNSS RTK APS-3
Facile, Completo, Preciso

Surveysoft - Distributore per l'Italia dei Prodotti Altus-GPS, Microsurvey Software, RUIDE Stazioni Totali

www.surveysoft.it