

M. ANZIDEI - P. BALDI - G. CASULA - A. GALVANI - A. PESCI - A. ZANUTTA

☆

Spostamenti rilevati alle stazioni GPS
della rete IGM95 poste nell'area
dell'Appennino umbro-marchigiano dopo
gli eventi sismici del settembre-ottobre 1997

ESTRATTO DAL «BOLLETTINO DI GEODESIA E SCIENZE AFFINI»
RIVISTA DELL'ISTITUTO GEOGRAFICO MILITARE
ANNO LIX - N. 3 - LUGLIO-AGOSTO-SETTEMBRE 2000

Spostamenti rilevati alle stazioni GPS della rete IGM95 poste nell'area dell'Appennino umbro-marchigiano dopo gli eventi sismici del settembre-ottobre 1997

M. ANZIDEI ⁽¹⁾ - P. BALDI ⁽²⁾ - G. CASULA ⁽¹⁾
A. GALVANI ⁽¹⁾ - A. PESCI ⁽¹⁾ - A. ZANUTTA ⁽³⁾

Sommario. - Vengono presentati i risultati dei rilievi GPS eseguiti in 18 stazioni della rete IGM95 posti nelle aree di Colfiorito e Sellano (Appennino umbro-marchigiano) dopo gli eventi sismici del settembre-ottobre 1997. I dati mostrano deformazioni del suolo cosismiche prodotte dai terremoti più forti della intera sequenza sismica. I primi due eventi, avvenuti il 26 settembre, di magnitudo $M_w = 5.7$ ed $M_w = 6.0$, hanno prodotto nella zona di Colfiorito deformazioni planoaltimetriche fino a 25 cm. L'evento sismico del 14 ottobre, di magnitudo $M_w = 5.6$, avvenuto nella zona di Sellano, pur producendo deformazioni osservabili in superficie, non ha indotto deformazioni misurabili alle stazioni GPS più vicine a causa della sfavorevole configurazione della rete IGM95 rispetto alla collocazione delle faglie attivate. Nel lavoro vengono riportate le variazioni riscontrate su tutte le stazioni misurate, al fine di fornire un aggiornamento dei dati della rete IGM95.

DISPLACEMENTS MEASURED AT THE GPS STATIONS OF THE IGM95 NETWORK LOCATED IN THE UMBRIA-MARCHE APENNINE, AFTER THE EARTHQUAKES OF SEPTEMBER-OCTOBER 1997.

Summary. - In this paper we present the GPS data collected at 18 stations of the IGM95 GPS network, in the Colfiorito and Sellano areas. The data show ground deformations due to the largest earthquakes of the umbria-marche seismic sequence of September-October, 1997. The first two events, occurred on September 26, $M_w = 5.7$ and $M_w = 6.0$, produced planoaltimetric displacements up to 25 cm in the Colfiorito area. The October 14, 1997 earthquake, occurred near Sellano village and produced visible ground deformations that were not revealed at the GPS monuments due to the unfavorable GPS IGM95 network configuration in this area. We present and discuss the whole geodetic data set collected in the area, useful to update the 3-D coordinates of the IGM95 GPS monuments, for scientific and civil applications.

⁽¹⁾ Istituto Nazionale di Geofisica, Roma.

⁽²⁾ Dipartimento di Fisica, Università di Bologna.

⁽³⁾ DISTART, Università di Bologna.

Parole chiave: deformazioni crostali, GPS, rete IGM95, terremoti umbro-marchigiani.
Keywords: crustal deformation, GPS, IGM95, Umbria-Marche earthquakes.

1. - INTRODUZIONE

La sequenza sismica che ha colpito la regione umbro-marchigiana nel settembre-ottobre 1997 è stata la più forte avvenuta in quest'area dal XVIII secolo (Boschi et al., 1995) e ha prodotto un forte danneggiamento sul patrimonio abitativo e industriale in una vasta area dell'Appennino (fig. 1).

La sequenza ha avuto inizio i primi giorni del settembre 1997 nell'area di Colfiorito con un evento sismico di M_L 4.7, seguito da molti microterremoti e da due eventi più forti il 26 settembre alle ore 00:33 (M_w 5.7) e alle 09:40 GMT (M_w 6.0). Sei ulteriori eventi di magnitudo maggiore di 5.0 sono avvenuti in una fascia sismogenetica dell'Appennino di circa 50 km di lunghezza interessata da faglie normali orientate NO-SE (Amato et al., 1998; Ekstrom et al., 1998; Cocco et al., 2000).

L'evento di maggiore energia, dopo quelli del 26 settembre, è stato quello di Sellano del 14 ottobre, di M_w = 5.7, posto a circa 15 km a SE dei precedenti. Tutti gli eventi principali hanno prodotto faglie normali immergenti a basso angolo verso SO la cui geometria è stata ben vincolata usando dati sismologici, geodetici e geologici (Amato et al., 1998; Deschamps et al. 1984, Ekstrom et al., 1998; Cinti et al., 1999; Stramondo et al., 1999; Hunstad et al., 1999).

In occasione della sequenza si è potuto osservare e misurare con diverse tecniche la deformazione del suolo cosismica, che è stata caratterizzata da una diffusa deformazione superficiale. In particolare sono state osservate e studiate fratture lungo una fascia lunga circa 10 km coincidente con l'area epicentrale (Cinti et al., 1998; Cello et al., 1998). Misure di livellazione lungo le linee dell'I.G.M. hanno permesso di identificare variazioni di quota in tre diverse epoche con conseguenti deformazioni verticali sia pre che post-sismiche al bordo NO dell'area di massimo danneggiamento (De Martini e Valensise, 1999). Al contempo, nuove misure GPS eseguite su 18 monumenti geodetici della rete IGM95 (fig. 2-3), misurati per la prima volta nel 1995 nell'ambito di un progetto di aggiornamento geodetico del territorio italiano da parte dell'Istituto Geografico Militare, hanno mostrato importanti deformazioni planoaltimetriche (Anzidei et al., 1998). Mappe dettagliate delle deformazioni sono state anche ottenute con la tecnica DInSAR (Differential SAR Interferometry) da Stramondo et al. (1999) e da Salvi et al. (2000) usando immagini pre e post-sismiche del satellite ERS. L'andamento concentrico delle frange d'interferenza mostra chiaramente uno sprofondamento generale dell'area epicentrale con minimi di -14 e -25 cm, corrispondenti ai due eventi del 26 settembre e di circa -15 cm per quello del 14 ottobre.

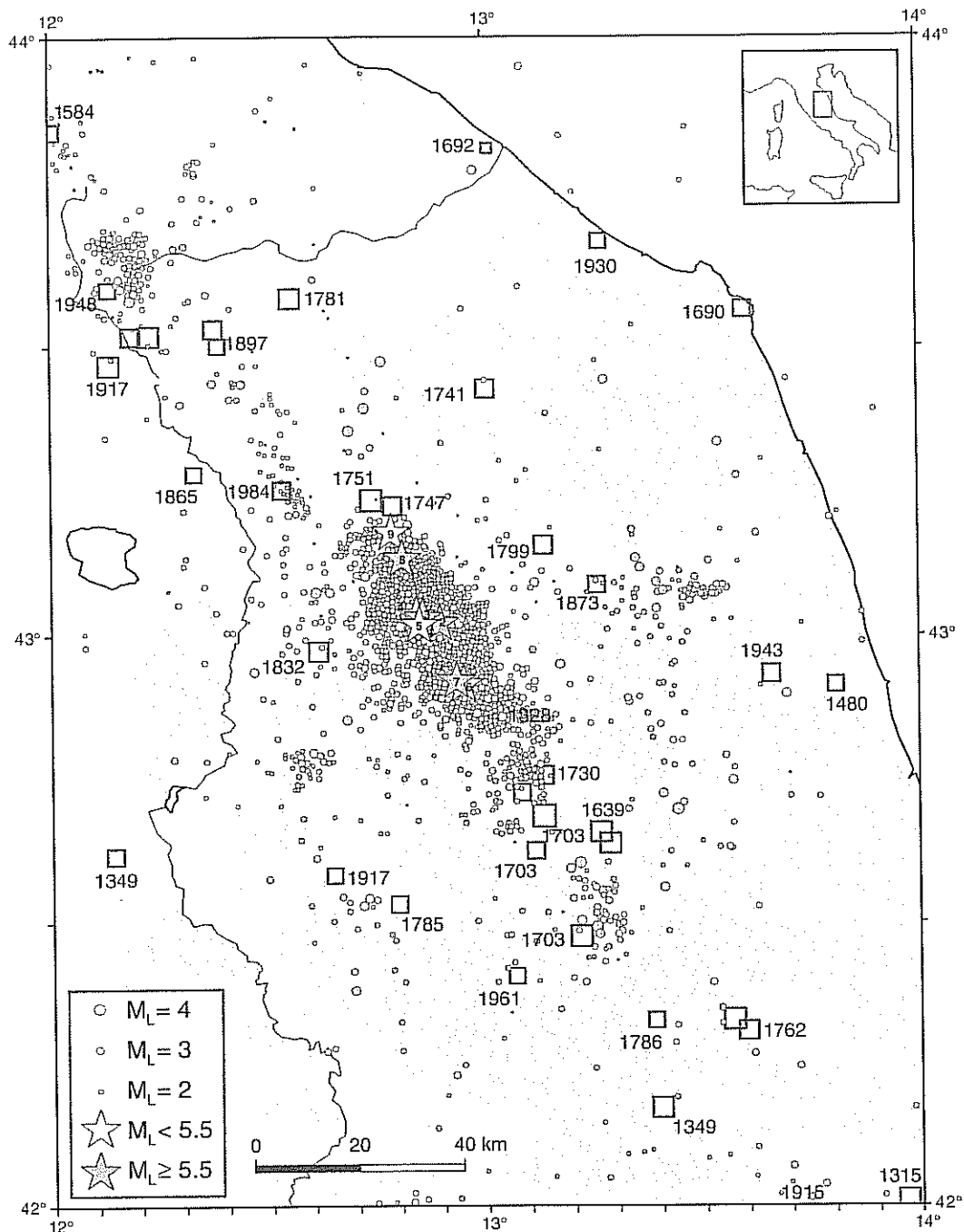


Fig. 1 - Sismicità storica (quadrati rossi) e strumentale (cerchi) dell'area umbro-marchigiana. Le stelle (numerate da 1 a 7) indicano gli epicentri dei maggiori eventi della sequenza sismica del 1997. Quelle indicate con 8 e 9 sono relative ai terremoti avvenuti nel 1998 (26 marzo $M_w = 5.3$ e 3 aprile $M_w = 5.1$). (modificato da Cocco et al., 2000).

In questo lavoro presentiamo i risultati relativi alle nuove misure GPS effettuate nel settembre-ottobre 1997 sui monumenti geodetici della rete IGM95 nel settore dell'Appennino umbro-marchigiano compreso tra $42^{\circ} 41'$ e $43^{\circ} 17'$ Nord e tra $12^{\circ} 03'$ e $13^{\circ} 18'$ Est, utile per fini scientifici ed applicativi.

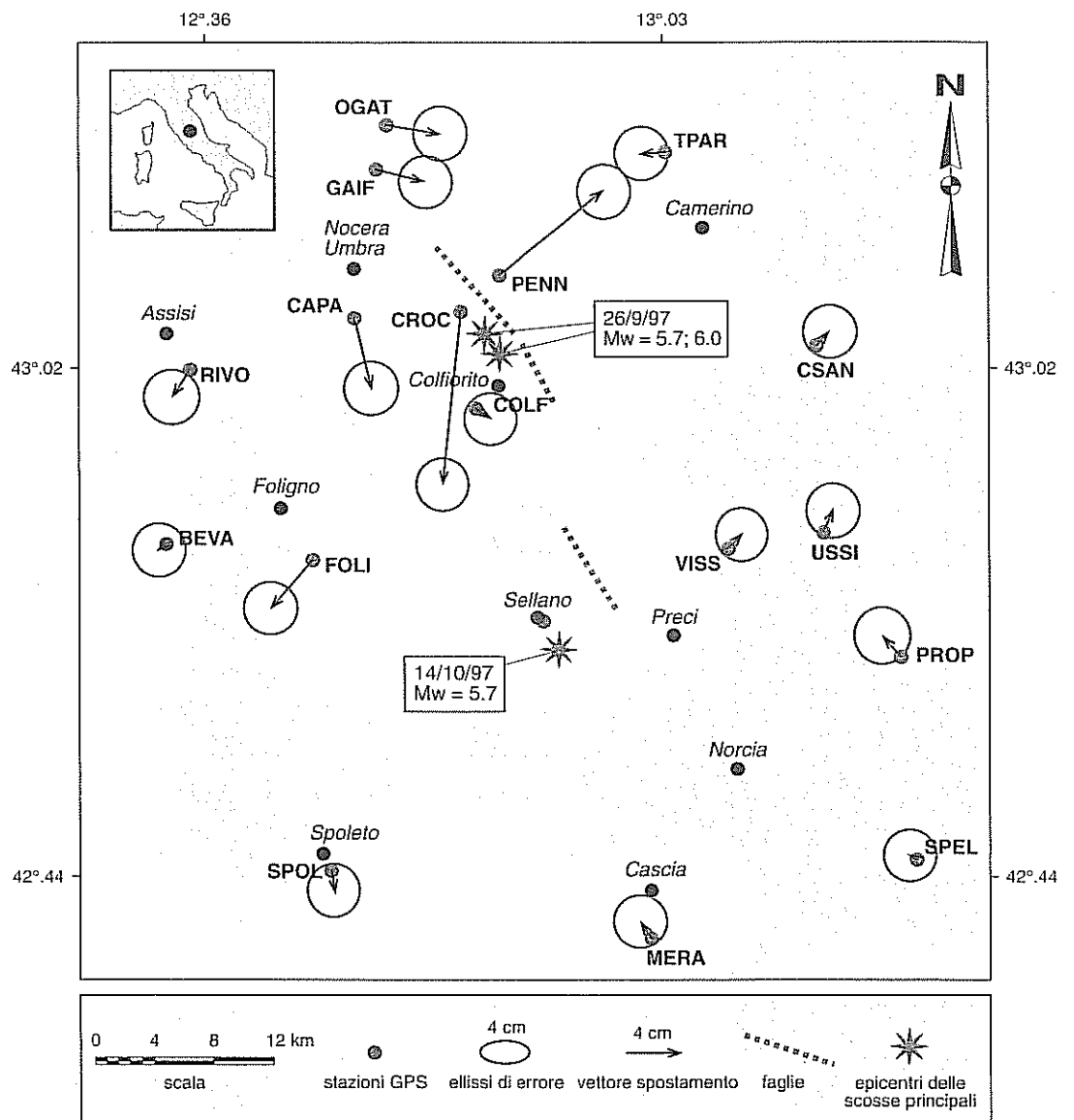


Fig. 2 - Deformazioni del suolo cosismiche planimetriche misurate sui vertici della rete IGM95 dopo l'intera sequenza del settembre-ottobre 1997. In figura sono anche riportate le tracce delle faglie responsabili dei maggiori eventi nelle zone di Colfiorito e Sellano.

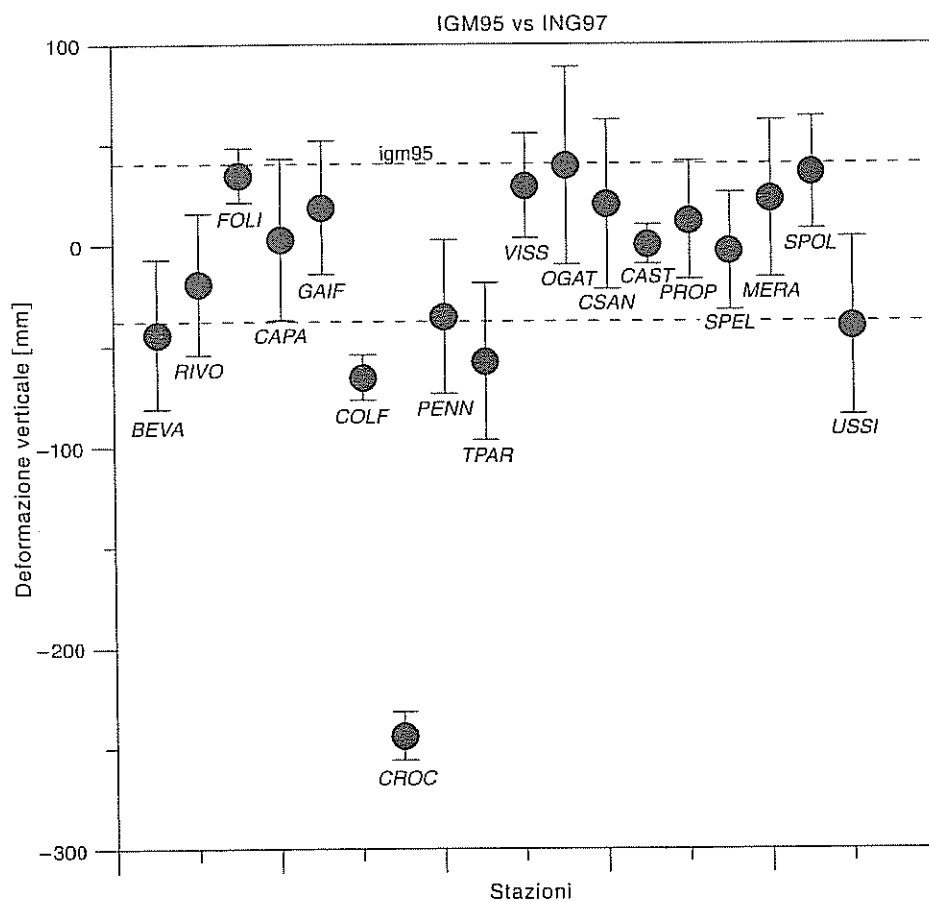


Fig. 3 - Deformazioni verticali cosismiche misurate ai monumenti della rete IGM95 dopo l'intera sequenza. Le linee a tratteggio rappresentano l'errore altimetrico medio dei dati IGM95 (95% di confidenza).

2. - GPS: CAMPAGNE E SPOSTAMENTI ALLE STAZIONI GPS

Durante il periodo 1992-1996 l'Istituto Geografico Militare (I.G.M.) ha installato e misurato la nuova rete GPS nazionale IGM95, che consiste di oltre 1200 stazioni distribuite su tutto il territorio italiano (Surace, 1993, 1997). La compensazione finale dell'intera rete (Surace, 1997) ha fornito coordinate 3-D con accuratèzze medie di 22 mm nella componente orizzontale e di 35 mm in quella verticale (al 95% di confidenza). Alcune stazioni di questa rete, misurate la prima volta dall'I.G.M. durante il periodo marzo-aprile del 1995, sono poste nell'area colpita dai tre maggiori eventi della sequenza sismica umbro-marchigiana, del settembre-ottobre 1997. Dopo un sopralluogo iniziale, sono stati selezionati nelle zone di Colfiorito e Sellano 18 vertici posti su pilastri o su piccole costruzioni in cemento armato non danneggiati dagli eventi

sismici; questi vertici sono stati misurati nel corso di due differenti campagne usando sei ricevitori GPS TRIMBLE 4000 SSE/SSI a doppia frequenza.

Durante entrambe le campagne sono stati mantenuti fissi in acquisizione continua, con passo di campionamento di 30 sec, tre ricevitori posti a Castiglione del Lago (CAST), Foligno (FOLI) e Colfiorito (COLF). Le rimanenti 16 stazioni sono state misurate utilizzando 5 ricevitori mobili durante sessioni di misura della durata di 4-8 ore, ripetute in giorni diversi (tab. 1). I dati sono stati analizzati con il software Bernese (versione 4.0), utilizzando le effemeridi precise del Centre of Orbit Determination in Europe (CODE) e le procedure standard descritte da Rothacher et al. (1996), stimando i ritardi troposferici e fissando le ambiguità. Le soluzioni multi-base indipendenti sono state compensate con il programma NETGPS (Crespi, 1996) ottenendo coordinate 3-D caratterizzate da una accuratezza (95% di livello di confidenza) di 10 mm nella componente orizzontale e di 20 mm in quella verticale (valore medio dei semiassi degli ellissi di errore). Il confronto fra i due set di coordinate (IGM95 e ING1997) è stato effettuato mediante una trasformazione di Helmert a sette parametri che ha eliminato gli errori sistematici dovuti alla differenza dei sistemi di riferimento. Questo primo confronto ha messo in evidenza residui di alcuni centimetri in corrispondenza di alcune stazioni poste in prossimità degli epicentri dello scosse principali. Per valutare le deformazioni cosismiche assolute misurate alle stazioni geodetiche, si è quindi proceduto ad una trasformazione di Helmert, minimizzando i residui delle coordinate di tutte le stazioni localizzate a distanza maggiori di 15 km dall'epicentro, ottenendo una descrizione del campo di deformazione riportato in fig. 2-3 e tab. 2. Abbiamo infatti assunto che per eventi sismici di M_w 6.0 la deformazione cosismica sia trascurabile a queste distanze, secondo le relazioni di Wells e Coppersmith (1994).

Tab. 1 - Caratteristiche generali delle campagne ING97

Monumenti occupati	18
Ricevitori	6 Trimble 4000sse 2 Trimble 4000ssi
Finestra di osservazione	24 ^h stazioni fisse (CAST, COLF, CROC) 4-8 ^h ricevitori mobili
Passo di campionamento	30 ^s
GPS software	Bernese vers. 4.0
Effemeridi GPS	Precise (CODE)
Software di compensazione	Netgps

Tab. 2 – Spostamenti cosismici misurati alle stazioni GPS dopo le campagne ING97

Stazione	Nord [mm]	Est [mm]	Totale [mm]	Azimuth [°]	Verticale [mm]
COLF - Colfiorito	-10	14	17	125	-65
BEVA - Bevagna	-4	-4	5	219	-44
CAST - Castiglione	17	-16	23	316	-10
CROC - Collecroce	-144	-15	145	186	-243
CAPA - Capannacce	-62	13	63	167	3
CSAN - Collesanto	13	10	16	38	21
FOLI - Foligno	-40	-35	53	221	35
GAIF - Gaifana	-9	41	42	103	19
OGAT - O. Gatto	-7	44	44	99	40
PENN - Pennino	70	85	111	50	-35
RIVO - Rivortorto	-23	-15	27	213	-20
TPAR - Torre Parco	-1	-21	21	267	-57
VISS - Visso	14	12	18	40	30
PROP - Propezzano	20	-16	26	321	14
SPEL - Spelonga	2	-3	4	303	-2
MERA - Mearaviglia	16	-9	18	330	-24
SPOL - Spoleto	-18	3	18	171	37
USSI - Ussita	21	8	23	20	-39

3. – DISCUSSIONE

Gli spostamenti maggiori sono stati misurati nei vertici di Monte Pennino (PENN), Collecroce (CROC), Capannacce (CAPA), Colfiorito (COLF), Bevagna (BEVA) e Foligno (FOLI), che mostrano significative differenze di coordinate planari e/o altimetriche (fig. 2-3). Dal punto di vista geofisico i dati geodetici maggiormente rilevanti sono

quelli acquisiti alle stazioni di CROC, PENN, CAPA e COLF, che delimitano l'area di massima deformazione superficiale dovuta agli eventi del 26 settembre. Questi dati sono risultati estremamente utili nei processi di inversione per la definizione dei parametri delle faglie responsabili degli eventi principali (Hunstad et al., 1999, Satramondo et al., 1998). Per quanto riguarda la parte più meridionale della rete, la zona di Sellano, la rete IGM95 si è mostrata debole a causa del minore numero di stazioni, impedendo la misura delle deformazioni del suolo dovute all'evento del 14 ottobre che, come osservato da tecniche interferometriche differenziali SAR, sono state di circa 15 cm in prossimità della faglia. Al fine di migliorare la distribuzione delle stazioni in questa zona, è stato realizzato un raffittimento della rete, istituendo in collaborazione con l'Istituto Internazionale di Vulcanologia di Catania una stazione a Sellano, i cui dati saranno di estrema utilità in futuro.

I dati raccolti hanno comunque confermato l'accuratezza della rete IGM95 e hanno permesso sia di rivelare la entità delle deformazioni planoaltimetriche di questa porzione di territorio indotte dai principali eventi sismici del settembre-ottobre 1997 sia di definire le caratteristiche geometriche delle faglie responsabili di questi terremoti, fornendo un contributo fondamentale alle conoscenze sismotettoniche di questo settore dell'Appennino.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia l'Istituto Geografico Militare per avere fornito i dati GPS della rete IGM95 e l'Istituto Internazionale di Vulcanologia di Catania per i dati della stazione di Sellano. Si ringraziano i Sig.ri S. Del Mese, M. Vecchi, A. Massucci dell'ING e i Sig.ri M. Bacchetti e il C. Guidi dell'Università di Bologna, per il loro contributo durante i rilievi. Questo lavoro è stato parzialmente finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana (contratto ASI-ARS 96-87).

BIBLIOGRAFIA

- A. AMATO, R. AZZARA, C. CHIARABBA, G.B. CIMINI, M. COCCO, M. DI BONA, L. MARGHERITI, S. MAZZA, F. MELE, G. SELVAGGI, A. BASILI, E. BOSCHI, F. COURBOULEX, A. DESCHAMPS, S. GAFFET, G. BITTARELLI, L. CHIARALUCE, D. PICCININI, M. RIPEPE (1998), *The 1997 Umbria-Marche, central Italy earthquake sequence: a first look at main shocks and aftershocks*. Geophys. Res. Lett. 25, 15, pp. 2861-2864.
- M. ANZIDEI, P. BALDI, A. COTICCHIA, S. DEL MESE, A. GALVANI, I. HUNSTAD, A. PESCI, M. PIEROZZI, L. SURACE, A. ZANUTTA (1998), *Utilizzo della rete GPS IGM95 per lo studio delle deformazioni cosismiche dei terremoti umbro-marchigiani del 26 settembre 1997*. Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, vol. LVII, n. 3, pp. 325-335.
- E. BOSCHI, G. FERRARI, P. GASPERINI, E. GUIDOBONI, G. SMRIGLIO, G. VALENSISE (1995), *Catalogo dei forti terremoti in Italia dal 461 a. C. al 1980*. Pubblicazione dell'Istituto Nazionale di Geofisica, 973 pp.
- G. CELLO, G. DELANA, S. MAZZOLI, E. TONDI (1997a), *Strutture sismogenetiche dell'Appennino umbro-marchigiano ed effetti di superficie del terremoto del 26 settembre 1997*. Guida all'escursione. Workshop CNR-GNDT, Camerino, 28-29 ottobre 1997.
- G. CELLO, S. MAZZOLI, E. TONDI, E. TURCO (1997b), *Active tectonics in the Central Apennines and possible implication for seismic hazard analysis in peninsular Italy*. Tectonophysics, 272, pp. 43-60.
- F. CINTI, L. CUCCI, F. MARRA, P. MONTONE (1999), *The Umbria-Marche (Italy) sequence: relationship between ground deformation and seismogenetic structure*. Submitted to Geophys. Res. Lett.
- M. COCCO, C. NOSTRO, G. EKSTRÖM (2000), *Static Stress Changes And Fault Interaction During the 1997 Umbria-Marche Earthquake Sequence*. Journal of Seismology, in stampa.
- M. CRESPI (1996), *A software package for the adjustment and analysis of GPS control networks*. Reports on surveying and geodesy, in memory of Prof. A. Gubellini and G. Folloni. M. Unguendoli Ed., Università di Bologna, Edizioni Nautilus, pp. 237-264.
- P.M. DE MARTINI, G. VALENSISE (1999), *Preseismic slip on the 26 September 1997, Umbria-Marche earthquake fault? Unexpected clues from the analysis of 1951-1952 elevation changes*, Geophysical Research Letters, vol. 26 (15), 1953-1956.
- A. DESCHAMPS, G. IANNACCONE, R. SCARPA (1984), *The Umbrian earthquake (Italy) of 19 September 1979*. Annales Geophysicae, 2, 1, pp. 29-36.
- G. EKSTROM, A. MORELLI, A.M. DZIEWONSKI, E. BOSCHI (1998), *Moment tensor analysis of the Central Italy earthquake sequence of September-October 1997*. Geophysical Research Letters, vol. 25, no. 11, 1971-1974.

- I. HUNSTAD, M. ANZIDEI, M. COCCO, P. BALDI, A. GALVANI, A. PESCI (1998), *Modelling Coseismic displacement during the 1997 Umbria-Marche earthquake (Central Italy)*. Submitted to Geoph. Journ. Inter.
- M. ROTHACHER, L. MERVART (1996), *Bernese GPS software version 4.0*. Astronomical Institute of Berne.
- S. SALVI, S. STRAMONDO, M. COCCO, M. TESAURO, I. HUNSTAD, M. ANZIDEI, P. BRIOLE, P. BALDI, E. SANSOSTI, G. FORNARO, R. LANARI, F. DOUMAZ, A. PESCI, A. GALVANI (1999), *Modeling coseismic displacements resulting from SAR interferometry and GPS measurements during the 1997 Umbria-Marche seismic sequence (2000)*. Jour. of Seism., in press.
- SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA (1970), *Carta Geologica d'Italia*. Fogli n. 123, 124, 131, 132.
- S. STRAMONDO, M. TESAURO, P. BRIOLE, E. SANSOSTI, S. SALVI, R. LANARI, M. ANZIDEI, P. BALDI, G. FORNARO, A. AVALONE, M.F. BUONGIORNO, G. FRANCESCHETTI, E. BOSCHI (1999), *The September 26, 1997 Colfiorito, Italy, earthquakes: modeled coseismic surface displacement from SAR interferometry and GPS*. Geoph. Res. Lett., in press.
- L. SURACE (1993), *Il progetto IGM95*. Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, vol. LII, n. 3, pp. 220-230.
- L. SURACE (1997), *La nuova rete geodetica nazionale IGM95: risultati e prospettive di utilizzazione*. Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, vol. LVI, n. 3, pp. 357-377.
- D.L. WELLS, K.J. COPPERSMITH (1994), *New empirical relationships among magnitude, Rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement*. Bulletin of the Seismologica Society of America, vol. 84, no. 4, pp.974-1002.