

Attività sismica recente in Calabria Centro-Meridionale

Ignazio Guerra¹, Carmelina De Rose¹, Anna Gervasi^{1,2}
Giancarlo Neri³, Barbara Orecchio³, Debora Presti³

¹ Dipartimento di Fisica, Università della Calabria, Arcavacata (CS)

² Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma

³ Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Messina

Introduzione

Una delle attività di maggiore rilevanza in sismologia è rappresentata dall'impiego di tecniche di monitoraggio strumentale della microsismicità ai fini dell'individuazione e caratterizzazione delle faglie sismicamente attive. I dati sperimentali raccolti in questo modo, costituiti dai sismogrammi, trovano infatti diverse utilizzazioni: le onde sismiche rappresentano gli agenti più efficaci nel trasportare fino alla superficie informazioni relative alle caratteristiche fisiche ed alla geometria dei materiali attraversati durante il proprio percorso ed agli sforzi esistenti al loro interno.

Tali attività rivestono particolare rilievo nelle aree come la Calabria e le regioni circostanti per motivazioni di almeno due diversi tipi.

La Calabria, come tutta l'Italia peninsulare è ancora sede di un'intensa attività geodinamica in cui le interazioni tra corpi geologici a contatto sono caratterizzate da sovrascorrimenti piuttosto che da scivolamenti laterali: ne consegue che, contrariamente a quanto avviene in regioni come la California, le superficie lungo le quali possono generarsi i terremoti difficilmente intersecano la superficie esterna della Terra o, quando anche questo avviene, le loro tracce vengono rapidamente obliterate dal riaggiustamento dei materiali superficiali, relativamente plastici. Risulta quindi

problematico definire le relazioni eventualmente esistenti tra le strutture superficiali rilevabili con l'osservazione diretta mediante l'impiego delle tecniche tipiche del rilevamento geologico e le strutture sismogenetiche profonde evidenziate dalle osservazioni strumentali.

D'altro canto, è noto come la storia dell'Italia Meridionale sia ricca di eventi sismici catastrofici: gli ultimi grandi terremoti che hanno interessato Calabria e Sicilia sono quelli del 1905 e del 1908, verificatisi quando l'arte di registrare i terremoti era ancora ai suoi albori. Mancano quindi informazioni strumentali dalle quali si possano evincere direttamente informazioni sufficientemente attendibili sulla localizzazione delle sorgenti dotate di più elevato potenziale sismogenetico. È opportuno a questo punto osservare che solo negli anni a cavallo del 1980 è cominciato in Calabria, come nel resto dell'Italia, lo sviluppo delle osservazioni sismiche strumentali moderne, con l'installazione di reti "regionali" e con lo straordinario potenziamento della Rete Sismica Centralizzata dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

In questo lavoro, vengono esposti e discussi i risultati preliminari di una ricerca ancora in corso sulla microsismicità registrata nel periodo 1988-2005 nel settore centro-meridionale della Calabria, contenente l'area più direttamente interessata dal terremoto del

1905. L'obiettivo che si intende raggiungere in questo modo è duplice. Oltre ovviamente a fornire una serie di informazioni sull'area che è oggetto dell'intero volume, dall'altro si vuol dare anche al lettore non in possesso di competenze specialistiche un'idea di alcune delle attività di ricerca che si possono svolgere in sismologia, delle difficoltà che si incontrano e dei risultati che si possono raggiungere.

Lo studio rientra in una collaborazione più ampia che gli autori, non a caso operanti in due Università localizzate sull'Arco Calabro-Peloritano, hanno iniziato da qualche anno per contribuire al miglioramento della conoscenza del territorio sul quale operano. Dopo la messa a punto di strumenti di base, come un attendibile modello di velocità, cui si accennerà tra poco, il programma a lunga scadenza che ci si è posti sulla base delle considerazioni precedenti, prevede l'analisi della sismicità strumentale, anche di basso livello energetico, dei diversi domini in cui Calabria e Sicilia Orientale possono essere suddivise.

Se da una parte è vero che non sempre le analisi della sismicità avvenuta nell'arco di pochi decenni consentono il riconoscimento e la caratterizzazione delle strutture a maggiore potenziale sismogenetico presenti in una regione, dall'altra sono frequenti i casi che testimoniano il contrario. Anche con riferimento ai casi più sfavorevoli nei quali la microsismicità o sismicità di fondo non ha direttamente "rivelato" le strutture sismogenetiche più importanti, le analisi hanno comunque fornito elementi utili alla definizione della conformazione dell'apparato sismogenetico e dei relativi meccanismi di funzionamento nella regione investigata, contribuendo in modo determinante alla valutazione del potenziale sismogenetico della regione stessa. L'analisi *full range* (ovvero comprensiva dei terremoti di magnitudo medio-bassa) della sismicità strumentale si pone come uno dei principali strumenti di indagine per valutare l'attitudine

di una regione ai forti terremoti, e ciò vale in modo particolare per le aree (come quella qui in esame) nelle quali le informazioni alternative (ad es. geologiche o geodetiche) sono spesso per vari motivi (ad es. la presenza del mare) carenti e difficilmente ottenibili.

Lo studio qui proposto è incentrato sull'analisi della distribuzione spaziale e dei meccanismi focali dei terremoti nell'area d'interesse nel periodo prescelto¹. La localizzazione dei terremoti (determinazione di latitudine, longitudine, profondità dell'ipocentro e tempo origine) è stata effettuata utilizzando il metodo SIMUL (Evans et al., 1994), basato sull'impiego dei tempi di arrivo delle onde P (longitudinali) ed S (trasversali) registrate sui sismogrammi, ed un modello numerico della distribuzione nelle tre dimensioni delle loro velocità, che saranno indicate rispettivamente con V_p e V_s ². Tale modello rappresenta una semplificazione schematica della distribuzione spaziale delle velocità V_p e V_s nella crosta e nel mantello superiore, cioè negli strati più esterni della Terra, della regione in esame.

Per il calcolo del meccanismo focale dei terremoti (insieme dei parametri che definiscono l'orientazione ed inclinazione del piano di frattura sul quale si è prodotto il terremoto nonché direzione e verso della dislocazione verificatasi) è stato utilizzato il metodo FPFIT (Reasenber e Oppenheimer, 1985) basato sul solo impiego della polarità dei primi impulsi P, cioè del verso del primo spostamento dei sismogrammi nelle diverse stazioni sismografiche. Per una stima

¹ L'appendice II a questo capitolo illustra il significato di questa espressione e le modalità della loro interpretazione.

² È opportuno ricordare che le velocità delle onde sismiche (come quella delle onde sonore) dipendono dal materiale in cui esse si propagano, per cui a materiali diversi corrispondono velocità diverse: è a causa di questa correlazione che lo studio dei terremoti, naturali o artificiali, costituisce il più potente mezzo d'indagine sulla struttura interna della Terra.

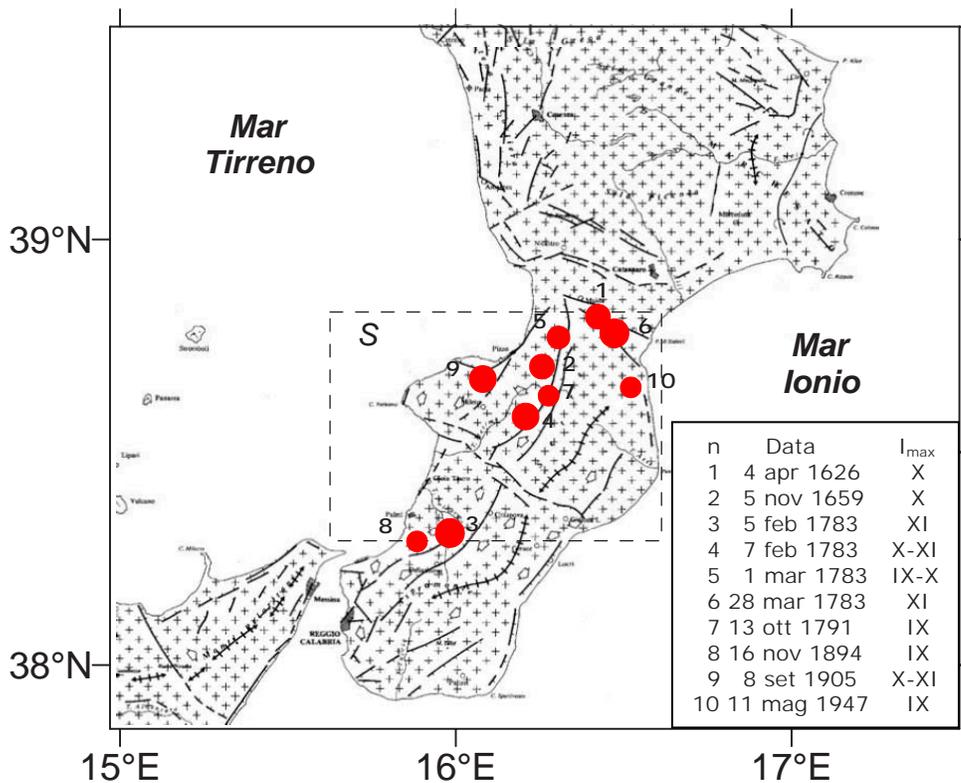


Fig. 1 - Carta neo-tettonica della Calabria (da Ciaranfi et al., 1983, modificata). Ai lineamenti geologici caratterizzati da attività recente, è stato sovrapposto il riquadro tratteggiato che delimita il settore d'indagine del presente lavoro (indicato dalla lettera S), all'interno del quale probabilmente si colloca la sorgente del terremoto del 1905. Sono anche aggiunti gli epicentri dei terremoti storici con intensità massima maggiore o uguale al grado IX della Scala Mercalli-Cancani-Sieberg, elencati nel riquadro in basso a sinistra.

attendibile del meccanismo focale è auspicabile disporre di almeno dieci polarità. Questa condizione non è generalmente soddisfatta dai dati relativi al settore d'indagine, specie per i primi anni dell'arco temporale preso in considerazione: il numero delle stazioni che registrano un terremoto dipende dalla sua energia e dalla densità di stazioni. Per ovviare a questa difficoltà, abbiamo quindi proceduto al calcolo di *meccanismi focali composti*, considerando come dovuti ad un unico evento sismico i dati forniti da più eventi raggruppati sia nello spazio che nel tempo tanto densamente da poter essere ragionevolmente attribuiti ad una distribuzione degli sforzi rimasta praticamente immutata nel corso del rilascio di energia, malgrado il suo prolungarsi nel tempo.

Elaborazioni e risultati

In fig. 1 il riquadro indicato con la lettera S delimita l'area studiata nel presente lavoro. Come si vede dall'elenco riportato nella stessa figura, i cataloghi sismici come per esempio il Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (Gruppo di Lavoro CPTI, 2004) riportano per tale area ben dieci terremoti verificatisi in tempi storici con intensità dal grado IX in su della Scala Mercalli – Cancani – Sieberg: dal punto di vista del rischio sismico si tratta di una situazione certamente tra le più delicate di tutto il bacino del Mediterraneo.

La principale caratteristica geologica che contraddistingue tutto l'Arco Calabro, e di conseguenza anche il settore S, è il susseguirsi di strutture di faglia con meccanismo normale, cioè caratterizzate da spostamenti con componente

prevalente verticale in un campo di sforzi distensivo. Le espressioni superficiali di tali strutture includono scarpate di faglia che definiscono i fronti attuali dei più importanti sistemi montuosi della regione. Nel settore S la struttura normale denominata *Faglia delle Serre* separa il bacino del F. Mesima dalla catena montuosa delle Serre. Più ad ovest, la faglia di Capo Vaticano si colloca tra i segmenti di faglie normali osservati in prossimità della costa tirrenica (Monaco e Tortorici, 2000).

La distribuzione della sismicità dell'area di interesse nel periodo indicato è riportata nella fig. 2. I dati rappresentati sono il risultato delle elaborazioni eseguite recentemente da Barberi et al. (2004) per definire con la tecnica della tomografia il modello numerico della distribuzione delle velocità sismiche nell'area dell'Arco Calabro-

Peloritano. I risultati di questo studio, effettuato nell'ambito della collaborazione tra le Università della Calabria e di Messina, sono riassunti in fig. 3. Qui sono riportate le sezioni, a differenti livelli di profondità, dei modelli di velocità V_p e V_p/V_s per la cui definizione sono stati raccolti, rivisti ed elaborati i tempi d'arrivo alle stazioni sismiche riportate in fig. 3a delle onde longitudinali e trasversali generate da oltre 12500 terremoti registrati a partire dal 1978 nell'area dell'Arco Calabro-Peloritano e dei mari adiacenti. In fig. 3b, in basso a destra, è riportata la griglia in cui è stato campionato il volume indagato per la stima della velocità nei vari blocchi.

Nell'Appendice I a questo capitolo sono elencate le scosse che nello stesso periodo di tempo hanno avuto energia sufficiente per essere avvertite dalla popolazione calabrese a partire dal 1° gennaio 1990 fino al 31 dicembre 2005.

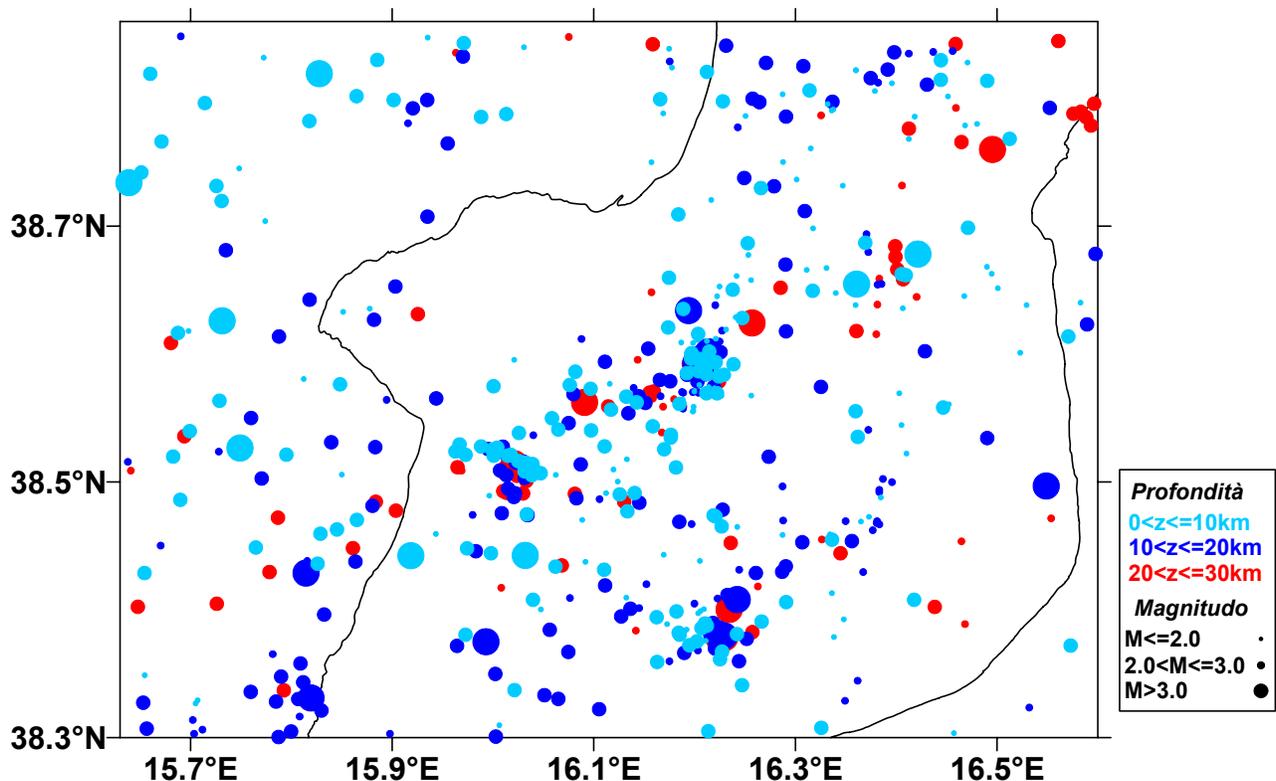


Fig. 2 - Sismicità della Calabria centro-meridionale nel periodo 1988-2005. Sono riportati gli epicentri dei terremoti profondi fino a 30 km. Dimensioni e colori dei simboli indicano la magnitudo e la profondità secondo la legenda a destra. Localizzazioni calcolate con i dati dell'archivio messo a punto da Barberi et al. (2004) e, per il periodo 2001-2005, da quello del Laboratorio di Geofisica e Sismologia dell'Università della Calabria.

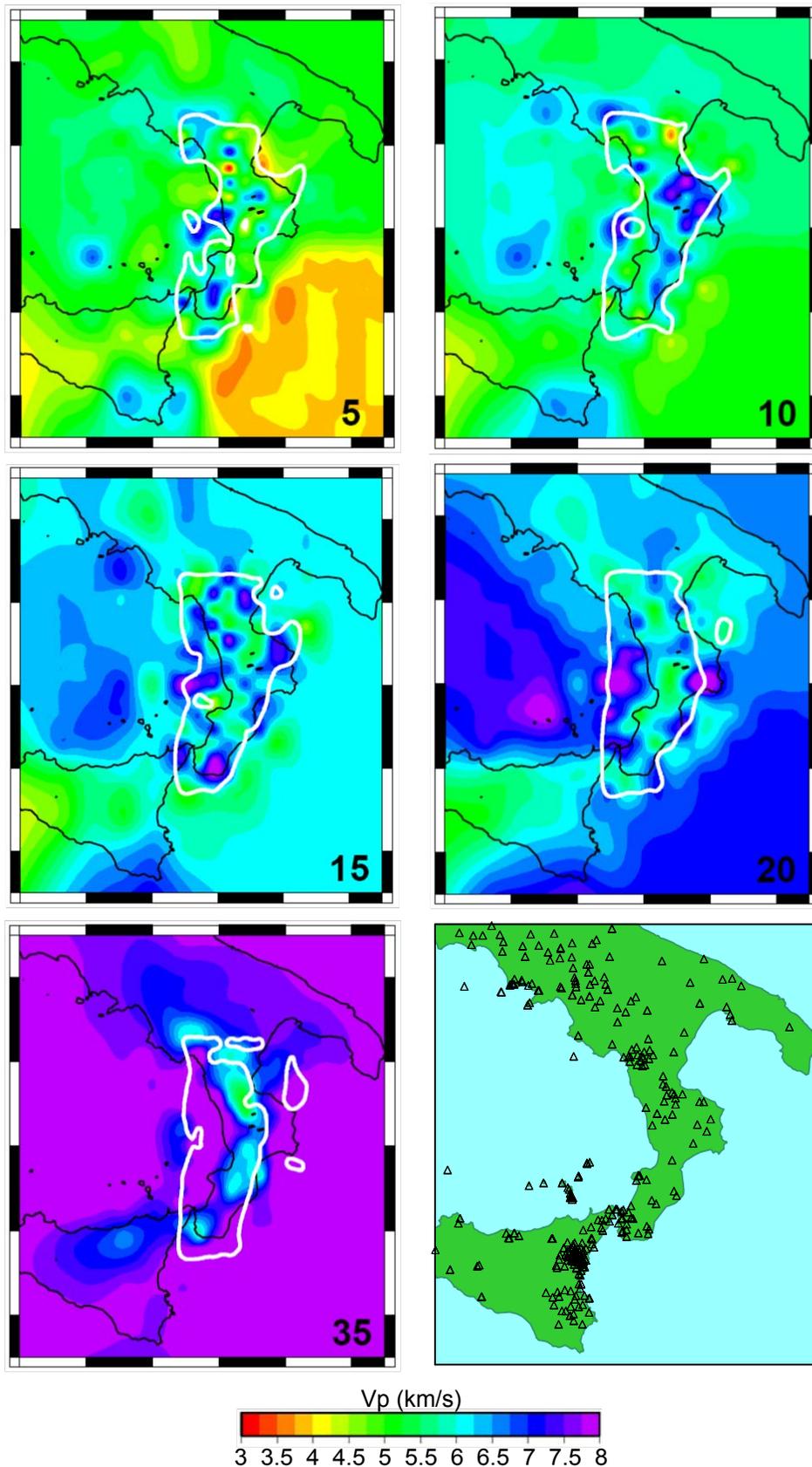


Fig. 3a - Risultati della tomografia sismica delle onde P riportati per i livelli di profondità a 5, 10, 15, 20 e 35 km. La linea bianca racchiude le aree di buona risoluzione. In basso a destra è riportata la mappa delle stazioni sismiche funzionanti nel periodo 1978-2005.

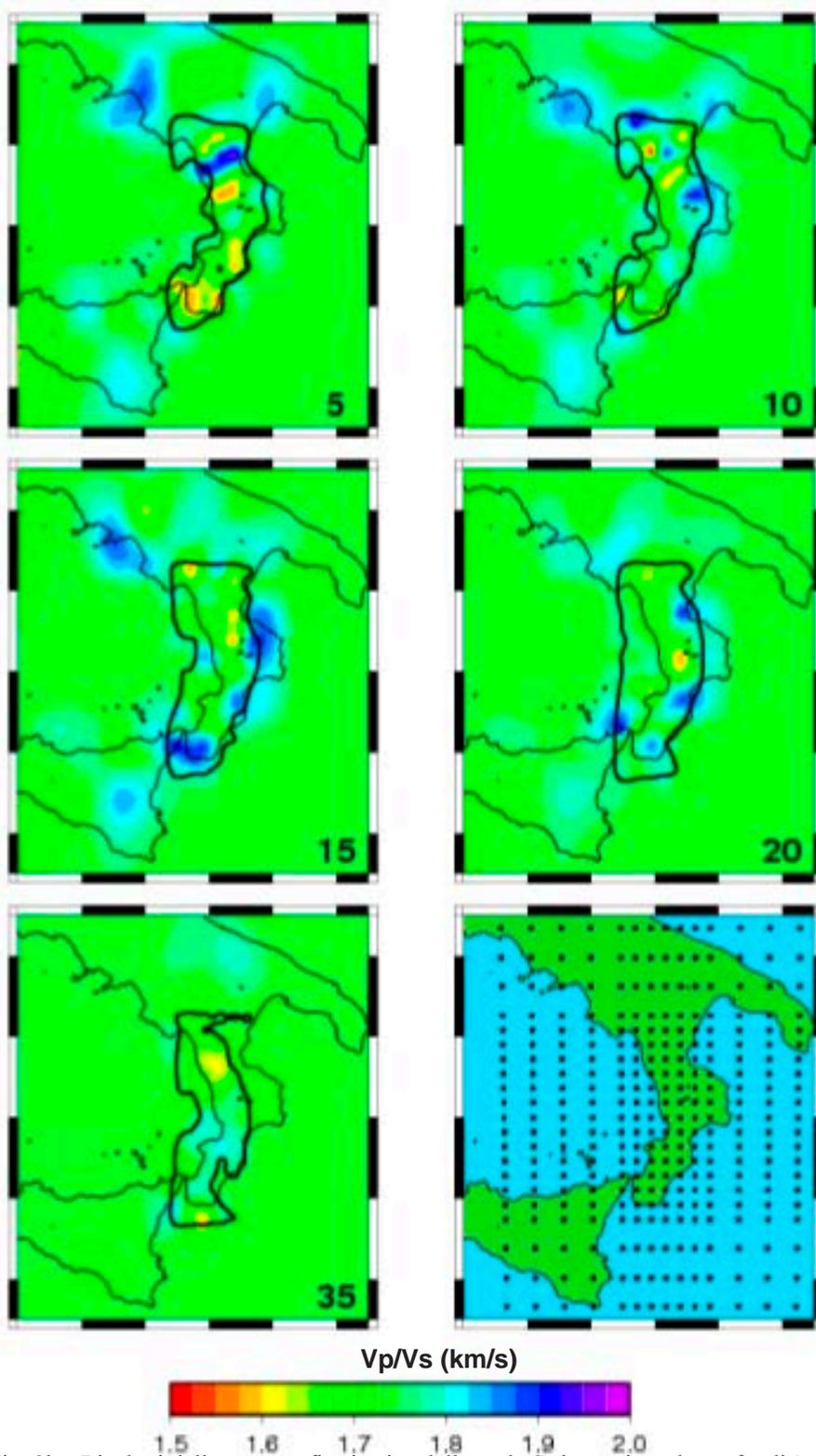


Fig. 3b - Risultati della tomografia sismica delle onde S riportati per le profondità di 5, 10, 15, 20 e 35 km. La linea nera racchiude le aree di buona risoluzione. In basso a destra sono riportate le posizioni orizzontali dei nodi della griglia tridimensionale per i quali sono stati determinati i valori di V_p e del rapporto V_p/V_s .

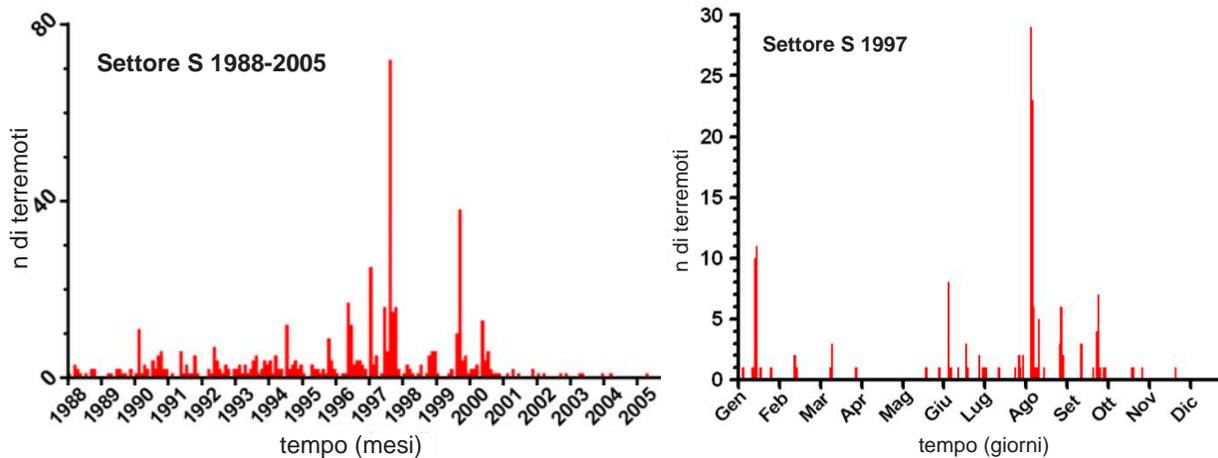


Fig. 4 - a) istogramma della frequenza mensile degli eventi sismici verificatisi nel settore S nel periodo gennaio 1988 - aprile 2005; b) istogramma della frequenza giornaliera nel corso del 1997.

In questo caso, le informazioni derivano dall'archivio creato presso il Laboratorio di Geofisica e Sismologia dell'Università della Calabria.

In fig. 4a è riportato in termini di numero di scosse per mese l'andamento temporale degli eventi sismici nel periodo gennaio 1988-aprile 2005. Da questo grafico risulta evidente l'irregolarità che caratterizza

a tutte le scale l'attività sismica, che, nei periodi di calma, presenta pause ed accelerazioni che si susseguono in modo del tutto imprevedibile. Nel caso specifico è evidente come la fase di attività più consistente (con riferimento al numero delle scosse registrate) si sia sviluppata nel corso del 1997. In tale anno (fig. 4b) si sono susseguite oltre 160 scosse, concentrate in

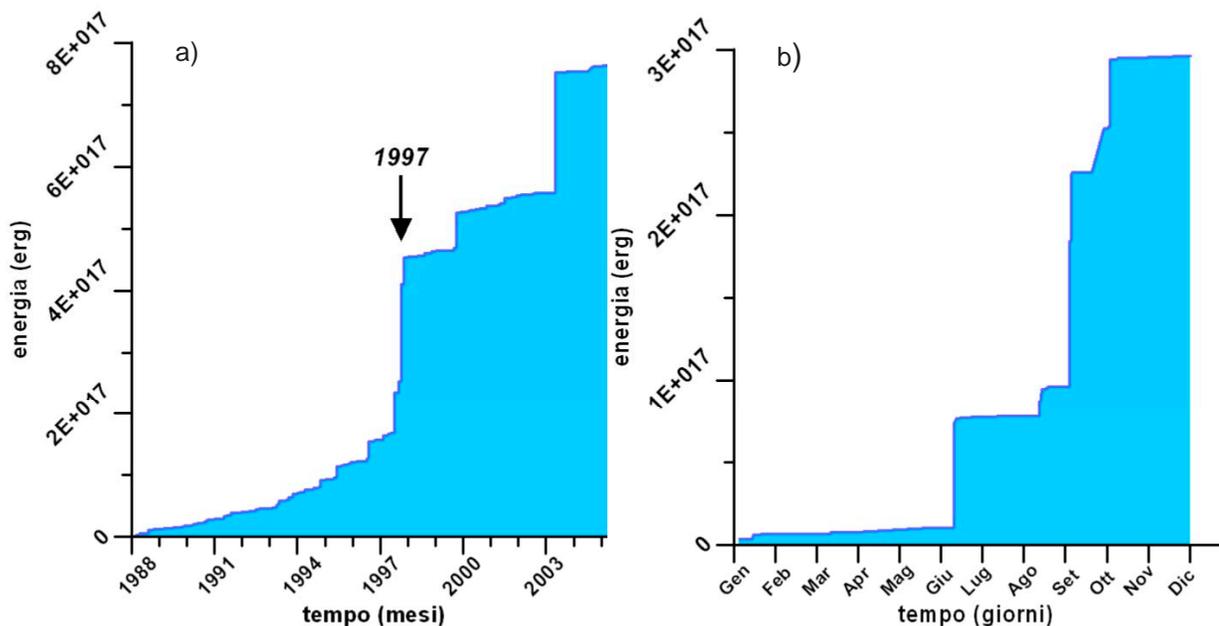


Fig. 5 – Energia sismica cumulativa rilasciata a) a partire dal 1° gennaio 1988; b) nel 1997.

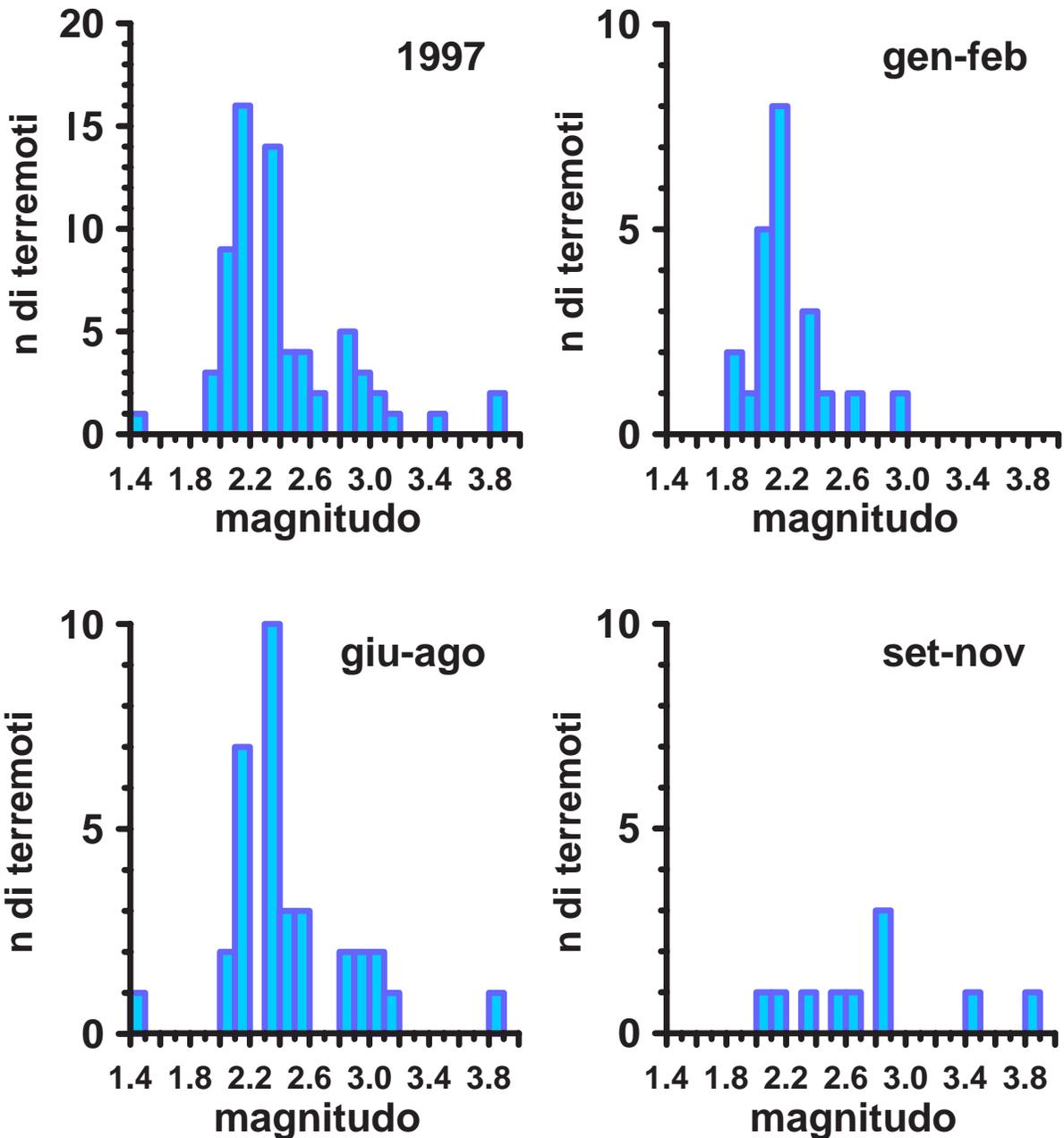


Fig. 6 - Distribuzione degli eventi del settore S per classi di magnitudo per l'intero anno 1997 e per tre distinti periodi.

particolare in periodi piuttosto ristretti nei mesi di gennaio, giugno-agosto, settembre-novembre.

In fig. 5 il tasso di sismicità nei due stessi periodi è rappresentato in termini di rilascio cumulativo di energia sismica. In questo caso il livello del grafico ad un

determinato istante rappresenta la somma di tutta l'energia rilasciata fino a quel momento rispettivamente dal 1° gennaio 1988 e dal 1° gennaio 1997 per le due sezioni della figura.

Entrambi i grafici si presentano in questo caso meno accidentati di quelli corrispondenti della fig. 4. La differenza deriva dal fatto che l'energia rilasciata da un

terremoto dipende in maniera esponenziale dalla magnitudo: un numero limitato di scosse di magnitudo anche leggermente più elevata contribuisce alla liberazione di energia in misura molto più significativa di scosse più numerose ma più lievi. In questo senso è significativo il salto che il grafico in fig. 5a presenta in corrispondenza nel primo semestre del 2003 e che è sostanzialmente dovuto ad un unico terremoto di magnitudo 4.1 verificatosi il 4 aprile.

Nello stesso senso è significativa anche la fig. 6, in cui è rappresentata la distribuzione

in frequenza della magnitudo nel corso del 1997, sia per l'intero anno che i diversi raggruppamenti temporali cui si è accennato. È evidente che in tutti i casi, malgrado l'elevato numero di scosse, l'attività sismica è stata caratterizzata da rilasci energetici alquanto modesti, essendo stata registrata una magnitudo massima di 3.8.

Dalla distribuzione degli epicentri relativi all'intero catalogo disponibile si sono potuti escludere altri addensamenti significativi nella zona in esame. Pertanto,

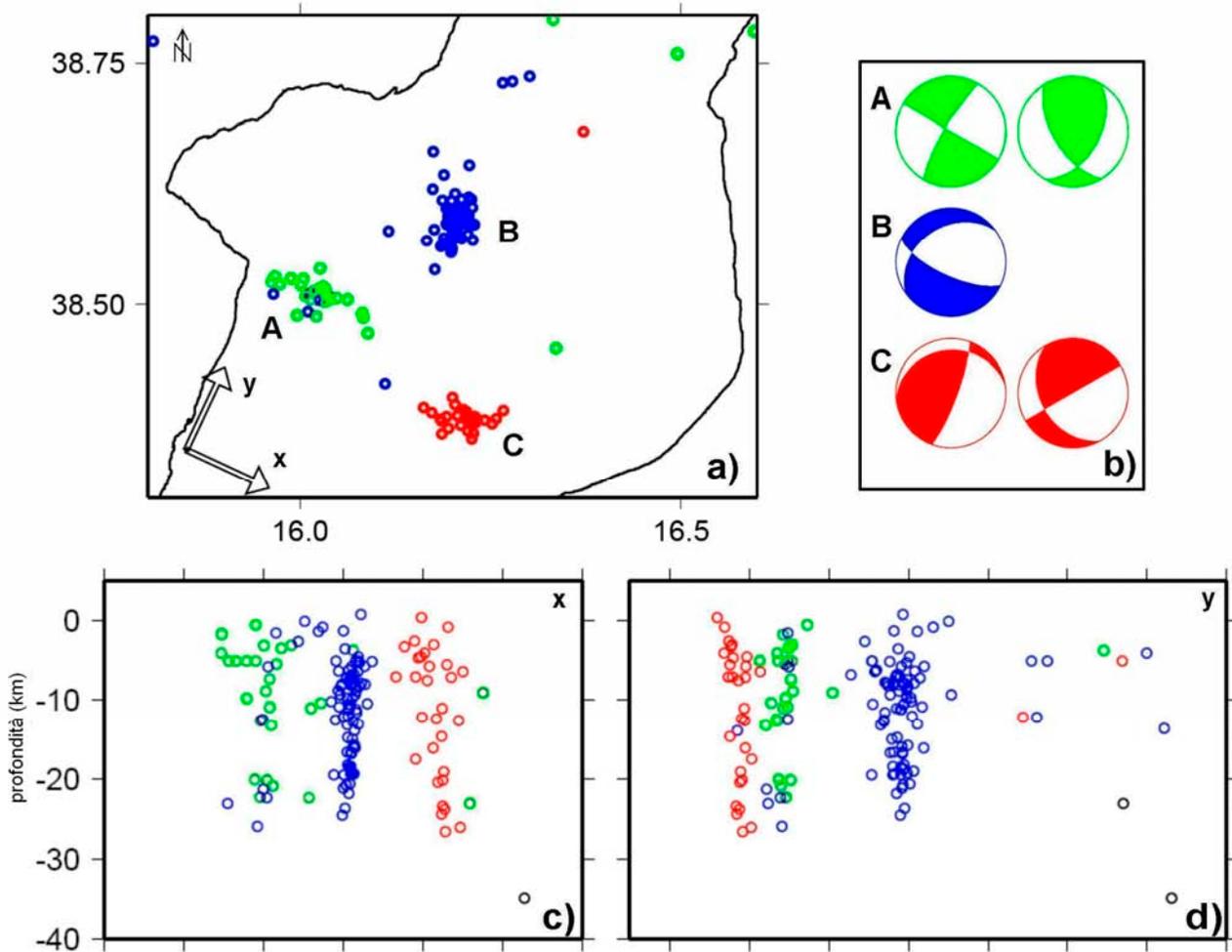


Fig. 7 - a) Mappa degli epicentri degli eventi localizzati nel settore S durante il 1997; b) meccanismi focali composti calcolati per i tre sciami (i quadranti colorati indicano compressione, quelli bianchi dilatazione). Per gli sciami A e C sono state ottenute due soluzioni compatibili con la distribuzione delle polarità. c e d) sezioni verticali degli sciami orientate come indicato dagli assi x ed y riportati in a).

sulla base delle analisi sin qui esposte, tenendo conto che per l'identificazione delle strutture sismogenetiche non affioranti in superficie è necessario disporre del maggior numero possibile di sorgenti sismiche che

possano servire a tracciarne l'andamento spaziale, si è concentrata l'attenzione sull'attività sismica del 1997.

La fig. 7 propone il dettaglio della distribuzione spaziale dell'attività sismica nel

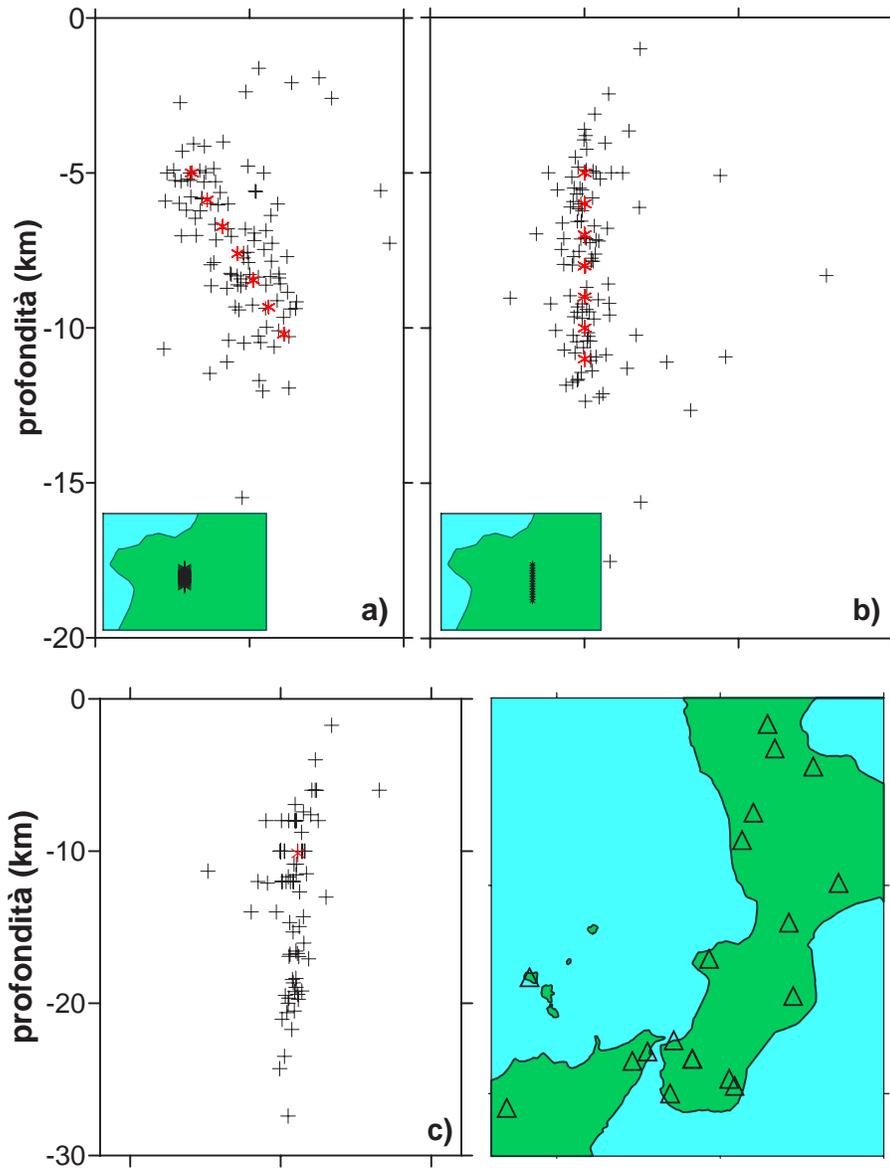


Fig. 8 - Test di verifica della qualità delle localizzazioni ipocentrali. In a) e b) gli asterischi rossi rappresentano in sezione verticale delle ipotetiche sorgenti sismiche distribuite su due piani inclinati rispettivamente di 60° e 90° che intersecano la superficie terrestre secondo le linee indicate nei riquadri in basso a sinistra; le crocette nere indicano le loro posizioni calcolate utilizzando i tempi di arrivo teorici ad una serie di stazioni sismiche (triangoli in d), perturbati casualmente per simulare gli errori sperimentali. In c) sono disegnate, sempre in sezione verticale, gli ipocentri localizzati fissando per tutte le scosse la stessa posizione ipocentrale di partenza (coincidente con il baricentro dello sciame).

1997 nel settore S. La mappa epicentrale evidenzia tre addensamenti principali, indicati con le lettere A, B e C, rispettivamente. La lettera A si riferisce ad un *cluster* (cioè addensamento) di eventi registrati per lo più nel mese di gennaio (giorni 13 e 14). Tale cluster presenta in superficie un andamento approssimativamente WNW-ESE, mentre le sezioni verticali (figg. 7c e 7d) mostrano che in profondità gli ipocentri si dispongono su un piano quasi verticale. Analoga distribuzione spaziale, ma spostata verso ESE lungo la linea Nicotera – Gioiosa Ionica, è riscontrabile per l'addensamento C, corrispondenti a due distinte fasi temporali di attività sismica, sviluppatasi essenzialmente nei periodi 3-5 settembre e 1-3 ottobre. Anche l'energia relativa alla sismicità indicata con la lettera B è stata rilasciata in due distinti periodi (9-11 giugno e 11-13 agosto); nello spazio, si evidenziano in orizzontale un allineamento degli epicentri ben definito e perpendicolare ai precedenti, seguendo la direzione NNE-SSW, (fig. 7a) e, in verticale (fig. 7c), anche in questo caso una notevole inclinazione del piano contenente gli ipocentri.

La quasi verticalità delle strutture geologiche delineate dalla distribuzione spaziale degli ipocentri risulta, nel contesto geologico della penisola italiana, abbastanza eccezionale. Questo ha indotto a verificare che i risultati ottenuti, inaspettati e addirittura sorprendenti per questo aspetto, non siano un effetto della distribuzione geometrica delle stazioni sismiche o dei parametri utilizzati nell'algoritmo di calcolo.

L'accuratezza e stabilità delle localizzazioni ottenute è stata perciò sottoposta a diverse verifiche (fig. 8), utilizzando quello che può essere definito "metodo degli ipocentri sintetici". Tale metodo consiste a) nell'ipotizzare l'attivazione di un ipocentro in un particolare punto e ad un particolare istante di tempo; b) nel calcolare i tempi di arrivo delle onde sismiche da esso generato alle diverse stazioni sismiche; c) nell'applicare ai risultati

ottenuti una perturbazione statistica per simulare gli errori di osservazione sperimentali; d) nel calcolare la posizione dell'ipocentro utilizzando tali tempi "sintetici".

La differenza tra le coordinate spazio-temporali ipotizzate in partenza e quelle calcolate rappresenta un ottimo indice dell'efficacia di una rete sismica e della qualità delle localizzazioni. Tale efficacia dipende da diversi fattori, tra i quali figurano non solo la densità dei punti di osservazione, ma anche altri sui quali, allo stato, è molto difficile intervenire, come la loro distribuzione spaziale e la posizione rispetto alle sorgenti sismiche. Sotto questo aspetto la conformazione geografica della penisola italiana, e della Calabria in particolare, rende la situazione piuttosto complessa.

Nelle figg. 8a e 8b sono mostrati i risultati della verifica eseguita. È stata ipotizzata una serie di ipocentri sintetici (indicati con asterischi rossi) disposti su due piani inclinati rispettivamente di 60° e 90° . Le localizzazioni calcolate, indicate con crocette nella stessa fig. 8, riproducono la distribuzione di partenza e delineano la stessa "struttura geologica attiva", sia pure con una certa dispersione derivante dagli errori sperimentali introdotti. Il test dimostra quindi che la geometria della rete sismica (fig. 8d) è tale da non distorcere la distribuzione delle sorgenti sismiche in profondità.

In fig. 8c sono riportate le localizzazioni degli eventi calcolate facendo iniziare la ricerca di ciascuno degli ipocentri dalla stessa posizione iniziale, coincidente con il baricentro dello sciame³. Il confronto con la fig. 8b induce ad attribuire esito positivo

³ Gli algoritmi utilizzati dalla quasi totalità dei programmi di calcolo per la localizzazione degli ipocentri apportano progressive correzioni a soluzioni via via meglio approssimate, fino a trovare le coordinate che meglio si adattano ai dati disponibili: in alcuni casi il risultato finale dipende dal punto dal quale la ricerca ha inizio, perdendo quindi in attendibilità.

anche a questo tipo di verifica, in quanto si può constatare la coincidenza dei risultati.

La quasi verticalità delle strutture attivatesi rappresenta quindi una caratteristica reale delle sequenze sismiche che si stanno studiando.

Tornando allo studio della sismicità registrata nel 1997, la fig. 7b riporta anche i meccanismi focali composti per le tre sequenze. A questo proposito si deve innanzi tutto chiarire che le elaborazioni hanno portato per le fasi di attività A e C a risultati ambigui, dato che esistono due modelli dei fenomeni alla sorgente che si adattano ai dati sperimentali con attendibilità all'incirca equivalente. In situazioni di questo tipo, tutt'altro che rare, nella fase di interpretazione dei risultati è necessario tener conto di tutte le possibili diverse combinazioni delle soluzioni ottenute. Nel caso specifico tuttavia, i meccanismi calcolati risultano tutti compatibili con una cinematica prevalentemente trascorrente, cioè con uno spostamento relativo orizzontale o quasi. In entrambi i casi uno dei piani nodali è in accordo con gli allineamenti degli epicentri ad orientazione WNW-ESE, coincidente con quella prevalente delle strutture geologiche locali. Nel caso della fase B si osserva un meccanismo transtensivo, cioè intermedio tra una distensione ed uno scorrimento laterale, con uno dei due possibili piani di scorrimento (NE-SW) leggermente ruotato rispetto all'allineamento degli epicentri.

I risultati presentano requisiti di buona qualità relativamente alla stima dei meccanismi focali ma sono in corso ulteriori verifiche delle polarità dei primi impulsi della fase P per le stazioni sismiche i cui dati non derivano da letture dei sismogrammi effettuate direttamente dagli autori, ma sono stati reperiti sui bollettini e cataloghi delle varie reti sismiche, locali e nazionale. Solitamente infatti, le istituzioni che eseguono osservazioni sismografiche rendono

disponibili alla collettività scientifica i risultati di queste attività mediante la pubblicazione periodica di appositi bollettini: si tratta di un lavoro di *routine* nel corso del quale non è difficile incorrere in errori ed imprecisioni, per cui risulta opportuno che il materiale informativo che serve effettivamente in uno studio di dettaglio venga rivisto direttamente dai ricercatori che li utilizzano.

La fig. 9 mostra i meccanismi focali composti ottenuti per ciascuna delle fasi temporali che è possibile distinguere all'interno dei tre diversi sciame del 1997 (cfr. fig. 2). Come si può osservare, restano sostanzialmente confermate le principali indicazioni fornite dai meccanismi più complessivi di fig. 7b. Entrambe le fasi 9-11 giugno e 11-17 agosto del *cluster* B mostrano meccanismi transtensivi con un piano nodale comunque prossimo all'allineamento NNE-SSW degli epicentri. La fase 3-5 settembre del *cluster* C mostra una trascorrenza simile al meccanismo composto complessivo del *cluster* (fig. 7b) su un piano nodale a bassa inclinazione orientato in accordo con l'allineamento epicentrale WNW-ESE del *cluster*. Lo stesso piano nodale continua ad essere presente nel meccanismo della fase 1-3 ottobre dello stesso *cluster* C, ancora con cinematica trascorrente, ma in questo caso la trascorrenza è invertita. Ciò potrebbe essere spiegato ipotizzando che la fase 1-3 ottobre sia scaturita da un processo di riassetamento "all'indietro" successivo alla dislocazione del 3-5 settembre.

Interpretazione dei risultati

È infine rappresentato in fig. 10 uno schema riassuntivo dei processi cinematici deducibili dai risultati delle analisi sin qui descritte, rappresentati nelle figg. 7 e 9. Il modello qui proposto ha carattere preliminare,

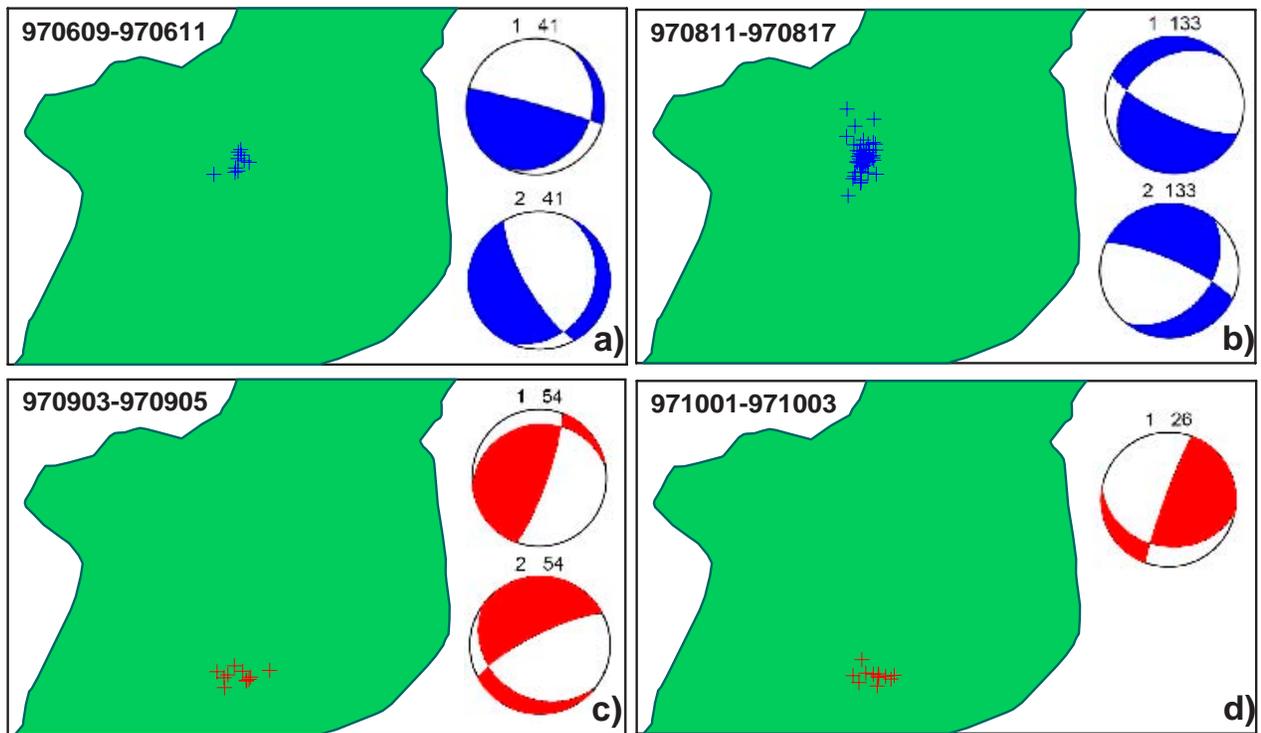


Fig. 9 - Analisi di dettaglio della sismicità del 1997. In ciascun riquadro, a sinistra sono rappresentate le localizzazioni epicentrali degli eventi per i quali sono stati calcolati i meccanismi composti riportati a destra. Le figg. 9a e 9b si riferiscono alle due diverse fasi temporali della sequenza B di fig. 7, le 9c e 9d a quelle della sequenza C. Non è stato possibile calcolare meccanismi composti per il periodo gennaio-febbraio a causa del basso numero di polarità disponibili. I numeri in alto a sinistra di ciascun riquadro indicano le date di inizio e fine dei periodi di tempo nella forma anno, mese, giorno.

da sottoporre - come già osservato - a verifiche ed analisi di maggiore dettaglio dei meccanismi focali. Esso tuttavia è già sufficientemente affidabile per costituire un'utile e solida base di riflessione e confronto tra i componenti della comunità scientifica impegnati nell'interpretazione della sismicità dell'Arco Calabro Peloritano e nella comprensione dei processi geodinamici che determinano le manifestazioni sismiche in questa regione.

1. Anche sulla base del contesto geodinamico attuale, è possibile ipotizzare che durante il periodo precedente l'anno 1997 la parte meridionale del settore S (quello a sud della linea Nicotera-Gioiosa Ionica) sia interessata dall'azione di una spinta trascorrente sinistra (freccie gialle). Conseguenza della spinta è una

deformazione della crosta, come indicato dalla distorsione delle linee nere sottili. All'inizio del 1997 la deformazione supera il punto di rottura della crosta ed inizia la fratturazione.

2. Con i terremoti del periodo gennaio-febbraio (la cui posizione è schematicamente indicata in verde) ed il rilascio di deformazione crostale ad essi associato, il sistema si riporta in una nuova posizione di equilibrio (assenza di deformazione, come indicato dalle linee nere sottili, ora spezzate in due tratti rettilinei). Lo spostamento relativo verso ovest del blocco a nord della Nicotera-Gioiosa Ionica, indicato dalla freccia verde, coerente con il meccanismo focale composto calcolato, interessa anche la

porzione meridionale (freccette verdi) della
faglia normale delle Serre.

3. Per gli sciami del periodo giugno-agosto,

il calcolo del meccanismo composto
fornisce due possibili soluzioni (figg. 9a e
9b), sostanzialmente identiche per quanto

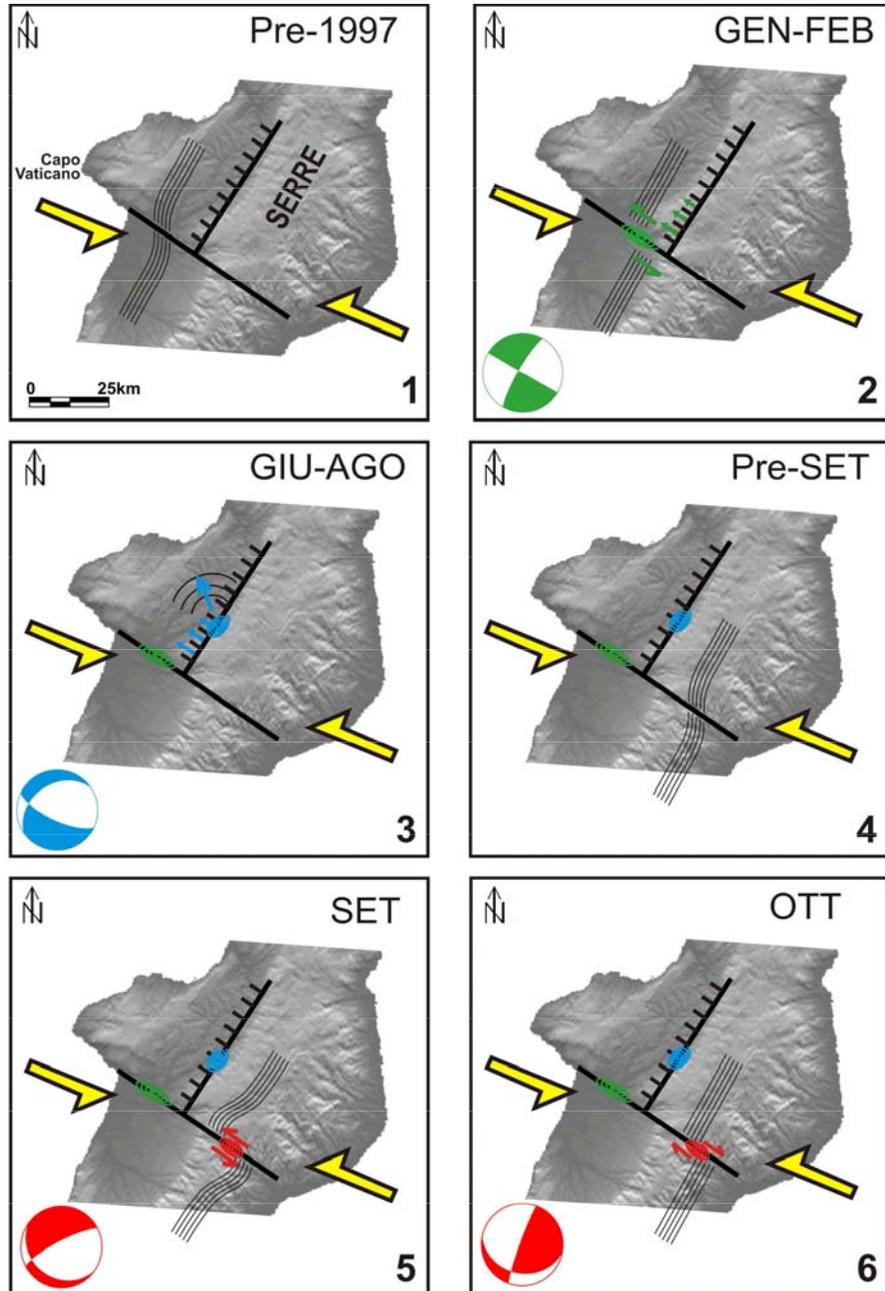


Fig.10 - Schema riassuntivo dei processi cinematici deducibili dai risultati dell'indagine effettuata nel settore S. 1 - frecce gialle: componente trascorrente degli sforzi tettonici; linea nera spessa: struttura trascorrente; linea nera spessa dentellata: struttura con movimenti prevalentemente verticali; linee nere sottili: andamento delle deformazioni del suolo; 2 - frecce verdi grandi: verso della dislocazione sismica; frecce verdi piccole: spostamenti conseguenti l'attività sismica; spirale verde: sede di attività sismica in atto; 3 - spirale verde: sede di sismicità pregressa; spirale azzurra: sede di sismicità in atto; freccia azzurra: verso della dislocazione sismica; 4, 5, 6 - spirali verde e azzurro: sede di sismicità pregressa; frecce rosse: verso della dislocazione sismica; spirale rossa: sede di sismicità in atto.

riguarda l'azimuth dei piani nodali. Dal punto di vista grafico appaiono invece notevoli le differenze tra le loro immersioni, cioè tra le direzioni verso le quali i piani si abbassano, che addirittura arrivano a risultare opposte (fig. 9b). In realtà, valutati i parametri numerici che caratterizzano le soluzioni in termini di incertezza dei valori più probabili delle incognite calcolate, esse sono ben compatibili, trattandosi di soluzioni entrambe non eccellenti dal punto di vista quantitativo. In termini di spostamento all'ipocentro, entrambe indicano un moto intermedio tra una faglia normale ed una trascorrente (meccanismo transtensivo). Sembra ragionevole assumere come piano di frattura quello NNE-SSO, che coincide con l'orientamento prevalente dei lineamenti tettonici dell'area. Il vettore spostamento risulta allora quasi orizzontale, comportando uno spostamento verso nord del lembo occidentale della faglia. Questo spostamento può essere visto come una conseguenza della fase sismica precedente, in cui si può ragionevolmente immaginare che il settore di crosta coincidente con la Piana di Gioia Tauro abbia agito come un cuneo, spingendo verso nord il blocco del Promontorio di M. Poro.

4. In conseguenza della dislocazione della fase 3 e della perdurante spinta trascorrente sinistra si inizia a deformare la parte a SE del settore S lungo la Nicotera - Gioiosa e
5.a settembre ha inizio una nuova fase di fratturazione con conseguente movimento quasi orizzontale, come indicato dal meccanismo focale e dalle frecce rosse.
6. Lungo il tratto sud-orientale della Nicotera - Gioiosa la sismicità continua nel mese di ottobre con caratteristiche opposte rispetto al punto precedente: i terremoti sono meno energetici e dal meccanismo focale e, conseguentemente, dalle frecce rosse si evidenzia un movimento invertito seppur

su un piano di faglia simile. Questa fase può essere dovuta ad una forma di parziale recupero (rimbalzo) dello spostamento della fase 5 e con essa si perviene ad un periodo di equilibrio relativamente stabile, per cui l'attività sismica torna ai livelli pre-1997.

Considerazioni geodinamiche

È il caso di ricordare brevemente che molteplici dati geologici e geofisici di varia natura nell'intera regione sud-tirrenica possono essere interpretati nel quadro di un modello geodinamico nel quale si assume la coesistenza di un moto di convergenza NO-SE tra la placca africana e quella europea e l'arretramento verso SE, indotto da sforzi di tipo gravitativo, di una porzione di litosfera ionica (*slab*) tuttora in fase di subduzione sotto quella tirrenica (vedi ad es., Malinverno e Ryan, 1986; Faccenna et al., 1996, Guerra et al., 2006). L'assetto geodinamico legato a questi processi ha provocato lo spostamento verso SE dell'Arco Calabro, perdurante tuttora. Conseguenza dell'arretramento, che avviene con velocità differenziata tra diversi settori dell'arco, è la sua segmentazione, almeno a livello crostale. I diversi settori sono a contatto lungo sistemi di faglie trasversali all'asse della struttura che costituiscono i principali svincoli cinematici che ne consentono la migrazione differenziata. Tra queste linee di scorrimento, lungo le quali si hanno movimenti prevalentemente trascorrenti, figura nella parte centrale dell'arco la Linea di Catanzaro, (Guarnieri, 2005), che delimita a sud il massiccio della Sila separandolo dalla Piana di Lamezia (che, con termine geologico, viene detta *Graben di Catanzaro*).

Un'altra è la linea Nicotera-Gioiosa Ionica, alla quale su basi geologiche viene attribuito in letteratura un movimento

trascorrente (Moretti e Guerra, 1997): in questo caso, le osservazioni di campagna mostrano un'alternanza del verso del vettore spostamento (A. Moretti, comunicazione personale).

Il meccanismo esposto sopra per spiegare la sismicità del 1997 in Calabria centro-meridionale è quindi ben compatibile con il quadro geodinamico delineato. L'alternanza del verso dello spostamento lungo la Nicotera - Gioiosa Ionica può essere ascritto o a fasi di riaggiustamento come quella osservata nell'ottobre 1997 o, su tempi più lunghi, a variazione della velocità relativa del moto di migrazione dei diversi settori per cui lo stesso tratto si trova ad essere a volte più veloce e a volte più lento di quelli adiacenti.

Questioni aperte

Il lavoro esposto sembra fornire una buona conferma di come utili informazioni possano essere dedotte dall'analisi della microsismicità anche in una regione complessa come quella in esame.

Restano aperte ovviamente diverse questioni relative alla sismicità superficiale della Calabria alle quali non si è ancora in grado di dare delle risposte definitive.

1) Le distribuzioni degli ipocentri mostrano un'alta verticalità, tra l'altro osservata anche per sequenze verificatesi più a nord, nella zona del massiccio silano. Poiché appare improbabile che esse possano essere associate a strutture a *graben*, la cui geometria comporta in generale l'esistenza di faglie laterali inclinate e con immersione opposta, si devono ammettere ipotesi alternative. Ad esempio, la velocità eccezionalmente elevata rispetto agli standard geologici con cui la Calabria sta continuando ad emergere dai mari circostanti (Bordoni e Valensise, 1998), consente di ammettere la possibilità di fratture da inarcamento che si determinano

lungo l'asse dell'Arco in corrispondenza della zona di massimo sollevamento. È anche possibile ipotizzare che l'andamento quasi verticale di una faglia con componente normale rifletta peculiarità del suo meccanismo di formazione in relazione alle proprietà dei materiali coinvolti. Distribuzioni di ipocentri sub-verticali potrebbero anche essere associabili alla risalita dal mantello o dalla bassa di fluidi in grado di provocare effetti di "corrosione".

2) Un altro punto di non semplice interpretazione è l'elevata profondità degli strati sismogenetici (20-25 km), cioè degli intervalli di profondità nei quali in diverse zone si addensano le sorgenti sismiche: la profondità delle scosse di minore energia nei casi più frequenti si aggira sui 10 km. Vari autori (p. es. Ghisetti, 1984) indicano il livello 20 km quale profondità della transizione fragile-duttile in Calabria. Tale valore abbastanza elevato appare convincente, anche perché al di sotto della Calabria intorno ai 20-25 km di profondità si trova la superficie superiore della litosferica ionica che costituisce lo *slab* in subduzione. Quest'ultimo inciderebbe significativamente sull'andamento della temperatura, che certamente gioca un ruolo di grande importanza nel determinare il tipo di comportamento dei materiali. Non a caso si riscontrano al livello 35 km sotto la Calabria (fig. 3) valori di V_P bassi, attribuibili alla presenza di materiale in subduzione.

3) I meccanismi focali calcolati non sempre concordano con la distribuzione spaziale degli ipocentri, in particolare per quanto riguarda l'immersione delle strutture geologiche. Le ulteriori verifiche delle polarità dei primi impulsi che ci si propone di effettuare dovrebbero rendere possibile un'analisi conclusiva di maggior dettaglio. È comunque da ricordare che discrepanze tra i risultati del calcolo dei meccanismi focali di terremoti di bassa energia ed il

contesto geologico-strutturale sono molto frequenti, anche se si cerca di utilizzare metodi diversi per la loro determinazione. Il superamento di queste difficoltà è con ogni probabilità subordinato ad un ulteriore salto di qualità nel monitoraggio sismico ed alla ricerca e messa a punto di algoritmi rinnovati rispetto a quelli attualmente un uso.

Bibliografia

- Barberi G., Cosentino M. T., Gervasi A., Guerra I., Neri G. e Orecchio B., 2004: *Crustal seismic tomography in the Calabrian Arc region, south Italy* - Phys. Earth Planet. Int., 147, 297-314.
- Bordoni P. e Valensise G., 1998: *Deformation of the 125 ka marine terrace in Italy: tectonic implications*. In: Stewart I. e Vita-Finzi C. (eds): *Late Quaternary Coastal Tectonics*, Geol. Soc. Spec. Publ., 146, 71-110.
- Ciaranfi N., Ghisetti F., Guida M., Iaccarino G., Lambiase S., Pieri P., Rapisardi L., Ricchetti G., Torre M., Tortorici L. e Vezzani L., 1983: *Carta neotettonica dell'Italia Meridionale* - Publ. 515, Progetto Finalizzato Geodinamica, CNR, Roma.
- Gruppo di Lavoro CPTI, 2004: *CPTI - Catalogo Parametrico dei terremoti Italiani, Vers. 2004* - INGV, Bologna. <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI/>
- DISS, 2005: *Database of Individual Seismogenic Sources, Version 3.0.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas* - <http://www.ingv.it/banchedati/banche.html>.
- Evans J.R., Eberhart-Phillips D. e Thurber C.H., 1994: *User's manual for SIMULPS12 for imaging V_p and V_p/V_s : a derivative of the "Thurber" tomographic inversion SIMUL3 for local earthquakes and explosions* - USGS Open-file Report, 94-431.
- Faccenna C., Davy P., Brun J. P., Funicello R., Giardini D., Mattei M. e Nalpas T., 1996: *The dynamics of back-arc extension: an experimental approach to the opening of the Tyrrhenian Sea* - Geophys. J. Int. 126, 781-795.
- Ghisetti, F., 1984: *Recent deformations and the seismogenic source in the Messina Strait (southern Italy)* - Tectonophysics, 109, 191-208.
- GNDT (Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti), 1998: *NT4.1: catalogo parametrico di terremoti di area italiana al di sopra della soglia del danno* - www.emidius.mi.ingv.it/NT.
- Guarnieri P., 2005: *Plio-Quaternary segmentation of the south Tyrrhenian forearc basin* - Int. J. Earth Sci, DOI 10.1007/s00531-005-0005-2.
- Guerra I., Harabaglia P. e Moretti A., 2006: *La sismicità della Calabria nel contesto geodinamico del Mediterraneo* - questo volume.
- Malinverno A. e Ryan W. B. F., 1986: *Extension in the Tyrrhenian sea and shortening in the Apennines as result of Arc migration driven by sinking of the lithosphere* - Tectonics, 5, 227-245.
- Monaco C. e Tortorici L., 2000: *Active faulting in the Calabrian arc and eastern Sicily* - J. Geodyn., 29, 407-424.
- Moretti A. e Guerra I., 1997: *Tettonica dal Messiniano ad oggi in Calabria: implicazioni sulla geodinamica del sistema Tirreno-Arco Calabro* - Boll. Soc. Geol. It., 116, 125-142.
- Reasenberg P.A. e Oppenheimer D., 1985: *FPPIT, FPPLLOT AND FPPAGE: FORTRAN computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions* - U.S. Geol. Surv., Open-file Report 85-739.

Appendice I

Elenco delle scosse avvertite in Calabria tra il 1990 ed il 2005 secondo l'archivio del Laboratorio di Geofisica e Sismologia dell'Università della Calabria

Data aammgg	Orario UTC hhmm	Epicentro analitico Latitudine N - Longitudine E		Epicentro macrosismico	Intensità massima
900124	0351	39.13	16.74	Sersale	II-III
	0445	39.13	16.90	Santa Severina	V-VI
	1618	39.15	16.93	Sersale	IV-V
	1640	38.78	17.42	San Mauro Marchesato	III-IV
0208	1750	38.97	16.22	Gizzeria	II-III
0504	0657	38.87	15.89	Amantea	II
05	0721	40.68	15.84	Paupisi	VI-VII
0929	2139	38.40	16.15	Soveria Mannelli	III-IV
	2018	37.96	16.09	Brancaleone	III-IV
0330	0403	39.38	16.36	Luzzi	IV-V
0424	1322	39.28	16.71	Cerva	IV-V
0509	0857	39.45	16.58	Castesilano	V-VI
09	0947	39.42	16.50	Longobucco	V-VI
11	2039	39.44	16.56	Longobucco	IV-V
0703	2012	38.65	16.15	Sant'Onofrio	IV-V
0821	0241	39.08	16.09	Gizzeria	II-III
0925	1321	37.98	16.09	Palizzi	IV-V
25	1453	37.98	16.04	Palizzi	V-VI
25	2121	38.00	16.01	Palizzi	IV-V
1010	0719	39.65	16.63	Corigliano	IV-V
1105	1619	39.13	16.42	Scigliano	II-III
06	0119	39.38	16.35	Luzzi	III-IV
13	1930	38.97	16.52	Miglierina	IV-V
1209	1439	39.61	16.89	Longobucco	IV-V
12	2233	39.67	16.51	Corigliano	II-III
15	0552	39.15	16.33	Fuscaldo	V-VI
920117	2048	39.65	16.64	Belsito	IV-V
0331	0515	38.83	17.83	Rossano	II-III
0401	0725	38.92	16.98	Scandale	III-IV
25	1246	38.59	14.97	Mileto	II-III
0525	0242	38.13	15.69	Reggio Calabria	II-III
30	1936	39.11	17.02	Casabona	III-IV
0602	1455	39.72	16.07	Castrovillari	II-III
13	0932	38.35	15.82	Villa San Giovanni	III-IV
28	0603	38.35	15.80	Palmi	II-III
0828	1305	39.60	15.42	Capo Palinuro	II-III
1121	0608	Grecia		avvertita a Crotone	III-IV
1220	2148	38.34	16.09	Piana di Gioia Tauro	III-IV
930106	2016	39.12	16.70	Sersale	II-III
17	1748	39.33	16.24	Quattromiglia (Rende)	II-III
0323	1912	39.04	16.67	Petilia Policastro	III-IV
0427	2220	39.08	16.72	Petilia Policastro	III-IV
0509	0128	38.99	15.87	Belmonte	IV-V
0808	1634	39.88	16.00	Mormanno	II-III
10	0114	39.52	17.14	Scala Coeli	V-VI
18	0723	39.90	16.05	Mormanno	II-III
18	1512	39.89	15.99	Mormanno	III-IV
0901	0925	39.95	15.82	Mormanno	III-IV
01	1139	39.85	15.99	Mormanno	III-IV

01	2038	39.89	16.02	Mormanno	IV-V
02	0854	39.68	16.34	San Giorgio Albanese	IV-V
1007	0550	38.48	16.59	Santa Caterina dello Ionio	III-IV
1123	0108	39.41	16.12	Quattromiglia (Rende)	II-III
940105	1324	38.96	15.31	Delianuova	IV-V
0210	0823	39.29	16.12	Mendicino	II-III
23	2214	39.88	16.46	Rossano	II-III
23	2357	39.89	16.40	Cerchiara di Calabria	III-IV
0321	2140	39.66	15.91	Capo Bonifati	II-III
24	2054	39.85	15.95	Mormanno	I-II
0718	0405	39.84	16.25	Castrovillari	II-III
0801	0519	39.84	16.27	Castrovillari	II-III
1011	1616	39.69	15.31	Tortora	II-III
11	1635	39.72	15.34	Tortora	IV-V
12	0256	39.70	15.37	Tortora	IV-V
12	0459	39.68	15.35	Trecchina	V-VI
1212	0333	39.24	16.21	Mendicino	II-III
950103	0053	39.12	16.46	Santo Stefano di Rogliano	III-IV
03	0127	39.12	16.54	Santo Stefano di Rogliano	V-VI
0218	1546	39.13	16.50	Mangone	IV-V
21	1353	39.15	16.54	Serra Pedace	IV-V
23	0922	39.15	16.54	Carlopoli	III-IV
0322	2034	38.91	16.40	Jacurso	V-VI
0413	2222	39.65	16.85	Paludi	II-III
17	0326	39.52	17.05	Scala Coeli	IV-V
24	0623	39.20	16.27	Aprigliano	II-III
0520	1004	38.49	15.94	Rosarno	II-III
0808	0753	39.69	16.48	San Lorenzo Bellizzi	IV-V
1025	2234	39.39	16.30	Portapiana (CS)	II-III
1202	1719	39.54	16.64	Rossano	III-IV
28	2157	39.56	16.39	Bisignano	IV-V
960225	0120	38.74	15.77	Falerna	V-VI
0424	2337	39.34	16.21	Arcavacata	II-III
27	0038	39.50	16.39	San Cosmo Albanese	VI-VII
0723	0714	39.33	16.16	Arcavacata	II-III
25	1313	38.59	16.02	Acquaro	IV-V
0805	2024	39.52	15.90	Capo Bonifati	II-III
06	2220	39.28	16.23	Paterno Calabro	V-VI
09	1059	39.46	16.10	Lattarico	II-III
0915	1750	39.07	16.73	Petronà	II-III
1001	2012	39.54	16.23	Mongrassano	II-III
1216	0300	38.89	16.44	Borgia	III-IV
970104	0416	38.76	16.43	Vallefiorita	III-IV
20	1535	39.36	16.22	Quattromiglia (Rende)	II-III
22	2324	39.36	16.36	Quattromiglia (Rende)	II-III
0225	1941	38.91	16.01	Sant'Eufemia	III-IV
0609	0442	38.60	16.19	Soriano	III-IV
09	1419	38.61	16.19	Stefanaconi	V-VI
29	2214	39.93	15.93	Mormanno	II-III
0708	0813	39.25	16.25	Santo Stefano di Rogliano	V-VI
17	1023	39.25	16.43	Montalto Uffugo	IV-V
23	1022	39.12	16.61	Petilia Policastro	III-IV
0903	2315	38.39	16.20	Acquaro	V-VI
1002	0450	38.42	16.15	Martone	V-VI
13	1341	Grecia		avvertito diffusamente in Calabria	III-IV
1101	0757	39.47	16.27	Acri	IV-V

1210	1106	39.28	16.29	Quattromiglia	III-IV
13	2229	39.84	16.04	Mormanno	III-IV
13	2309	39.84	16.00	Mormanno	II-III
25	0042	39.72	16.54	San Lorenzo Bellizzi	IV-V
30	2149	39.82	15.87	Sanginetto	IV-V
980208	0112	38.17	15.67	Area Stretto Messina	IV
11	0530	39.25	16.39	San Pietro in Guarano	II-III
20	2006	39.28	16.38	Rogliano	III-IV
25	0926	39.28	16.39	Rogliano	III-IV
0701	1605	39.09	16.50	Decollatura	V-VI
0909	0620	39.94	16.03	Verbicaro	VI-VII
09	1128	39.97	16.05	Ferrandina	V-VI
1002	2034	38.55	16.09	San Calogero	II
06	2118	38.54	16.09	San Calogero	III-IV
1203	1633	38.94	16.32	Lametia Terme	III-IV
04	1717	38.95	16.29	Nicastro	III-IV
29	1013	39.30	16.21	Marano	III-IV
990109	1352	39.97	16.02	Viggianello	IV-V
15	2236	39.99	15.93	Rotonda	IV-V
16	0019	39.99	15.93	Lauria	V-VI
17	1932	39.07	17.46	Crotone	IV-V
0308	1935	40.00	15.99	Castelluccio Superiore	III-IV
11	0412	39.39	16.18	Rende	II-III
14	2201	40.02	15.97	Castelluccio Superiore	V-VI
30	1319	39.35	16.95	Carfizzi	III-IV
0411	0949	40.00	16.04	Castelluccio Superiore	IV-V
13	0529	40.01	16.01	Castelluccio Superiore	II-III
17	1826	39.88	15.96	Mormanno	III-IV
0713	2010	39.42	16.33	Rende	III-IV
0822	2239	39.84	16.14	Morano Calabro	III-IV
25	1030	39.80	16.11	Morano Calabro	II-III
0904	0509	39.28	16.31	Rogliano	II-III
14	0509	40.06	15.98	Rotonda	III-IV
25	0052	38.65	16.44	Palermi	IV-V
1027	1734	39.39	16.25	Marano	II-III
1123	0927	39.49	15.99	Bonifati	II-III
1222	1124	39.90	16.12	Mormanno	II-III
28	0426	39.11	17.10	Rocca di Neto	IV-V
29	1258	39.24	16.42	Pietrafitta	II-III
000112	1031	39.12	17.29	Crotone	III-IV
13	1612	39.46	16.44	Acri	II-III
0308	0938	38.22	15.75	Gambarie	II-III
10	1109	39.64	16.85	Rossano	III-IV
17	0352	37.97	15.96	Bova Marina	V-VI
0613	1742	38.60	15.72	Gioia Tauro	III-IV
0803	0947	39.48	16.28	San Martino di Finita	VI-VII
1123	0721	39.36	16.44	Acri	V-VI
29	2017	39.65	16.04	Buonvicino	IV-V
1211	0018	39.99	15.99	Castelluccio Superiore	IV-V
010420	0519	39.49	16.17	Torano Castello	V-VI
25	1014	39.40	16.13	Arcavacata	II-III
26	1521	39.38	16.15	Arcavacata	III-IV
0517	1143	38.88	15.64	Falerna	II-III
0611	1133	39.17	16.36	Rogliano	II-III
29	1050	39.36	16.21	Arcavacata	II-III
020218	0348	39.56	16.26	San Marco Argentano	II-III

18	1253	39.55	16.24	San Marco Argentano	II-III
20	0357	39.56	16.26	Mongrassano	II-III
0315	0509	39.19	16.58	Grimaldi	III-IV
25	0237	39.89	16.07	Mormanno	II-III
0405	1454	39.20	16.66	Savelli	IV-V
06	0638	39.20	16.62	Savelli	IV-V
0826	1027	39.50	16.40	Acri	III-IV
1022	0449	39.07	17.00	Crotone	II-III
22	0903	39.09	17.12	Crotone	III-IV
030724	0314	39.47	16.15	Mongrassano	II-III
040227	1905	39.10	16.36	Rogliano	III-IV
0303	0213	39.81	15.23	Palinuro	IV-V
0417	0514	38.77	17.03	Botricello	II-III
0505	1349	38.49	14.94	Salina	IV-V
16	0549	39.30	16.26	Aprigliano	I-II
16	1819	39.28	16.21	Aprigliano	I-II
0613	2143	39.22	16.41	Bocca di Piazza	II-III
0829	1651	39.21	16.40	Dipignano	III-IV
0901	0014	39.61	16.05	Acri	III-IV
02	0917	39.32	16.21	Aprigliano	I-II
28	1629	39.37	16.28	Rende	II-III
041118	0425	39.50	16.24	Bisignano	III-IV
050423	1901	39.46	16.71	Mandatoriccio	III-IV
23	1911	39.47	16.71	Scala Coeli	V-VI
23	1915	39.47	16.66	Campana	III-IV
0907	1240	38.68	16.37	Torre di Rugiero	V-VI
10	1527	39.49	16.45	Luzzi	IV-V
051018	1527	Grecia		avvertito a Monasterace	III
1211	1513	39.46	16.41	Acri	III-IV
14	1134	39.84	16.16	Altomonte	III-IV

Appendice II

Rappresentazione dei meccanismi focali.

a) Premessa (breve)

In sismologia è stato messo a punto un metodo per rappresentare in due dimensioni alcune caratteristiche dei fenomeni che si svolgono alla sorgente sismica e che presentano una certa complessità in quanto i fenomeni rappresentati si svolgono in tutte le tre direzioni dello spazio: diagrammi tridimensionali sarebbero forse più semplici da interpretare, ma certamente più difficili da realizzare. Tale metodo consente, con un minimo di pratica, di individuare immediatamente la giacitura del piano di frattura (piano di faglia), la direzione ed il verso dello spostamento che si è verificato in occasione di un terremoto e, conseguentemente, il tipo degli sforzi che agiscono nella regione ipocentrale. Quando poi su una carta geografica si riportano i grafici relativi a diversi terremoti di una stesa area, si riesce ad avere una visione chiara e sintetica dei processi geodinamici che al presente la animano.

In quest'appendice vengono esposte le modalità con cui tali grafici vengono realizzati e i criteri per la loro lettura, allo scopo di facilitare la comprensione del testo precedente. È necessaria qualche premessa che, si spera, torni utile a qualcuno dei lettori per rinfrescare vecchi concetti e a qualche altro per disporre di un nuovo strumento di lavoro per il proprio aggiornamento.

In ogni caso, se il discorso completo dovesse apparire troppo complesso, non c'è da preoccuparsi molto, perchè il mondo continuerà a girare come ha fatto finora ... ed i terremoti a verificarsi con le loro modalità di sempre. Per chi volesse saltare la "teoria", la tabella di figure nella parte conclusiva fornisce una sorta di catalogo per l'interpretazione dei grafici.

b) Qualche definizione (necessaria).

È opportuno innanzi tutto ricordare che la giacitura di un qualsiasi piano viene individuato

da due angoli (fig. A1). Uno, detto *immersione*, indica la direzione verso la quale il piano presenta la massima pendenza verso il basso; l'altro, detto *inclinazione*, è l'angolo formato con l'orizzontale. In alternativa all'immersione, si può indicare l'*azimuth* del piano: questo indica nel piano orizzontale la direzione in cui guarda una persona che da A segue con lo sguardo l'intersezione AD del piano con l'orizzontale ed ha alla sua destra l'immersione. Sia l'azimuth che l'immersione si misurano in senso orario a partire dal nord: per esempio un piano che immerge ad est, ha immersione pari a 90° ed azimuth 0° . L'immersione quindi è sempre maggiore dell'azimuth di 90° .

In geologia le superficie di discontinuità lungo le quali si è fratturato un ammasso roccioso consentendo lo spostamento relativo delle due parti affacciate si dicono *faglie e piani di faglia* i piani con i quali esse possono essere schematicamente rappresentati. Quando il piano di faglia non è verticale (inclinazione diversa da 90°), quello dei due blocchi a contatto che si appoggia sull'altro si dice *tetto* della faglia, l'altro invece viene indicato come *letto* o *muro*:

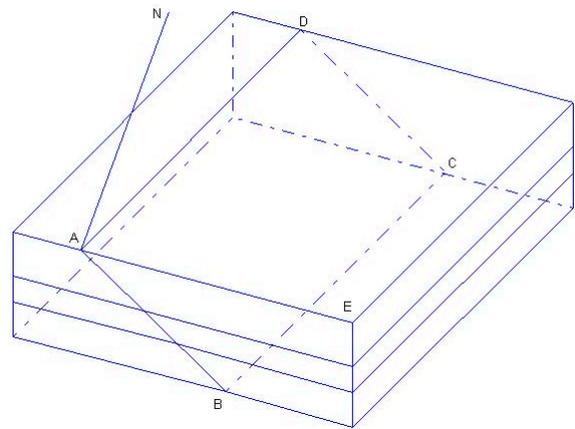


Fig. A1 – Il piano ABCD interseca l'orizzontale in AD. AN è il meridiano passante per A. L'angolo $N\hat{A}D$ è l'azimuth del piano, $N\hat{A}E$ la sua immersione ed $E\hat{A}B$ la sua inclinazione.

in fig. A1 tetto e letto sono rispettivamente a destra e a sinistra della traccia AD del piano di faglia.

c) *La procedura*

In fig. A2 è rappresentata una faglia che si è attivata consentendo tra tetto e muro lo spostamento relativo rappresentato dalle frecce rosse: il tetto si è abbassato rispetto al muro e la lunghezza del blocco, misurata nella direzione dell'immersione, è aumentata. Un fenomeno di questo tipo viene interpretato come prova dell'esistenza di sforzi tensili, cioè di azioni che tendono ad allungare i corpi ai quali sono applicate. In questo caso la faglia, compatibile con l'esistenza di un campo di sforzi *distensivo*, si dice *normale* o *diretta*.

Nella fig. A2 sono disegnate una sfera con centro nel punto dal quale inizia la frattura (ipocentro) e due circonferenze ABC e DBE. ABC è l'intersezione della sfera col piano di faglia; DBE invece è l'intersezione della stessa sfera col piano perpendicolare al vettore spostamento. I due piani risultano tra loro perpendicolari. Essi dividono lo spazio in quattro quadranti in cui il primo spostamento delle rocce al momento della frattura che origina il terremoto è diretto alternativamente nel verso dell'avvicinamento e

dell'allontanamento dalla sorgente: i sismografi disposti in questi diversi settori daranno inizio alla registrazione con un primo impulso rispettivamente verso il basso e verso l'alto (o, come si dice, mostreranno un primo impulso di *polarità negativa* o *positiva*).

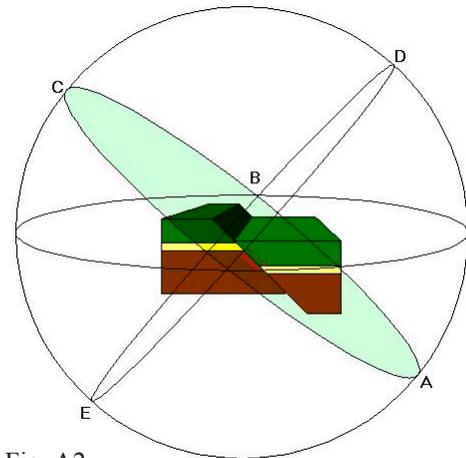


Fig. A2

I passi successivi per arrivare alla rappresentazione bidimensionale dei fenomeni alla sorgente sismica sono illustrati nelle figg. A3 ed A4.

Nella fig. A3 è stato eliminato lo schema della faglia e sono state colorate le parti della superficie sferica in cui il primo spostamento consiste in un allontanamento dall'ipocentro.

Nella fig. A4 sono stati eliminati gli

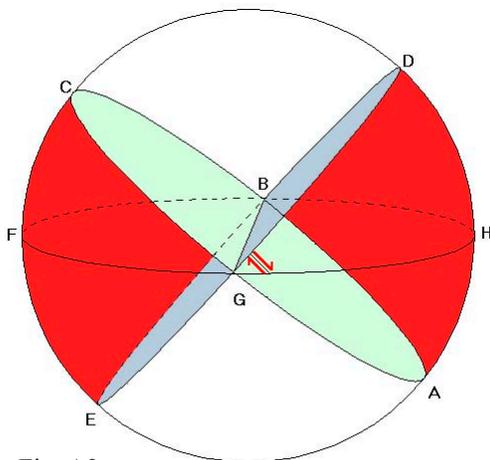


Fig. A3

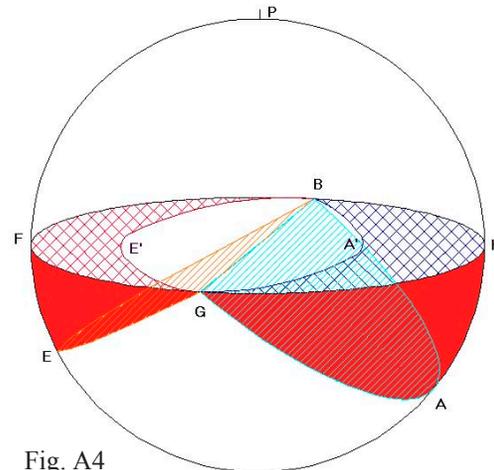


Fig. A4

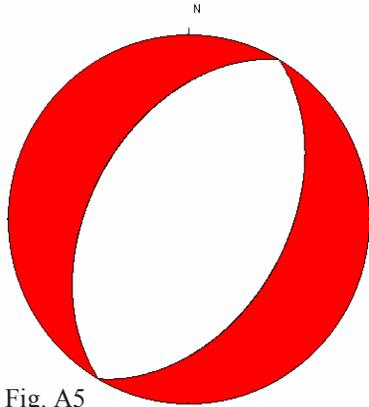


Fig. A5

elementi contenuti nella semisfera superiore, perfettamente simmetrici ai corrispondenti nella semisfera inferiore e privi di contenuto informativo aggiuntivo. La curva BE'G è la proiezione (stereografica, cioè dal polo P) della semicirconferenza BEG sul cerchio HBGH; la curva BA'G è la proiezione della semicirconferenza BAG sullo stesso cerchio; le "mezzelune" quadrettate BFGE' e BA'GH sono la proiezione, sempre sul cerchio, degli "spicchi" di superficie sferica BFGE e BHGA.

La rappresentazione bidimensionale del meccanismo focale, detta *soluzione del piano di faglia*, consiste proprio nel cerchio BFGH, in cui vengono colorate le parti che costituiscono la proiezione stereografica sul piano equatoriale

delle calotte sferiche in cui il primo spostamento del suolo presenta polarità positiva. Il suo aspetto finale è quello in fig. A5 (disegnata attribuendo al piano di faglia azimuth di 30° ed inclinazione di 60°).

d) I risultati ed il catalogo

È chiaro che al variare dell'azimuth e dell'inclinazione del piano di faglia e della direzione del vettore spostamento, cambiano anche le curve-proiezione e la posizione delle zone con diversa polarità.

Le figure successive consentono di valutare separatamente l'effetto dei diversi fattori. La fig. A6 mostra l'effetto della variazione del solo azimuth per una faglia normale con inclinazione di 75°. Agli azimuth sono stati attribuiti da sinistra verso destra i valori di 0, 30 e 60° (figg. 6a, b, c): le corrispondenti soluzioni del piano di faglia sono nelle figg. 6d, e, f. Si può osservare che al variare dell'azimuth, il grafico ruota intorno al proprio centro senza nessuna altra variazione.

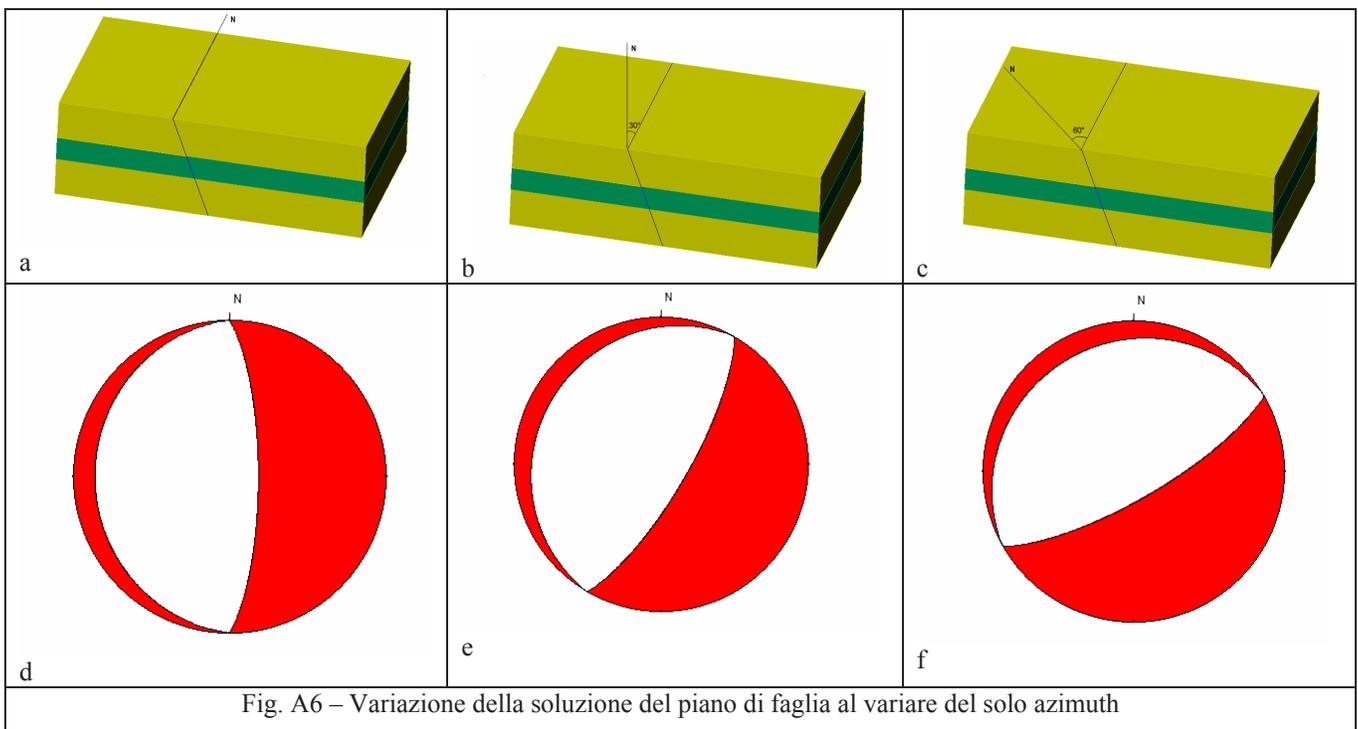


Fig. A6 – Variazione della soluzione del piano di faglia al variare del solo azimuth

Nelle fig. A7 a, b, c è invece rappresentata una faglia normale con inclinazione rispettivamente di 30, 55 e 70°, mentre le corrispondenti soluzioni del piano di faglia, calcolate utilizzando per l'azimuth il valore costante di 30°, sono riportate nelle figg. A7 d, e, f. Si vede che la curva che rappresenta il piano di faglia (quella concava verso l'alto e

verso sinistra) tende a raddrizzarsi all'aumentare dell'inclinazione: se il piano è verticale (inclinazione = 90°) la sua proiezione diventa un diametro del cerchio equatoriale; per inclinazione nulla, la proiezione del piano coincide con una metà della circonferenza esterna.

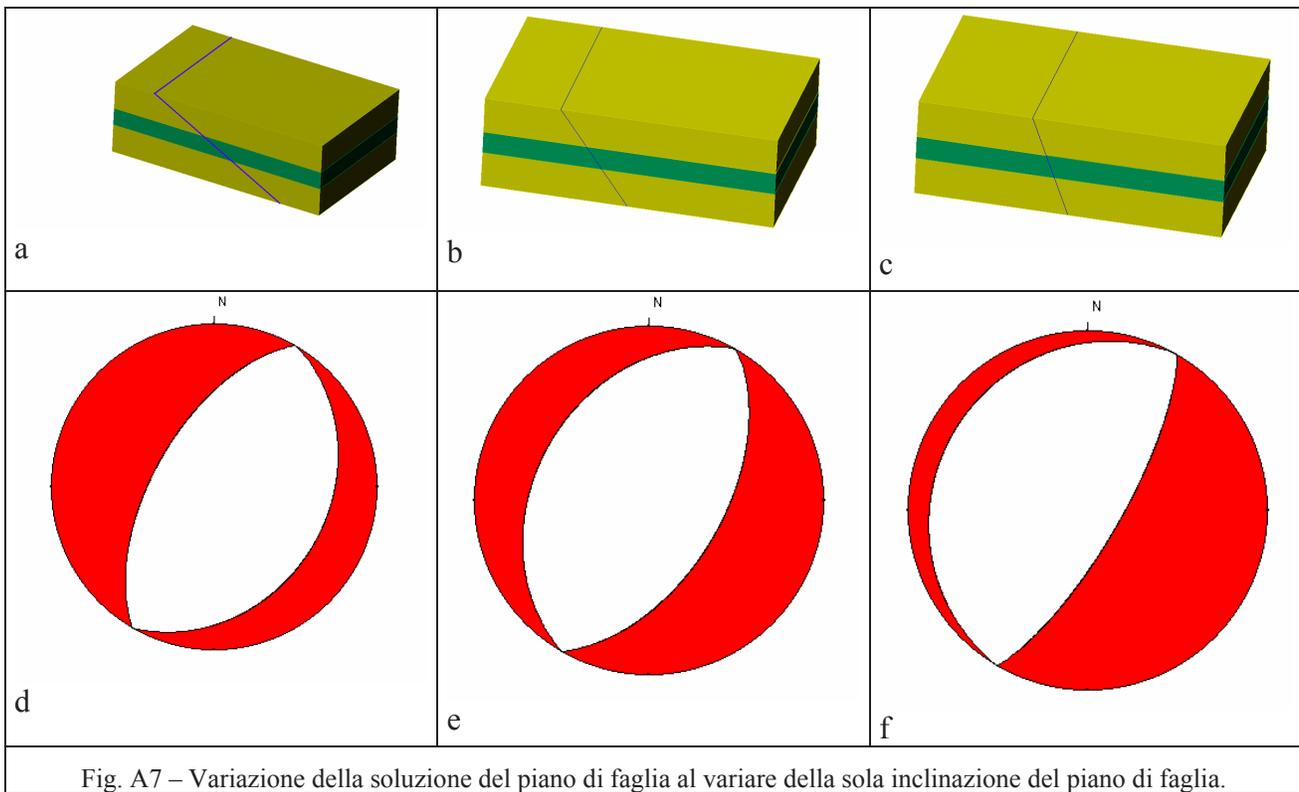
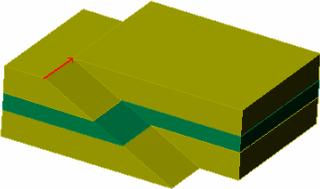
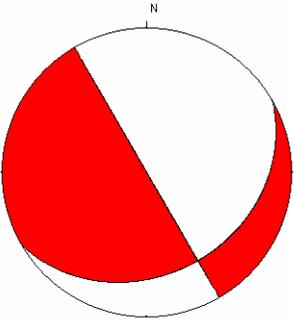
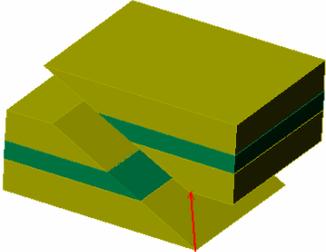
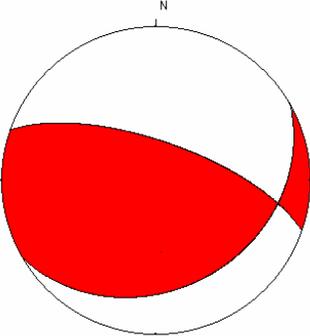
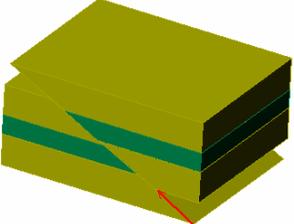
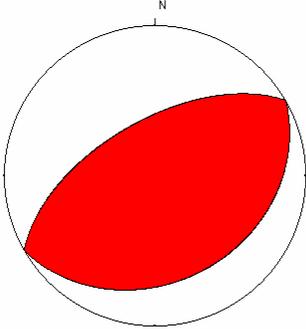
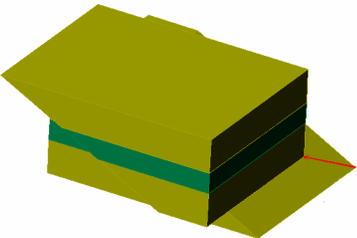
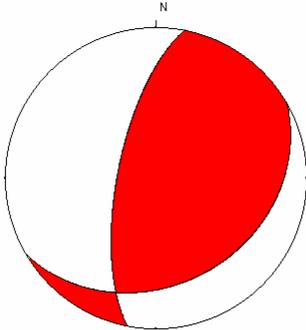


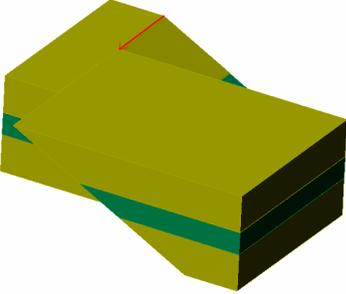
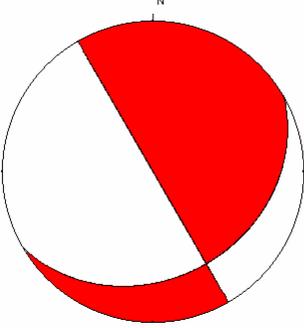
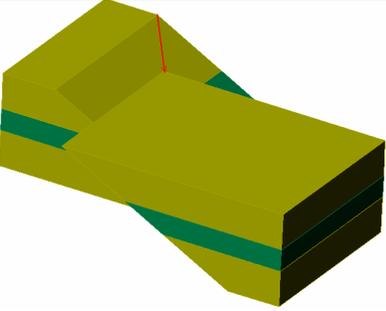
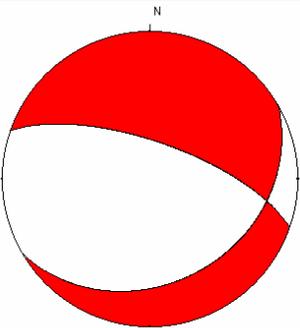
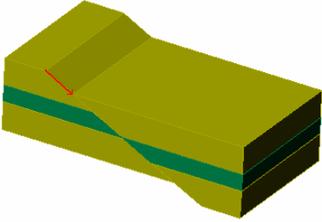
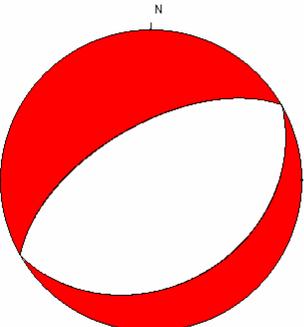
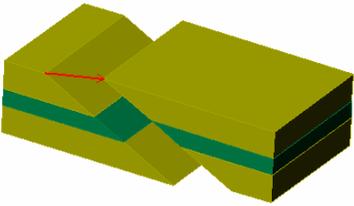
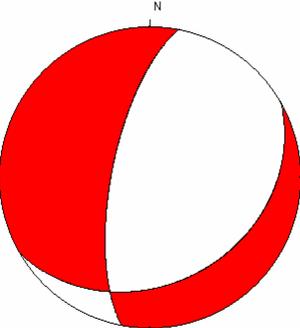
Fig. A7 – Variazione della soluzione del piano di faglia al variare della sola inclinazione del piano di faglia.

Infine nelle figure riportate nella tabella seguente, viene fatta variare la direzione del vettore spostamento tenendo fisso l'azimuth di 60° e l'inclinazione di 30°.

A cambiare in questo caso è la direzione dello spostamento relativo. Nella prima colonna è riportato lo schema della situazione fisica cui

si riferiscono la soluzione del piano di faglia ed i commenti riportati sulla stessa riga. Nella prima colonna è disegnato in rosso il vettore spostamento del tetto della faglia rispetto al muro. Uno sguardo alla colonna centrale lascia capire immediatamente perchè talvolta le soluzioni del piano di faglia vengono dette *beach balls*.

		<p>a) Il vettore spostamento è diretto lungo l'azimuth della faglia, in modo tale che un osservatore posto da un lato vede l'altro spostarsi verso la propria sinistra. La faglia si dice <i>trascorrente sinistra</i>.</p>
		<p>b) il vettore spostamento ha componenti non nulle sia nella direzione dell'azimut che in quella dell'immersione. Quest'ultima tende a far sì che il tetto tenda a accavallarsi sul muro, indicando l'esistenza di sforzi sia trascorrenti che compressivi (si parla anche di <i>trans-pressione</i>).</p>
		<p>c) in questo caso si ha una <i>compressione pura</i>, essendo nulla la componente dello sforzo lungo l'azimuth. La faglia si dice <i>inversa</i>. Il campo di sforzi tende ad accorciare le strutture nella direzione dell'immersione e a farne aumentare lo spessore verticale.</p>
		<p>d) questo caso è simmetrico rispetto alla riga b: si è in una situazione intermedia tra una trascorrenza ed una compressione; i due casi differiscono solo per il verso della componente trascorrente, che qui è destra.</p>

		<p>e) questo caso è simmetrico rispetto alla riga a: si è in presenza di una faglia <i>trascorrente destra</i>, perchè un osservatore da un lato vede l'altro spostato appunto verso la propria destra.</p>
		<p>f) alla componente trascorrente destra si aggiunge una componente <i>normale</i> o <i>distensiva</i>. Si è così passati ad una situazione di <i>trans-tensione</i>, intermedia tra una trascorrenza destra ed una distensione.</p>
		<p>g) questa è una faglia normale, con sforzi puramente distensivi, diretti lungo l'immersione e tendenti ad "allungare" le strutture sulle quali agiscono.</p>
		<p>h) situazione simmetrica rispetto alla riga f: la componente di trascorrenza in questo caso è sinistra.</p>

e) *L'utilizzazione e l'ambiguità dell'interpretazione.*

In tutto quanto detto fin qui, sono state ipotizzate una determinata giacitura del piano di faglia e la direzione dello spostamento e sono state calcolate le corrispondenti soluzioni di piano di faglia. Nella realtà il problema da risolvere è esattamente l'inverso. Quando si registra un terremoto niente si conosce dei fenomeni che l'hanno originato mentre le stazioni sismografiche forniscono la polarità del primo spostamento della registrazione. Conseguentemente i compiti del sismologo sono, in sequenza:

- la raccolta di queste informazioni;
- la loro rappresentazione su un grafico tipo *beach ball*;
- la separazione delle polarità negative da quelle positive mediante due curve che obbediscono alle regole geometriche derivanti dal fatto che esse devono rappresentare la proiezione di due piani tra loro ortogonali;
- l'interpretazione in termini di campi di sforzo;
- l'interpretazione in termini geodinamici.

Il problema da risolvere è quindi un *problema inverso*: non si tratta, come fatto in precedenza, di calcolare gli effetti di cause note, ma di risalire dagli effetti osservati (polarità dei primi spostamenti) alle loro cause (giacitura della faglia e direzione e verso dello spostamento).

I problemi inversi normalmente non hanno una soluzione univoca, ma ammettono più soluzioni. Ricordiamo per esempio che le soluzioni delle fig. A7d, e, f sono state calcolate fissando l'azimuth a 30° e attribuendo all'inclinazione i valori di 30 , 55 e 70° . In fase di lettura, gli stessi grafici possono essere attribuiti altrettanto correttamente ad una faglia normale con azimuth di 210° ed inclinazione rispettivamente di 60 , 35 e 20° .

L'ambiguità deve essere risolta, se possibile, ricorrendo a dati o conoscenze di altra natura oppure alla coerenza del quadro che si va a ricostruire. Sono proprio queste ambiguità ed incertezze che generano e vivacizzano le discussioni scientifiche: i *puzzle* meno semplici sono anche quelli più divertenti.