

Inversione di intensità macrosismiche per le faglie di terremoti storici

L. Sirovich, F. Pettenati e M. Bobbio

*Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, Trieste
(e-mail: lsirovich@ogs.trieste.it)*

Introduzione

L'Unità di Ricerca ha invertito le intensità macrosismiche osservate per alcuni terremoti storici della Sicilia, dell'area Umbro Marchigiana e del Veneto, per dedurre ipotesi quantitative e riproducibili sulla geometria e sulla cinematica delle sorgenti. In questa relazione vengono presentati i risultati relativi al Veneto; per gli altri si rinvia alla bibliografia (Sirovich e Pettenati, 1999; Sirovich et al., 1999a, b, c). Il modello fisico sotteso al nuovo metodo di inversione è descritto in Sirovich (1996, 1997), la tecnica di inversione è in Pettenati et al. (1999), e il calcolo degli errori sui parametri ottenuti da inversione è in Sirovich e Pettenati (1999) e, per quanto riguarda l'uso della tecnica bootstrap, in Sirovich et al. (1999c).

E' noto che, tradizionalmente, si cercava di ricavare indicazioni sull'orientamento delle possibili faglie-origini di terremoti storici dall'allungamento delle aree mesosismiche, o dalla distribuzione geografica dei siti a maggiore intensità. La tecnica KF da noi usata tenta di rendere questo tipo di procedure più rigoroso e fisicamente plausibile; per questo, prima di tutto, si è proceduto a validare il modello su terremoti sufficientemente forti (appartenenti a una stessa regione, per minimizzare gli effetti legati ai siti e ai percorsi), per i quali si disponeva di stime dei parametri di sorgente, dedotte da moderne misurazioni strumentali, così come dei rilievi macrosismici. Questo tipo di indagine è stato altresì necessario per tarare in intensità le radiazioni calcolate dal modello KF, che sono adimensionali (pur essendo concettualmente legate agli spostamenti al sito).

I tre terremoti studiati interessano le zone sismogenetiche numero 6 (Asolo 1695) e 5 (Belluno 1873 e Cansiglio 1936) del modello ZS4 proposto da Scandone e Stucchi (1999). Ipotesi quantitative sulla sorgente, basate sulla soluzione del piano focale, sono disponibili solo per il terzo terremoto sopra elencato, avvenuto in epoca strumentale (Renner, comunicazione scritta, 1999). Solo in questo caso si sono quindi potuti confrontare i risultati delle nostre inversioni KF con i parametri dedotti, indipendentemente, attraverso tecniche affidabili e già collaudate. Per gli altri due eventi, è possibile validare i risultati delle inversioni solo indirettamente facendo ricorso alle informazioni sismotettoniche disponibili.

1 Metodo di inversione

Il metodo si basa sulla funzione cinematica KF (Sirovich, 1996) e sul suo uso per inversioni automatiche trial-and-error realizzate da Pettenati (Pettenati et al., 1999) attraverso la minimizzazione della somma dei quadrati dei residui nei punti di osservazione. I residui sono dati dalla differenza tra le intensità calcolate nei siti e quelle direttamente

osservate nei siti (o dedotte da fonti storiche per i terremoti più antichi). La tecnica ha migliori possibilità di successo se applicata a un piano quotato generato da una scossa singola. Inoltre, l'approccio asintotico o approssimazione di alta frequenza, che sta alla base della KF e che considera solo le onde di corpo, limita l'applicabilità del metodo ai siti compresi entro distanze $3-10 < R < 80-100$ km dalla proiezione in superficie della faglia.

Per ogni inversione descritta viene dato il range dei parametri (estremi e passo di calcolo, step).

L'angolo di strike va da 0° a 360° , con il dip a destra. Per l'angolo di rake è adottata la convenzione descritta in Sirovich 1997: misurato sul piano di faglia, visto dal tetto, in senso antiorario rispetto al vettore di slip, da 0° a 360° ; da 1° a 179° : componente inversa. Le lunghezze della faglia, a partire dal punto di nucleazione, sono positive, L+, nel verso dello strike e negative nel verso antistrike. Il numero di Mach ovvero il rapporto fra la velocità di rottura del fronte di faglia e la velocità delle onde S, V_s , è positivo (Mach+) nel verso dello strike, e negativo (Mach-) nel verso antistrike.

L'algoritmo di inversione prevede l'uso combinato di un massimo di 5 parametri. Nell'eseguirlo, in un primo momento esploriamo il range dei parametri con step non troppo piccoli; successivamente, infittiamo le sintesi automatiche trial-and-error adottando step anche molto piccoli. Quando disponibili, vincoliamo le inversioni ad ampi range di valori comprendenti quelli previsti da stime quantitative di origine strumentale (o derivati semi-quantitativamente da considerazioni sismotettoniche).

Allo scopo di fornire immagini più leggibili, i piani quotati vengono rappresentati mediante tassellazione (Pettenati et al., 1999). Il nostro gruppo di ricerca ritiene che la tassellazione possa venire utilmente impiegata anche per la pesatura dei residui e per altre applicazioni legate alle inversioni (in particolare, per osservare effetti spuri derivanti dall'inosservanza del principio di Nyquist nel piano). In questa sede tuttavia le inversioni sono state pilotate dai valori di intensità direttamente osservati nei siti.

È necessario infine precisare che, data la tecnica, le nostre soluzioni presentano sempre un'ambiguità di 180° nell'angolo di rake. Nel seguito usiamo i termini "tassello" e "poligono di Voronoi" come sinonimi. Ai fini della inversione dei dati macrosismici mediante la KF, abbiamo scelto di non usare gradi intermedi, che vengono arrotondati al grado superiore.

1.1 Calcolo delle incertezze

Il calcolo degli errori nei parametri determinati via inversione ha seguito la metodologia esposta in Sirovich e Pettenati (1999), alla cui base sta l'assunto che l'incertezza massima delle osservazioni macrosismiche sia di 2 gradi. Secondo questo approccio, l'errore di un parametro è quella sua variazione che farebbe cambiare di due gradi l'intensità calcolata anche in un solo sito rispetto a quella ottenuta usando il set di parametri sui quali l'inversione ha mostrato di convergere. L'entità dell'errore cresce comunque al diminuire del campionamento del fenomeno osservato in natura (numero dei siti del piano quotato macrosismico); in particolare, non è infrequente ottenere errori

asimmetrici (ovvero: errori positivi e negativi diversi tra loro); tale comportamento dipende anche dalla irregolare distribuzione dei siti osservati.

1.2 Analisi statistica

Prima di effettuare le inversioni, vengono effettuate analisi statistiche con il metodo di Chauvenet (Barnett & Lewis, 1978) per l'individuazione di eventuali valori di intensità discordanti dalla distribuzione di riferimento (outliers), che vengono esclusi dal data set. Se esistono informazioni sulla geologia e morfologia dei siti, vengono anche tolti i siti che presentano risposte locali anomale dal punto di vista statistico.

Per ragioni spiegate altrove, è stato necessario trattare preliminarmente una serie di terremoti 1) sufficientemente forti, 2) con buoni dati macrosismici e 3) buone registrazioni sismografiche, 4) appartenenti a una stessa regione (la cosiddetta grande area metropolitana di Los Angeles).

2 Terremoti studiati

2.1 Asolo 25.02.1695

La zona pedemontana delle Prealpi Venete è principalmente caratterizzata da sovrascorrimenti ad andamento Alpino immergenti verso NNW. Tali strutture sono dislocate da lineamenti subverticali trascorrenti destri con direzioni NW-SE e NNW-SSE, facenti parte della tettonica pleistocenica-olocenica; come evidenza paleosismologica, si ricorda il ritrovamento della faglia a sud del Monte Grappa di direzione ENE-WSW (Sleiko et al., 1987).

I cataloghi parametrici usati sono l'NT4.1.1 (Camassi e Stucchi, 1997) ed il CFTI (Boschi et al., 1995); per i piani quotati si fa riferimento ai cataloghi DOM4.1 (Monachesi e Stucchi, 1997) e allo stesso CFTI.

INVERSIONI DA DOM4.1: nel piano quotato tassellato (figura 1) si nota la pressoché totale assenza di punti di osservazione nel quadrante NW, e la distribuzione allungata in direzione NE-SW dei siti in zona mesosismica. Il resto del piano è abbastanza ben campionato. Salti di 2-3 gradi di intensità tra tasselli sono visibili nelle zone periferiche poco coperte. Le inversioni automatiche sono state condotte sui siti compresi entro il raggio di circa 80 km dall'ipotetica sorgente (50 siti disponibili), ma anche comprendendo altri 4 siti posti più a Sud (tot. 54 siti); e sui 34 siti più vicini all'epicentro. Le inversioni individuano sempre meccanismi strike; dal piano a 50 siti emergono le direzioni NNE, SSW e ESE. Dai 34 punti, con step grandi: strike per 30°, 40°, 125°, 305° e 310°.

In una prima fase i parametri geometrici sono stati lasciati completamente liberi. Per il momento sismico si è partiti da un range ($4.4 \cdot 10^{25}$ - $5.2 \cdot 10^{25}$) che comprendeva il valore ricavato dal catalogo ($M_s=6.4$ corrispondente a $M_0=4.6 \cdot 10^{25}$ dyne-cm, secondo la formula di Stover e Coffman, 1993). Dopo una lunga serie di affinamenti, e l'inserimento di un sito (Bolzano) nel piano quotato a 54 punti (chiamato piano quotato a 54+1 punti), si è ottenuto il risultato che converge sull'epicentro NT4.1.1 (45.87N, 11.91E) e sugli altri parametri esposti nella tabella 1.

Parametro	P.Q. 34 siti	P.Q. 50 siti	P.Q.54+1 siti
lat. epi. [°]	45.87	45.87 (+0.02, -0.01)	45.87 (+0.02, -0.03)
lon. epi. [°]	11.91	11.91 (+0.03, -0.06)	11.91 (+0.02, -0.06)
Mo [dyne cm] $\times 10^{25}$	5.0	5.0 (+21.10, -4.42)	4.9 (+25.10, -4.38)
strike [°]	I sol. 28; II sol. 305	35 (+17, -8)	114 (+4, -6)
rake [°]	I sol. 2; II sol. 7	6 (+12, -12)	0 (+42, -15)
dip [°]	I sol. 50; II sol. 90	72 (+24, -45)	85 (+18, -17)
prof. [km]	6	6 (+2, -1)	6 (+2, -2)
Mach n. +	0.80	0.70 (+0.11, -0.18)	0.75 (+0.10, -0.18)
Mach n. -	0.80	0.70 (+0.13, -0.17)	0.75 (+0.25, -0.37)
L+ [km]	12	12 (/ , -7)	12 (/ , -8)
L- [km]	12	16 (/ , -14)	12 (/ , -10)
Vs [km/s]	3.50	3.50 (+1.98, -1.14)	3.78 (+2.20, -1.45)

Tab. 1. Asolo, 1695; parametri sismologici preliminari da inversione del piano quotato Dom4.1 (/ = indeterminato). I valori tra parentesi sono gli errori o sensibilità. (Data la convenzione adottata, i piani [114, 85] e [305, 90] sono molto vicini).

Nel caso del piano quotato con 34 siti, due inversioni hanno totalizzato lo stesso valore minimo di Σr^2 dando angoli di strike, rake e dip rispettivamente di 28°, 2°, 50°, e 305°, 7°, 90°. In figura 2 è visibile il risultato ottenuto dall'inversione del piano quotato con 54+1 punti. Per il momento, questa soluzione appare la più compatibile con i citati lineamenti di tettonica recente subverticali trascorrenti destri con direzione NW-SE (Ulteriori prove sono in corso per l'inversione di Mo e di Vs, giacché la soluzione sottostima le intensità da catalogo).

INVERSIONI DA CFTI: CFT assegna ad alcuni siti il grado X. Entro range di distanze che possiamo trattare ricadono 58 siti. Da una prima prova con i parametri angolari liberi e step=5°, profondità h da 6 a 12 km (step=2km) e momento sismico con range da $4.8 \cdot 10^{25}$ a $5.2 \cdot 10^{25}$ (step $0.2 \cdot 10^{25}$), contenente il dato da catalogo (Me=6.6), sono emersi due minimi relativi: il primo per strike=17°, rake=169° dip=45° h=6km, Mo= $5.2 \cdot 10^{25}$; la seconda per strike=298°, rake=19, dip= 87, h= 6, Mo= $5.2 \cdot 10^{25}$. Ulteriori prove sono in corso.

2.2 Belluno 29.06.1873

Per la zona sismogenetica 5 viene ipotizzata una funzione di accomodamento di sforzi laterali differenziali (movimenti di tipo strike-slip); tale interpretazione si basa anche sulle indicazioni riferite al terremoto del Cansiglio, del 1936 (Sleiko et al., 1987). In sintesi, la zona sismogenetica è interessata da sovrascorrimenti di tipo Alpino e da linee di faglia all'incirca NW-SE. In particolare il sovrascorrimento che si imposta nella valle del Piave, come proseguimento della linea Bassano - Val

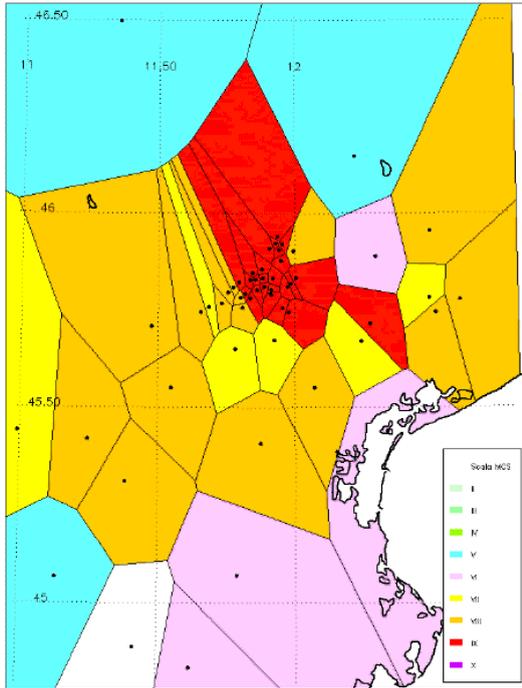


Fig. 1 - Piano quotato tassellato inversione 1695 - Catalogo DOM4.1

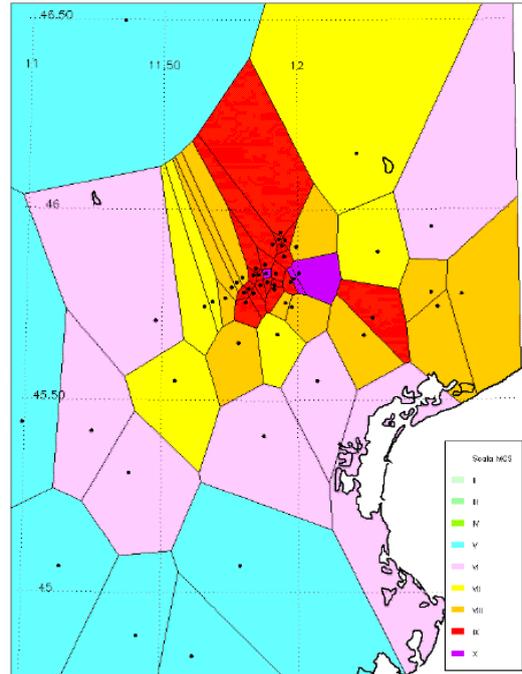


Fig. 2 - Piano tassellato miglior KF. Asolo 1695 - Catalogo DOM4.1

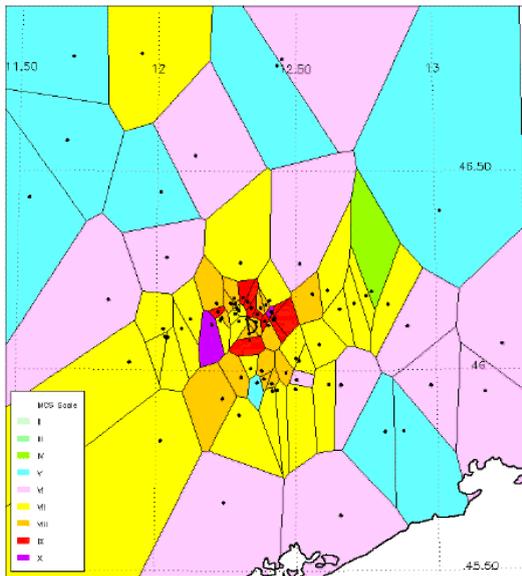


Fig. 3 - Piano quotato tassellato Belluno 1843 - Catalogo DOM4.1

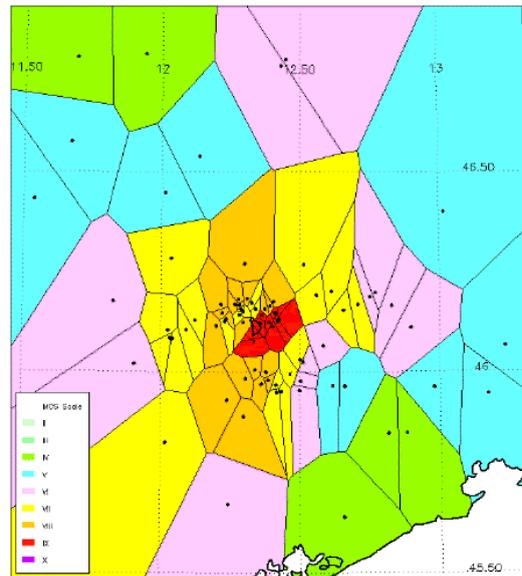


Fig. 4 - Piano tassellato miglior inversione KF. Belluno 1873 - Catalogo DOM4.1

Dobbiadene, da una direzione NE-SW piega decisamente verso NNE con immersione WNW. Come segno di paleosismicità si segnala la faglia del Col Visentin di direzione NNW-SSE, posteriore alla erosione würmiana (Sleiko et al., 1987).

Le prime prove sono state condotte sui parametri angolari, lasciandoli completamente liberi, con $\text{step}=5^\circ$; la profondità epicentrale è stata fatta variare da 8 a 20 km con $\text{step}=4$; ed M_0 =da 4.0 a $4.8 \cdot 10^{25}$ dyne cm con $\text{step } 0.2 \cdot 10^{25}$ dyne cm. Sono emersi tre minimi relativi: uno per direzione ESE (strike= 130° , rake= 10° , dip= 35° immergente verso SSW), uno per direzione ENE (strike= 80° , rake= 165° , dip= 50°), l'ultimo per direzione SSW (strike= 215° , rake= 40° , dip= 50° con immersione verso WNW). Delle tre quella con valore dei residui minore è risultata la prima. Affinando via via le inversioni con step sempre più piccoli e combinando via via i parametri angolari con le coordinate epicentrali e con i Mach number, sono state ottenute due soluzioni preferenziali: una con strike= 80° , rake= 165° , dip= 52° , prof.=12km, $M_0=5.4 \cdot 10 \cdot 10^{25}$ dyne cm, $\Sigma r^2=67$; l'altra con strike= 132° , rake= 4° , dip= 45° , prof.=13km, $M_0=5.0 \cdot 10 \cdot 10^{25}$ dyne cm, $\Sigma r^2=71$ (epic. $46^\circ.2$, $12^\circ.39$).

Sono state quindi condotte inversioni pesate con l'inverso dell'area dei tasselli dei siti osservati (test V-V), che confermano le due soluzioni. È comunque riemersa in questa fase l'ipotesi con strike verso SSW (217°), con residui ($r^2=73$) non troppo superiori alle altre due soluzioni, e dip= 53° , che appaiono i dati più compatibili con il quadro geodinamico.

A parte il puro confronto fra residui, l'analisi visiva dei piani quotati tassellati, osservati e di sintesi, suggerisce che la soluzione con strike= 217° riproduce meglio delle altre le forme delle aree tassellate da catalogo, in particolare nella zona epicentrale e verso SW, ed E. Come accennato, tale sintesi avrebbe riscontro geodinamico, perché appare compatibile con il ramo della Val del Piave della linea Bassano-Val Dobbiadene.

Va comunque notato che anche la soluzione con strike 132° e meccanismo strike-slip, potrebbe avere un riscontro geodinamico, in particolare nell'evidenza paleosismica del Col Visentin (strike circa 150°) e in una linea trascorrente posta in Val del Piave a nord di Belluno, molto vicina all'epicentro ottenuto per inversione.

Per quanto riguarda le due soluzioni riportate in tabella 2, la prima, con residui minori ($\Sigma r^2=67$), non è sostenuta da strutture neotettoniche conosciute; l'altra ha residui un po' più alti ($\Sigma r^2=74$), ma appare più compatibile con la geodinamica. La figura 4 mostra la sintesi ottenuta con la soluzione con strike per SSW.

2.3 Consiglio 18.10.1936

Come già detto, Sleiko et al. (1987) accreditano per l'evento un meccanismo strike-slip; questa interpretazione ha contribuito a suggerire la caratterizzazione stessa della zona sismogenetica 5. Le presenti inversioni sono state stimulate dall'interessante risultato ottenuto da Renner (comunicazione scritta, 1999). Dopo una verifica dei segni dei primi impulsi, Renner fornisce due diversi meccanismi possibili: strike= 200° , dip= 60° , rake= 8° , prof.=19 km (35 segni concordi rispetto ai 38 disponibili); oppure strike= 230° , dip= 45° , rake= 56° , prof.=19 km; e (36 segni a favore su 38). Sarebbe quindi preferita di poco una soluzione thrust.

Da entrambi i piani quotati (CFTI e DOM4.1) sono stati tolti i tre siti epicentrali: Coltura, Polcenigo e San Giovanni di Polcenigo (VIII). In seguito, nel caso del CFTI, visto che le sintesi indicavano un deciso spostamento dell'epicentro, i tre siti sono stati ripristinati.

Dal CFTI sono stati poi tolti Pordenone e La Crosetta (EE). Il sito di Cordignano del DOM4.1 (IV limitrofo a IX gradi) non è un outlier statistico (nel CFT risulta un VIII grado). I piani quotati utili alle inversioni sono quindi composti da 137 dati per il DOM4.1 e 71 per il CFTI. Inversioni attorno alle due ipotesi antitetiche, precedentemente citate, privilegiano l'ipotesi thrust di Renner ($\Sigma r^2=202$ su DOM4.1; $\Sigma r^2=190$ su CFTI); la soluzione strike-slip ha totalizzato $\Sigma r^2=286$ con i dati del DOM4.1, e $\Sigma r^2=204$ con il CFTI. Inversioni su tutto il range dei parametri (catalogo DOM4.1) producono il risultato ottimale di tabella 3.

Coordinate e Mo [dyne-cm]	parametri geometrici	parametri cinematici
lat.=46°.18 (+.05, -.04); 46°.19 (+.02, -.01)	strike=80° (+8, -8); 217° (+13, -13)	Mach n.+ = 0.70 (+.13, -.26) 0.76 (+.11, -.21)
lon.=12°.39 (+.04, -.06); 12°.40 (+.03, -.03)	rake=165° (+16, -12); 53° (+21, -25)	Mach n.- = 0.70 (+.23, -.18) 0.78 (+.21, -.29)
Mo=5.4·10 ²⁵ (+2.41·10 ²⁶ , -4.89·10 ²⁵); 5.1·10 ²⁵ (+2.23·10 ²⁶ , -4.63·10 ²⁵)	dip=52° (+27, -22); 51° (+11, -10)	Vs=3.50km/s (+2.24, -2.3); 3.48km/s (+2.09, -1.44)
prof.=12km (+4, -7); 9km (+4, -3)	L+=15km (+19, -15) 16km (/ , -11)	L-=15km/s (/ , -15) 24 km/s (/ , -20)

Tab. 2. Alcuni parametri sismologici dell'evento di Belluno, 1873, dedotti via inversione del piano quotato (DOM4.1). I valori tra parentesi sono gli errori o sensibilità (/ = indeterminato).

Parametro	P.Q. Catalogo Dom4.1	P.Q. Catalogo CFTI
lat. epi. [°]	46.090N (+0.03, -0.04)	46.110N (+0.02, -0.03)
lon. epi. [°]	12.460E (+0.07, -0.07)	12.466E (+0.05, -0.05)
Mo [dyne cm] per 10 ²⁵	3.0 (+15.5, -2.81)	2.5 (+12.31, -2.31)
strike [°]	232 (+19, -11)	212 (+19, -6)
rake [°]	64 (+15, -17)	41 (+15, -18)
dip [°]	48 (+11, -16)	52 (+23, -17)
prof. [km]	10 (+4, -3)	8 (+4, -3)
Mach n. +	0.69 (+0.14, -0.23)	0.716 (+0.13, -0.18)
Mach n. -	0.69 (+0.23, -0.16)	0.620 (+0.15, -0.24)
L+ [km]	8 (>+50, -8)	10 (>+50, -10)
L- [km]	8 (+16, -6)	2 (>+50, -2)
vs [km/s]	3.50 (+2.22, -1.47)	3.52 (+2.04, -1.36)

Tab. 3. Parametri sismologici preliminari dell'evento del Cansiglio 1936, dedotti via inversione dei piani quotati Dom4.1 e CFTI, corrispondenti a Sr^2 minimo. I valori tra parentesi sono gli errori o sensibilità.

E' confortante che le sintesi per i due piani quotati si somiglino. Si segnala anche che le sintesi individuano, oltre alla zona di minimi con strike 210° - 235° (e rake circa a 40°)

un'altra zona di minimi per strike $170^\circ - 200^\circ$ (rake $\sim a 0^\circ \pm 180^\circ$). In altre parole, la stessa incertezza fra strike e thrust presente nell'esame dei segni delle registrazioni sismografiche si verifica anche nelle inversioni delle intensità, e per meccanismi focali simili.

3 Conclusioni

Non tutto il materiale esposto è ancora in forma compiuta. Abbiamo espresso risultati e dubbi in modo più esteso di quanto non si faccia usualmente in articoli a stampa. I dettagli tecnici sulle inversioni sono stati documentati anche per far vedere che non è stato lasciato nulla o quasi di intentato. È interessante che le soluzioni fornite dai due cataloghi siano spesso molto vicine. Purtroppo, una validazione diretta è possibile solo per l'evento del Cansiglio del 1936; per questo terremoto le nostre inversioni confermano l'ambiguità fra una soluzione con meccanismo inverso e una con meccanismo trascorrente, già segnalata da Renner (che ha utilizzato le polarità dei primi arrivi delle onde compressionali; comunicazione scritta, 1999). Per altro, le nostre inversioni convergono più decisamente verso la soluzione con meccanismo inverso. Nel caso degli altri due terremoti, le soluzioni proposte sono di solito compatibili con le evidenze geologiche.

Nell'ambito di altro finanziamento GNDT, le inversioni con il modello KF sono state applicate anche agli eventi di Fabriano (1741) e di Camerino (1799) (Sirovich et al., 1999c). Per il primo, l'inversione converge su un movimento strike-slip secondo una direzione all'incirca NE-SW, compatibile con la tettonica regionale; il secondo viene risolto con un movimento misto (strike/dip-slip) di tipo appenninico (strike per NW-SE, con immersione verso SW).

Per i dettagli metodologici di questa nuova tecnica di inversione dei dati macrosismici non possiamo che rinviare alle pubblicazioni citate. In alcuni casi le inversioni KF appaiono in grado di fornire ipotesi quantitative sulle sorgenti di terremoti pre-strumentali; tali inversioni tengono conto dei principali fattori fisici che regolano la radiazione delle onde di corpo nel campo vicino-intermedio. Dalle prove effettuate finora su terremoti di epoca strumentale (i cui parametri di sorgente erano stati stimati, indipendentemente, con tecniche moderne) sembra che l'algoritmo KF si comporti in modo abbastanza soddisfacente.

Bibliografia

- Barnett V. e Lewis T. (1978): Outliers in statistical data. Wiley series in probability and mathematical statistics-applied.
- Boschi E., Ferrari G., Gasperini P., Guidoboni E., Smriglio G. e Valensise G. (1995): Catalogo dei forti terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1980. Istituto Nazionale di Geofisica - SGA storia geofisica ambientale. Roma.
- Camassi R. e Stucchi M. (1997): NT4.1.1 Un catalogo parametrico di terremoti di area italiana al di sopra della soglia del danno. Sito Web: <http://emidius.itim.mi.cnr.it/NT/home.html>
- Lavecchia G., Brozzetti F., Barchi M., Menichetti M. e Keller J.V.A (1994): Seismotectonic zoning in east-central Italy deduced from an analysis of the Neogene to present deformations and related stress fields. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **106**, 1107-1120.

- Monachesi G. e Stucchi M. (1997): DOM4.1 Un database di osservazioni macrosismiche terremoti di area italiana al di sopra della soglia del danno. Sito Web: <http://emidius.itim.mi.cnr.it/DOM/home.html>
- Pettenati F., Cavallini F. e Sirovich L. (1999): Objective Treatment, and Synthesis of Macroseismic Intensity Fields Using Tessellation. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **89**, 1203-1213.
- Scandone P. e Stucchi M. (1999): Note di commento sulla zonazione sismogenetica ZS4 e di introduzione agli obiettivi del progetto 5.1.1. Sito Web: <http://emidius.itim.mi.cnr.it/GNDT/P511/NoteWorkshop.html>
- Sirovich L. (1996): A simple algorithm for tracing out synthetic isoseismal *Bull. Seism. Soc. Am.*, **86**, 1019-1027
- Sirovich, L. (1997): Synthetic isoseismals of three earthquakes in California-Nevada. *Soil Dynam. Earthq. Eng.*, **16**, 353-362.
- Sirovich, L. e Pettenati F. (1999): Seismotectonic outline of South-Eastern Sicily: an evaluation of available options for the scenario earthquake fault rupture. *J. Seism.*, **3**, 213-233.
- Sirovich L., Pettenati F. e Bobbio M. (1999a): Caratteristiche di sorgente dall'inversione di intensità macrosismiche (terremoto del Cansiglio, 1936): Conv. Naz. GNGTS, Roma, 9-11 nov. 1999 (riassunto esteso).
- Sirovich L., Pettenati F. e Bobbio M. (1999b): Caratteristiche di sorgente dall'inversione di intensità macrosismiche (terremoto di Fabriano, 1741). Conv. Naz. GNGTS, Roma, 9-11 nov. 1999 (riassunto esteso).
- Sirovich L., Pettenati F. e M. Bobbio (1999c): Inversione di piani quotati macrosismici. di terremoti storici. Progetto 62a MISHA. In stampa su Rapporto Attività GNDT: Peruzza L. (a cura di); 1999: Progetto MISHA. Metodi Innovativi per la Stima dell'HAzard - Applicazione all'Italia Centrale. Rapporto finale, GNDT Roma, pp. 176
- Slejško D., Carulli G.B., Carraro F., Castaldini D., Cavallin A., Doglioni C., Illiceto V., Nicolich R., Rebez A., Semenza E., Zanferrari A. e Zanolla C. (1987): Modello Sismotettonico dell'Italia Nord-Orientale. G.N.D.T. U.R.1.4 "Sismotettonica delle Alpi". CNR - G.N.D.T. Rendiconto n.1, Ricci, Trieste 83 pp.
- Stover C.W. e Coffman J.L. (1993): Seismicity of the United States, 1568-1989 (revised). U.S. Geological survey professional paper 1527