Determinazione dello stile di deformazione e dello stato di sforzo dell'arco calabro

Coordinatore: prof. Riccardo Barzaghi

Introduzione

Durante l'ultimo anno, le ricerche delle quattro UR coinvolte nel progetto sono state fortemente coordinate così da definire in modo adeguato le attività volte a definire lo stile di deformazione dell'Arco Calabro. Come descritto nel progetto, questa analisi è stata condotta sia a scala regionale che a scala locale. L'obbiettivo principale di questa ricerca è quello di integrare, a queste scale, modelli geofisici e geodetici per una corretta integrazione delle due discipline. Come è ben noto infatti, le osservazioni di carattere geodetico basate sul GPS possono fornire informazioni utili all'affinamento di modelli di tipo geofisico. Inoltre, si sono avuti primi contatti con altri gruppi di ricerca che partecipano a questo progetto del GNDT (in particolare con il gruppo coordinato da Amato) al fine di condividere metodiche di ricerca e di iniziare una più stretta collaborazione su problemi scientifici di comune interesse. Le attività svolte nel corso del secondo anno sono state realizzate anche con il concorso della Regione Calabria che ha mostrato vivo interesse per questo tipo di indagini scientifiche. Grazie a questa interazione, è stato possibile pianificare l'istituzione di una nuova stazione permanente GPS, situata vicino a Crotone, che verrà realizzata e gestita dalla Regione Calabria.

Le attività scientifiche svolte nel corso del 2002

Per quanto riguarda gli aspetti geodetici della ricerca, sviluppati dalla UR del Politecnico di Milano e da quella dell'Università di Trento, ci si è concentrati su problemi di tipo metodologico. In particolare, si è studiato a fondo quale sia l'impatto della variazione del centro di fase (PCV) delle antenne nelle misure di precisione. E' in corso da tempo, all'interno della comunità geodetica, un dibattito serrato su questo argomento. Ciò è di particolare rilevanza nel caso di osservazioni GPS in reti non permanenti nelle quali può accadere che vengano utilizzate antenne diverse da una campagna all'altra. Diventa quindi determinante stabilire se vi siano variazioni sensibili nella lunghezza delle baseline indotte da queste cambi di antenna. Usualmente, per la modellizzazione del PCV si utilizzano i parametri forniti dall'UNAVCO (http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL): tali parametri sono detti "relativi" per via della tecnica che viene utilizzata nello stimarli. Recentemente, la GEO++ ha stimato, utilizzando una differente metodica, i cosiddetti parametri "assoluti" del PCV (http://anton.geopp.de/gnpcvdb) che sono anche dipendenti dall'azimut (contrariamente a quelli "relativi" che dipendono solo dall'elevazione dei satelliti). Per verificare la affidabilità dei due diversi tipi di parametri, si è realizzato un apposito esperimento. Una base molto corta di 4 metri è stata monumentata su una struttura in cemento armato posta sul tetto del Politecnico di Milano. Nei due punti di questa base si è realizzato un centramento forzato per il montaggio delle antenne in modo da evitare segnali spuri legati allo stazionamento. Per una base di queste dimensione si può ritenere che l'impatto di fenomeni fisici correlati spazialmente (per

esempio quelli legati alla troposfera) sia del tutto trascurabile cosicchè le variazioni nella baseline possono essere direttamente collegate al cambio di antenna. Nel corso di tutte le prove effettuate, si è mantenuta fissa una antenna (MICROCENTERED L1/L2 TRIMBLE) mentre si sono montate antenne di diverso tipo all'altro estremo della base. Gli esperimenti fino ad ora condotti sono stati effettuati con tre differenti MICROCENTERED L1/L2 TRIMBLE e con una COMPACT L1/L2 TRIMBLE. Per ogni coppia di antenne si sono fatte osservazioni per quattro giorni consecutivi: l'analisi dei dati è stata fatta con il Bernese 4.2 utilizzando sia i parametri "relativi" che quelli "assoluti". Ciò che si è potuto verificare è che i parametri di tipo "relativo" forniscono risultati peggiori di quelli "assoluti" nel caso in cui si siano utilizzati tipi differenti di antenna. Infatti, usando le tre antenne MICROCENTERED non si sono avute variazioni significative della baseline, sia con i parametri "relativi" che con quelli "assoluti". Al contrario, si sono evidenziate variazioni sensibili (fino a 5 mm nella componente Z) nel caso di utilizzo dell'antenna COMPACT con analisi dati basata sull'utilizzo dei parametri "relativi". Tuttavia, nella stessa configurazione, non si hanno variazioni apprezzabili della baseline se, in fase di elaborazione, vengono utilizzati i parametri "assoluti". Dunque, da questi primi test appare abbastanza chiaro che per misure di alta precisione si possono effettuare cambi di antenna solo se nell'elaborazione dei dati si usano i parametri "assoluti" del PCV. Naturalmente, questo è solo un test preliminare che deve essere ulteriormente confermato. A tal fine sono in programma nuove sperimentazioni del tipo fin qui descritto con antenne ZEPHYR GEODETIC TRIMBLE e con una seconda COMPCACT L1/L2 TRIMBLE.
Inoltre, la UR del Politecnico di Milano ha sviluppato una ricerca volta a definire quale sia l'impatto delle correlazioni temporali tra soluzioni giornaliere di stazioni permanenti GPS nelle compensazioni di questi dati. E' noto infatti che siano presenti auto e cross correlazioni tra le componenti X, Y e Z delle soluzioni giornaliere. Ciò può essere direttamente verificato mediante la stima empirica di auto e cross correlazioni che mostrano l'esistenza di correlazioni fino a dieci-quindici giorni. Usualmente, però, queste correlazioni non vengono considerate nella stima delle soluzioni settimanali e nel calcolo dei parametri di velocità.
Ciò comporta una sovrastima delle precisioni delle soluzioni così ottenute che risultano essere troppo ottimistiche. Nel quadro del progetto GNDT, la UR del Politecnico di Milano, in cooperazione con l'Università "La Sapienza" e con l'INGV, ha definito un metodologia originale che permette di considerare tali correlazioni (R. Barzaghi et al., 2002). E' stato condotto un primo esperimento pilota utilizzando i dati di tre anni (1998, 1999, 2000) di quattro stazioni permanenti della rete ASI: Matera, Noto, Cagliari e Medicina. Le coordinate giornaliere di Medicina, Noto e Matera sono state derivate fissando le coordinate ITRF97 di Cagliari. La stima delle baseline giornaliere è stata effettuata in modo omogeneo per tutti e tre gli anni e per tutte le stazioni coinvolte utilizzando la procedura QIF del Bernese 4.2. Dopo aver rimosso un trend lineare sui tre anni si è proceduto alla stima delle auto e cross covarianze empiriche che sono state poi interpolate con opportune funzioni modello. Come primo passo, si è deciso di considerare solo le autocovarianze per semplicità di modellizzazione e trattamento dati. Ciononostante, si è potuto provare che l'impatto delle sole autocovarianze è comunque rilevante poiché gli s.q.m. delle quantità stimate sono più elevati di quelli che si ottengono trascurando le correlazioni. Come esempio, si può considerare quello della stima delle velocità (nei termini delle

componenti Nord, Est e Up) della stazione di Matera negli anni 1998 e 2000 (l'anno 1999 è stato scartato perché nel corso di quell'anno è stato effettuato un cambio di antenna).

	Stime 1998 (senza correlazioni)	Stime 1998 (con correlazioni)	Stime 2000 (senza correlazioni)	Stime 2000 (con correlazioni)
$V_{North\ (mm/y)}$	15.7±0.8	16.1±1.3	17.2±0.7	16.3±0.9
$V_{East\ (mm/y)}$	18.6±0.8	15.4±1.4	19.8±0.7	18.6±1.1
$V_{Up\ (mm/y)}$	3.4±3.4	3.4±1.4	0.1±3.1	2.1±1.1

Come si può notare, gli s.q.m. delle velocità stimate senza correlazioni sono molto piccoli nelle componenti piane e molto grandi nella quota. Il comportamento di queste stesse quantità è marcatamente differente nel caso in cui si considerino le correlazioni poiché gli s.q.m. sono molto più omogenei nelle tre componenti. Questa linea di ricerca sembra quindi promettente: nel prossimo futuro, si tenterà di includere nel modello stocastico usato per la compensazione anche le crosscovarianze tra le componenti in modo da considerare completamente tutte le correlazioni esistenti.
Infine, come già detto all'inizio, sarà presto monumentata una nuova stazione permanente GPS nell'area di Crotone (si veda la Fig. 1). Il sito GPS è stato definio in stretta collaborazione con le UR dell'Università di Milano e di Trieste. Questa stazione permanente GPS sarà realizzata seguendo standard qualitativi elevati, ponendo in stazione l'antenna su un pilastrino di cemento armato fondato su roccia (che nell'area si trova a 1-2 m al di sotto del piano di campagna). Inoltre, si realizzerà una piccola rete di livellazione geometrica nell'intorno del punto, così come fatto per la stazione permanente di Nocara. In tal modo si potranno evidenziare instabilità locali che devono essere separate dal segnale di tipo geodinamico.

Figura 1. Il sito scelto per la stazione GPS di Crotone.

Durante il secondo anno del progetto, si sono inoltre sviluppate ricerche di carattere geofisico condotte dalla UR dell'Università di Trieste, dedicate ad una piú accurata definizione del sistema litosfera-astenosfera nell'Arco Calabro (inclusi il mar Tirreno

meridionale ed il mar Jonio) ed al confronto dei risultati con i modelli geologici, geochimici e petrologici disponibili in letteratura.Le curve di dispersione delle velocità di fase e di gruppo contengono informazioni relative alla crosta ed al mantello superiore.
La tomografia delle onde di superficie è effettuata applicando l'algoritmo di Yanovskaya e Ditmar (1990). Mappe 2D dei dati di dispersione, discretizzati su una griglia di 1°x1°, sono state ottenute per periodi tra 10 e 100 s. Ogni cella di 1°x1° è caratterizzata da una curva caratteristica di dispersione di velocità di gruppo e di fase. L'inversione non-lineare porta, cella per cella, alla definizione di un modello strutturale medio. Un'interpretazione globale delle proprietà litosferiche ottenute è stata data tenendo in considerazione modelli geodinamici e petrologici, nonchè studi geochimici relativi alle province vulcaniche del Plio-quaternario. I risultati principali sono riassunti nelle figure allegate, ove sono state prese in considerazione tre sezioni particolarmente rappresentative.Nell'area centrale del mar Tirreno meridionale sono stati riconosciuti una Moho molto superficiale e, subito sotto il lid, una zona caratterizzata da onde S a bassa velocità in corrispondenza dei grandi edifici vulcanici (Magnaghi, Marsili and Vavilov) che caratterizzano il bacino, mentre velocità elevate delle onde S sono state evidenziate nella zona che separa Marsili da Magnaghi-Vavilov. In corrispondenza delle Isole Eolie, del Vesuvio, di Ischia e dei Campi Flegrei e dell'Etna è stato identificato uno strato di "mantle wedge", che rappresenta la sorgente dei rispettivi magmi provenienti dal mantello piú superficiale. Nel caso dell'Etna, questo strato è in accordo con l'ipotizzata presenza di una finestra astenosferica che alimenta il vulcano. Nell'area Calabra, risulta molto evidente il raddoppio litosferico, ed altrettanto evidente è la subduzione della litosfera Adriatica-Jonica al di sotto del Vesuvio e dei Campi Flegrei, e della litosfera Jonica verso Nord-Ovest, al di sotto del Tirreno Meridionale. All'interno della litosfera Jonica è stata rilevata la presenza di uno strato di velocità relativamente ridotta, che potrebbe essere ricondotto alla serpentinizzazione delle peridotiti durante la fase estensionale del Giurassico. I risultati principali di queste indagini sono descritti nelle tre figure, poste in coda al testo, nelle quali si analizzano tre sezioni.
Infine, la UR della Università degli Studi di Milano ha focalizzato la propria attività di ricerca sulla analisi generale delle modalità di arretramento della fossa di retro-arco durante il processo di subduzione di litosfera oceanica, e alla modellistica geofisica dei tassi di deformazione responsabili della sismicità registrata in prossimità delle principali regioni di subduzione, con l'obiettivo di applicare in una fase successiva tale metodologia allo studio della deformazione litosferica in prossimità dell'arco Calabro, dove evidenze geofisiche suggeriscono che l'arco arretri per puro collasso gravitazionale della litosfera subdotta nel mantello astenosferico, allo scopo di raggiungere un confronto della deformazione ricavata da tali modelli geodinamici con la deformazione geodetica ottenuta attraverso il sistema di stazioni GPS permanenti e non monumentate nell'area dell'Arco Calabro.
Durante questa fase iniziale della ricerca sono stati utilizzati modelli bidimensionali agli elementi finiti, sviluppati in pianta verticale, per studiare sia l'arretramento dell'Arco per collasso gravitazionale sia lo stile di deformazione nel cuneo di mantello sotto la litosfera sovracorrente. La deformazione del sistema litosfera-astenosfera durante la subduzione è determinata risolvendo, in una geometria cartesiana bidimensionale di forma rettangolare, il sistema accoppiato di equazioni per il bilancio

dell'energia e del momento per un fluido incomprimibile, con viscosità dipendente principalmente dalla temperatura. Il confronto fra i valori predetti dal modello per alcuni osservabili superficiali, quali il flusso di calore, la topografia e le anomalie gravimetriche in prossimità della fossa, con i corrispondenti valori osservati ha permesso la definizione di un modello termomeccanico generale per la subduzione oceanica di riferimento che potrà essere utilizzato per la applicazione all'Arco Calabro durante il secondo anno del progetto. Tale studio generale ha evidenziato, fra l'altro, il ruolo cruciale che ha l'innesco di un processo di arretramento della fossa nel controllare il successivo stile di deformazione della litosfera subdotta, sia a piccole che a grandi profondità. In particolare, un arretramento della fossa in superficie si riflette in profondità con una diminuzione della naturale verticalizzazione della litosfera subdotta, che impatta in maniera significativa la topografia, la anomalia gravimetrica e lo sforzo in superficie.L'attività di ricerca sviluppata durante questo primo anno di ricerca è risultata in una tesi di Laurea, già discussa nell'anno accademico 2001-2002 (Titolo: Modellizzazione Termomeccanica della Deformazione litosferica profonda in corrispondenza delle regioni di subduzione e implicazioni sul regime di sforzo superficiale; Tesista: Catia Rizzetto.); in una tesi in corso (Effetti della subduzione sul campo di gravità superficiale. Applicazione all'Arco Calabro; Tesista: Elisa Spelta); e in due manoscritti sottomessi per la pubblicazione su riviste internazionali:

Conclusioni

Durante il secondo anno del progetto, si è studiata e modellizzata la struttura geofisica dell'Arco Calabro.

I modelli così stimati saranno poi verificati mediante confronto con la deformazione ottenuta con il GPS che verrà ricavata sia dalla rete di stazioni permanenti che dalle reti GPS non permanenti.

Inoltre, sarà presto operativa una nuova stazione permanente GPS sita a Crotone che, assieme alle stazioni già esistenti di Nocara e Piano Lago (CS), permetterà di definire un modello di deformazione geodetica più preciso per tutto l'Arco Calabro.

Ulteriormente, si è studiata in dettaglio la metodologia di analisi dati GPS al fine di ottenere stime affidabili delle quantità di interesse. In particolare, si è quantificato l'impatto del PCV in misure di precisione, mostrando che la ripetibilità dei risultati può essere migliorata con l'uso dei parametri "assoluti" al posto di quelli "relativi". Infine, si sono studiati modelli stocastici in grado di considerare le correlazioni esistenti nelle soluzioni giornaliere di stazioni GPS permanenti: ciò ha permesso di ottenere stime realistiche delle precisioni con le quali sono stimate le velocità delle stazioni stesse.

Bibliografia

R. Barzaghi, A. Borghi, M. Crespi, G. Pietrantonio, F. Riguzzi, 2002. GPS permanent network solution: the impact of temporal correlations. Hotine-Marussi Symposium on Mathematical Geodesy, Matera, 17-21 June 2002. Submitted for publication in the Proceedings of the meeting.

Bowin, C., Warsi, W., and Milligan, J., 1981. Free-Air gravity anomaly map of the world. Woods Hole Oceanographic Istitution, Woods Hole, Massachussetts 02543. Published by The Geological Society of America.

Della Vedova, B., Marson, I., Panza, G.F., and Suhadolc, P., 1991. Upper mantle properties of the Tuscan- Tyrrhenian area: a framework for its recent tectonic evolution. Tectonophysics, 195: 311-318.

Doglioni, C., Innocenti, F., and Mariotti, G., 2001. Why Mt. Etna? Terra Nova, 13: 25-31.

Gvirtzman, Z., and Nur, A., 1999. The formation of Mount Etna as the consequence of slab rollback. Nature, 401: 782-785.

Marson, I., Panza, G.F., and Suhadolc, P., 1995. Crust and upper mantle models along the active Tyrrhenian rim. Terra Nova, 7: 348-357.

Mongelli, F., Zito, G., Castaldi, G., Celati, R., Della Vedova, B., Fanelli, B., Nuti, M., Pellis, G., Squarci, P., and Taffi, L., 1991. Geothermal regime of Italy and surrounding seas. In: Terrestrial heat flow and the lithosphere structure. Cermak V. and Rybach L. eds, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1991.

Yanovskaya T.B. and Ditmar P.G. (1990). Smoothness criteria in surface-wave tomography. Geophys. J. Int., 102, 63-72.

M. Marotta and C. Rizzetto, 2002. The role of rool-back on the style of subduction. Submitted to Tectonics.

A. M. Marotta and R. Sabadini, 2002. Strain Rate in Europe and the signature of tectonics and Glacial Isostatic Adjustment. Submitted to Earth and Planetary Science Letters.

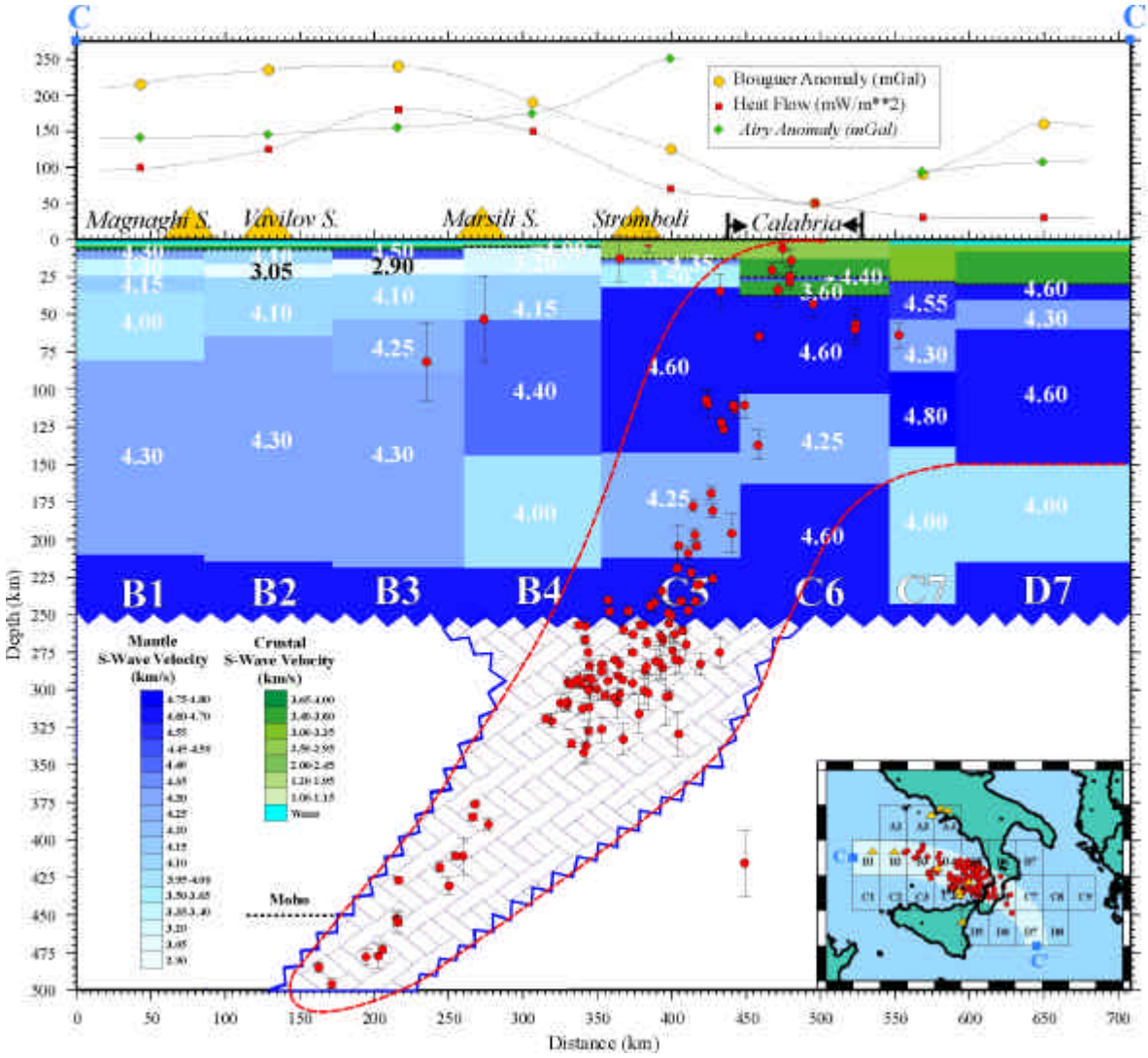

Figura 2 Sezione verticale lungo GC', estesa fino a 500 km di profondità. La sismicità superficiale, intermedia e profonda definita nel catalogo ISC, con le relative barre d'errore, è stata sovrapposta alla sezione. Gli eventi appartengono ad una banda larga circa 100 km centrata lungo il profilo GC', indicata in azzurro chiaro nella pianta. La linea rossa tratteggiata evidenzia lo slab. I valori medi del flusso di calore (Della Vedova et al., 1991; Mongelli et al., 1991), dell'anomalia di Bouguer (Marson et al., 1995) e dell'anomalia di Airy (Bowin et al., 1981) sono mostrati nella parte superiore della figura (la scala in corsivo, sulla destra, è per l'anomalia di Airy). Da Est ad Ovest i triangoli identificano la posizione degli edifici vulcanici di Magnaghi-Vavilov, Marsili e Stromboli. Nella pianta, sono anche evidenziate le posizioni dei vulcani attivi nell'area tirrenica.

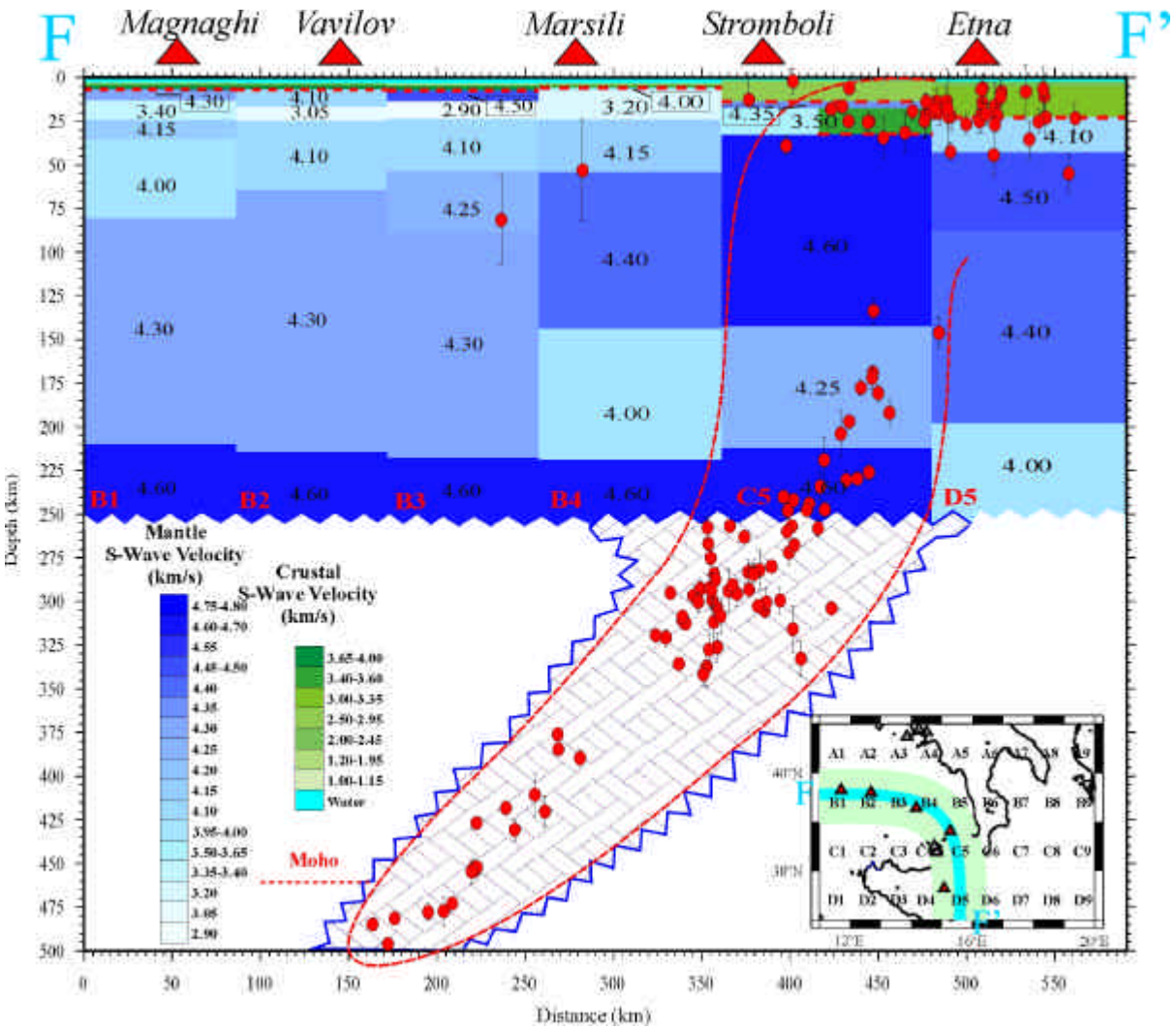

Figura 3 Sezione verticale lungo FF', estesa fino a 500 km di profondità. La sismicità superficiale, intermedia e profonda definita nel catalogo ISC, con le relative barre d'errore, è stata sovrapposta alla sezione. Gli eventi appartengono ad una banda larga circa 100 km centrata lungo il profilo FF', indicata in azzurro chiaro nella pianta. La linea rossa tratteggiata evidenzia lo slab. Parte dello strato "Janus" nella cella C5 è assegnata alla crosta e parte al mantello in base alla distribuzione della sismicità. Da Est ad Ovest i triangoli identificano la posizione degli edifici vulcanici di Magnaghi-Vavilov, Marsili e Stromboli ed Etna. Nella pianta, sono anche evidenziate le posizioni dei vulcani attivi nell'area tirrenica (in rosso quelli attraversati dalla sezione F-F'). Il quadro riproduce bene le caratteristiche principali dello schema proposto da Doglioni et al. (2001).

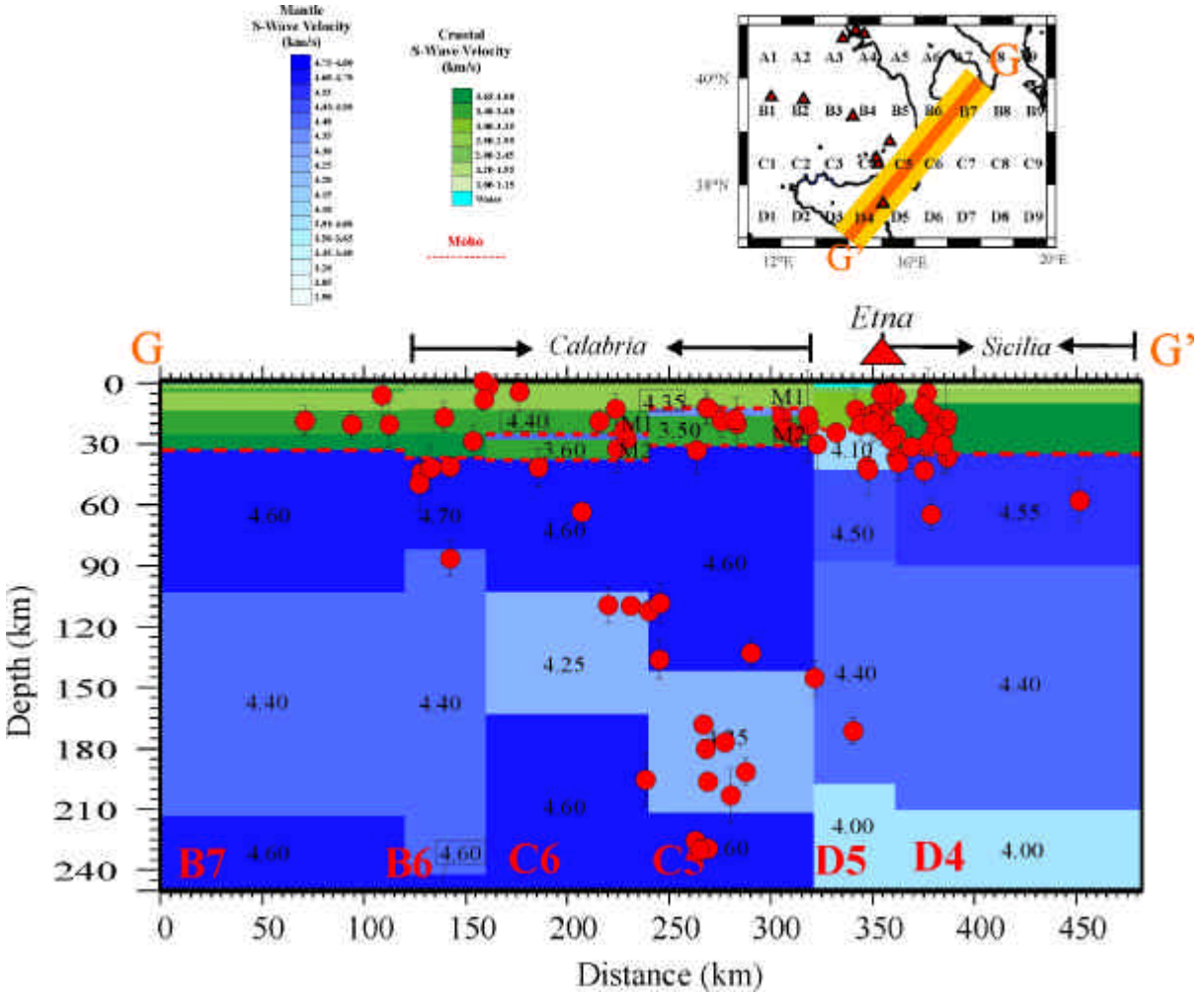

Figura 4 Sezione lungo GG'. La sismicità superficiale, intermedia e profonda definita nel catalogo ISC, con le relative barre d'errore, è stata sovrapposta alla sezione. Gli eventi appartengono ad una banda larga circa 100 km centrata lungo il profilo GG'. Il triangolo indica la posizione dell'Etna. Nella pianta, sono anche evidenziate le posizioni dei vulcani attivi nell'area tirrenica. Il quadro riproduce bene la finestra astenosferica nella cella D5 in corrispondenza del volcano Etna, in accordo con quanto proposto da Gvirtzman and Nur (1999), ma esclude il possible flusso di mantello ad Est della Calabria.