

Terremoti probabili in Italia tra il 2000 e il 2030: elementi per la definizione di priorità degli interventi di riduzione del rischio sismico

Coordinatori: A. Amato e G. Selvaggi

Introduzione

Il rapporto dell'attività svolta nel secondo anno del progetto è suddivisa nei tre gruppi di lavoro in cui è articolato il progetto. Per gli approfondimenti metodologici e per una descrizione dei risultati si rimanda agli allegati. Gli obiettivi dei singoli gruppi per il secondo anno di attività sono riassunti di seguito:

GdL 1

Approfondimento su sorgenti in aree poco note e loro formalizzazione (task 1.1).
Analisi del ruolo dei livelli informativi di nuova introduzione (task 1.1).
Preparazione input calcoli di pericolosità (task 1.1).
Ricerche storiche in aree di lacuna (task 1.1 e 1.2).
Approfondimento punti di intensità critici per terremoti significativi (task 1.2).
Rivalutazione intensità macrosismiche a partire da dati nuovi (task 1.2).
Stima delle deformazioni geodetiche in Sicilia e in Appennino meridionale (task 1.3).
Stima del campo di deformazione sismica (task 1.3).
Deformazione verticale dall'analisi di linee di livellazione e dati geologici (task 1.3).
Selezione nuove lacune sismiche (task 1.4).
Analisi dati sismologici e geologici nelle aree di lacuna (task 1.4)
Interferogrammi differenziali e mappe di coerenza (task 1.4)

GdL 2

Catalogo strumentale integrato 1981-2000 (task 2.1)
Relazioni empiriche Md-MI (task 2.1)
Modelli 3D di velocità regionali e modello di attenuazione (task 2.1)
Database tempi di arrivo P delle linee sismiche a rifrazione 1968-2002 (task 2.2)
Modelli Vp 2-D con parametrizzazione minima e primi modelli 3-D regionali (task 2.2)

GdL 3

Calcolo leggi di attenuazione in Italia (task 3.1)
Valutazione modello attenuazione anelastica crostale e di k (task 3.1)
Stima della durata dello scuotimento efficace e di picco (task 3.1)
Informatizzazione e catalogazione schede per effetti della geologia locale (task 3.2)
Definizione geometrie bacini in lacuna sismica (task 3.2)
Stima degli effetti della geologia di superficie sull'hazard a scala nazionale (task 3.2)
Modellazione numerica degli effetti della geologia locale sullo scuotimento in aree di potenziale lacuna (task 3.2)
Analisi relazione terremoti e maremoti generati (task 3.3)
Zonazione Tsunamigenica dei mari italiani (task 3.3)
Ricerca e sistemazione dati batimetrici fascia costiera (task 3.3)
Creazione griglie preliminari per simulazione numerica (task 3.3)
Simulazione casi campione e preanalisi di massimi d'onda (task 3.3)
Analisi di dettaglio in aree campione (task 3.4)
Validazione dei modelli proposti con l'insieme dei dati osservativi (task 3.4)
Formulazione di un modello integrato (task 3.4)

GdL 1: Il modello della sismogenesi in Italia

L'attività del GdL 1 ha avuto come obiettivo per il secondo anno la stima delle deformazioni geodetiche in Italia peninsulare, il loro confronto con le deformazioni sismiche, l'analisi di nuove sorgenti sismogenetiche e l'approfondimento di alcune di quelle già individuate attraverso nuovi dati geomorfologici e/o storici. Inoltre, il gruppo di lavoro ha continuato l'attività di identificazione e studio delle potenziali lacune sismiche. Il modello della sismogenesi in Italia deriverà dall'integrazione dei suddetti dati di base.

E' stata inoltre impostata una nuova zonazione a partire dall'analisi critica delle precedenti zonazioni sismotettoniche, usando il DISS e le informazioni sulla sismicità storica e strumentale, che sarà utilizzata per stime di hazard di tipo convenzionale.

Approfondimento su sorgenti selezionate in aree poco conosciute (task 1.1-1.2)

Il catalogo DISS, la cui versione definitiva è stata distribuita nel dicembre 2001, costituisce il primo obiettivo strategico del Task 1.1. Il Database è stato distribuito su supporto CD e pubblicato su di un supplemento di *Annali di Geofisica*, che ne riassume le caratteristiche essenziali e le modalità di funzionamento (Vol. 44, 4, 2001, G. Valensise and D. Pantosti, eds.).

Il Database è costituito da sessanta sorgenti sismogenetiche supportate da dati di tipo geologico, storico e geofisico. Quattordici di queste sorgenti sismogenetiche non hanno un terremoto storico associabile e sono pertanto riconducibili a potenziali "lacune sismiche" la cui identificazione rappresenta un obiettivo scientifico primario dell'intero progetto.

Nel corso del 2002 sono state realizzate da parte del task 1.1 e 1.2 ricerche volte sia all'identificazione di nuove sorgenti sismogenetiche, sia all'approfondimento delle conoscenze su sorgenti precedentemente individuate. Si riassumono di seguito i più importanti risultati:

Nuove sorgenti sismogenetiche da studi geologici, geomorfologici e storici

Alta Val Tiberina. Sono state proposte due nuove sorgenti relative ai terremoti del 1917 (Monterchi-Citerna, Me 5.9) e 1789 (Val Tiberina, Me 5.6).

Valle Umbra. Sono state proposte tre sorgenti sismogenetiche responsabili dei terremoti di Foligno (1832, Ma 5.1), Bastia (1854, Me 5.6) e Montefalco (1878, Me 5.3).

Terremoto del Molise. Sono state inserite nuove sorgenti per i due terremoti del 31 ottobre (Mw 5.4) e 1 novembre 2002 (Mw 5.3), vincolate dai dati strumentali.

Revisione di sorgenti sismogenetiche precedentemente individuate

Sorgente di Orzinuovi. Una revisione del campo macrosismico del terremoto di Soncino del 1802 (Me 5.9) e un riesame dei rapporti tra geologia del sottosuolo e geomorfologia hanno consentito di migliorare la sorgente già proposta nel DISS 2.0 (Albini et al., 2002).

Sorgente di Mirandola (lacuna sismica?). Ciucci et al. (2002) hanno approfondito la ricerca sulla struttura tettonica responsabile delle anomalie del drenaggio relative ai fiumi Secchia e Panaro. L'integrazione tra dati di sottosuolo e osservazioni geomorfologiche ha permesso di vincolare meglio la posizione e la geometria della sorgente e di stimare uno slip rate di circa 1.7 mm/y. Burrato et al. (2003) discutono questa sorgente nel quadro della sismogenesi della Pianura Padana.

Area costiera marchigiana (lacune sismiche?). Vannoli et al. (2003) hanno svolto un'analisi geomorfologica per identificare e caratterizzare le strutture tettoniche costiere situate tra Rimini e Ancona. L'analisi del drenaggio e di terrazzi fluviali e costieri deformati ha consentito di caratterizzare meglio la geometria e la segmentazione di faglie precedentemente identificate e di confermare la presenza di due potenziali "lacune sismiche". Vannoli et al. stimano in 0.2-0.4 mm/y lo slip rate medio delle faglie del sistema.

Bacino di Gubbio (lacuna sismica?). Pucci et al. (2003) hanno apportato nuovi contributi alle conoscenze sulle sorgenti sismogenetiche dell'area tramite rilievi di campagna, analisi di foto aeree ed elaborazioni di DEM. L'analisi svolta, integrata con recenti dati sismologici, evidenzia come il segmento a basso angolo della faglia di Gubbio sia composto da due distinte sorgenti sismogenetiche in grado di produrre terremoti di M 5.3-5.9. Mentre la più meridionale delle due è ritenuta la sorgente del terremoto del 1984, la seconda è stata identificata come potenziale "lacuna sismica".

Ricerche storiche su aree di potenziale lacuna: l'Alta Val Tiberina

I risultati ottenuti finora, sebbene preliminari (Castelli, 2002) forniscono una evidenza interessante di alcuni terremoti distruttivi sconosciuti, la cui localizzazione e dimensione deve ancora essere approfondita con ulteriori analisi e possibilmente nuovi dati. Uno dei risultati principali è l'evidenza di un terremoto distruttivo nel 1558, emerso recentemente e ora confermato come un evento che ha danneggiato Città di Castello. Tracce di alcuni altri forti terremoti sono stati trovati nelle valli dell'Arno e del Tevere nei secoli XIII, XV, XVI e XVII e sono attualmente oggetto di ulteriori ricerche.

Deformazioni geodetiche (task 1.3)

E' stata conclusa l'analisi dei dati GPS acquisiti nel 2001 e nel 2002 sui monumenti IGM in Italia peninsulare e determinati i tassi di shear strain in un intervallo di 126 anni (Hunstad et al., 2003). I risultati mostrano che:

- il processo dominante in Appennino è estensione in direzione NE-SW;
- il segnale geodetico lungo la fascia tirrenica e adriatica è paragonabile con l'errore associato alle misure, fatta eccezione per il Gargano;
- *shear strain* in Appennino sono dell'ordine di $0.5-1 \cdot 10^{-7} \text{ yr}^{-1}$. Tale *strain*, se integrato attraverso la fascia appenninica fornisce stime del tasso di estensione dell'ordine di 2.5-5.0 mm/yr con incertezze di circa 1-1.5 mm/yr;
- I valori di *shear strain* geodetici sono stati confrontati con gli *strain* sismici osservati nello stesso intervallo temporale delle stime geodetiche. Il confronto mostra che esiste una ottima corrispondenza nelle direzioni degli assi principali dei tensori di *strain* geodetico e sismico. Il valore però differisce sensibilmente suggerendo che in Appennino si è accumulato uno *strain* elastico importante. Estendendo il confronto su una scala temporale maggiore (700 anni di deformazione sismica) si osserva che, in Appennino, a lungo termine solo il 25% della deformazione geodetica è rilasciata da terremoti.

In ultimo, nell'autunno 2002 sono stati misurati i 14 vertici IGM in Sicilia. I risultati mostrano un consistente pattern delle deformazioni geodetiche negli Iblei con tassi di deformazione dell'ordine di $1-2 \cdot 10^{-7} \text{ yr}^{-1}$.

E' stato concluso il lavoro sulle linee di livellazione, che fornisce un limite superiore dei movimenti verticali attraverso l'Italia.

In generale, i risultati forniscono principalmente un vincolo tettonico e si integrano con il catalogo DISS per una visione comprensiva della deformazione attiva in Italia.

Studi sulle potenziali lacune sismiche (Città di Castello, Val d'Agri, Melandro-Pergola) (task 1.4)

Nelle aree campione considerate potenziali lacune sismiche (Alta Val Tiberina, Appennino campano-lucano) sono state condotte specifiche ricerche di dettaglio al fine di una caratterizzazione geometrica, strutturale e deformativa. In particolare:

- Studi sul substrato dei bacini attraverso dati di geoelettrica e stratigrafici da pozzi
- Caratteristiche sismotettoniche e cinematiche da revisione e analisi di dati sismici storici, strumentali, meccanismi focali, linee sismiche a riflessione
- Accumulo di *strain* elastico attraverso immagini InSAR

La sismicità storica si ubica in corrispondenza delle "lacune" di sismicità strumentale; quest'ultima si distribuisce nelle aree orientali rispetto al Bacino Tiberino. La distribuzione spaziale delle sequenze di Sansepolcro sono localizzate a NE del Bacino. Al momento le nostre ipotesi di lavoro sono:

1. Per analogia con l'area meridionale, lungo il bacino s'ipotizza una struttura posta sul bordo orientale orientata N130-160 con dip compreso tra 40° e 60° W immergente a cinematica distensiva. La lunghezza della struttura viene ipotizzata tra 10 e 15 km e ubicata in posizione più interna rispetto al bacino, senza arrivare in superficie, e capace di generare eventi di M massima pari a 6.

2. Gli studi sulla "Faglia Alto-Tiberina" ci portano a supporre sul bordo occidentale una struttura a direzione articolata con un dip di ~ 20° e un'estensione di ~15 km, in grado di generare eventi minori.

Per la Val d'Agri la struttura tettonica più importante sembra essere posta sul bordo orientale del bacino a vergenza tirrenica, ma non si possono escludere eventi anche sulla struttura posta sul lato opposto evidenziata dagli studi sulle sequenze sismiche.

Per il Melandro-Pergola si presuppone una struttura appenninica sub-verticale adriatico-vergente, a cinematica distensiva, posta sul bordo W del bacino.

Sono stati realizzati interferogrammi differenziali (14 per Città di Castello, 5 per la Val d'Agri) compresi tra il 1992 e il 2002 al fine di fornire uno stack per minimizzare il contributo atmosferico. E' stato realizzato un DEM con risoluzione di 20m per eliminare il residuo dovuto al contributo topografico nelle immagini InSAR. I risultati mostrano delle frange differenziali residue interpretabili come segnale e che verranno analizzate nel prossimo anno.

Con l'ausilio di software GIS sono stati sovrapposti i dati sismologici e i dati SAR alla cartografia digitale con lo scopo di integrare il contenuto informativo delle singole tecniche e dei differenti tipi di dato.

Per quanto riguarda lo studio di nuove aree di lacuna si è deciso, nell'ultimo anno di progetto, di non intraprendere nuove ricerche ma di approfondire le due aree selezionate estendendo le indagini anche alle zone limitrofe. Il motivo di tale scelta è legato sia al fatto che sono stati acquisiti nuovi dati, ancora da analizzare, ma anche per le potenzialità che gli studi finora eseguiti hanno mostrato.

Elementi generali verso una nuova zonazione sismica convenzionale (task 1.2)

Come prodotto collaterale di questo GdL, abbiamo avviato la messa a punto di una zonazione sismogenetica originale: a) consistente con le conoscenze più aggiornate

della tettonica attiva e con DISS, b) in cui la dimensione delle zone sia tale che il numero dei terremoti in ciascuna zona rappresenti un campione affidabile per valutazioni statistiche. Come primo passo la zonazione ZS4, ancora usata, è stata rivista definendo una nuova zonazione ZS6, ottenuta riducendo il numero di ZS da 80 a 25, principalmente unendo ZS adiacenti con comportamento simile, ma senza ancora modificarne la geometria originale. Inoltre il catalogo CPTI (che non dovrebbe essere usato con ZS4 poichè i due hanno un differente background) è compatibile con la nuova zonazione. Per ogni nuova zona sismica sono stati determinati i relativi intervalli di completezza basati sulle evidenze storiche. Il passo successivo è stata la realizzazione di un prototipo di ZS9, dove le zone sismiche sono disegnate adottando nuovi criteri (ad esempio la Mmax). ZS9 è stato definito per l'Italia nord-orientale mentre è stata predisposta una prima bozza per l'intero territorio italiano (Stucchi et al., 2002).

GdL 2: Sismicità recente, modelli di velocità, attenuazione

L'attività del gruppo di lavoro 2 aveva come obiettivo per il secondo anno di lavoro la realizzazione di un catalogo strumentale integrato fino al 2000 e la definizione di modelli tridimensionali di velocità della crosta con relativi test di risoluzione. Parallelamente (task 2.2), un obiettivo importante era la creazione del database dei tempi di arrivo delle sezioni sismiche a rifrazione acquisite sul territorio nazionale dal 1968 ad oggi e la loro integrazione negli studi sul modello di velocità tridimensionale.

Catalogo strumentale 1981-2002 e modelli di velocità (task 2.1-2.3)

Il catalogo strumentale realizzato in ambito del progetto copre il periodo 1981-2002 e comprende il maggior numero possibile di localizzazioni, magnitudo (durata) e tempi di arrivo di fasi P e S per terremoti avvenuti nella regione Italiana. Il catalogo contiene più di 73,000 terremoti localizzati e più di 700,00 fasi P e 600,000 fasi S registrate sia dalla rete nazionale dell'INGV che dalle principali reti sismiche permanenti regionali e locali (OGS-CRS, Univ. Genova, Resil Umbria, Rete Reg. Abruzzo (SSN), Rete regionale Marche, Univ. Cosenza, reti ENI-AGIP, rete INGV-OV, INGV-CT). Le localizzazioni sono state ottenute in maniera omogenea usando il codice Hypoellipse. Per ogni stringa evento viene fornita, oltre ai parametri ipocentrali, la stima degli errori, del valore finale dell'rms di localizzazione, del gap azimuthale e del numero di fasi usate per la localizzazione. Tali parametri sono ovviamente importanti per effettuare selezioni di qualità sui terremoti del catalogo.

In particolare per il periodo 1981-1996 sono state usate le fasi e le associazioni del catalogo GNDT 1981-1996. Il catalogo comprende 39723 terremoti registrati a un totale di 467 stazioni. Per il periodo 1997-2002 sono state determinate nuove associazioni degli eventi, consistenti con quelle originarie dei bollettini delle diverse reti. Sono state controllate le associazioni sia prima che dopo la localizzazione verificando i terremoti che avevano valori di residuo superiori ad una predeterminata soglia. Il data set finale di questo periodo comprende 32644 terremoti localizzati, registrati a un totale di 411 stazioni sismiche. Infine è in corso lo sviluppo delle procedure per mettere in rete e per rendere facilmente consultabile il catalogo.

A partire dai dati del suddetto catalogo, sono stati calcolati modelli di velocità 3D per la crosta ed il mantello superiore della regione Italiana.

Usando una selezione di 24246 tempi di arrivo a 717 stazioni sismiche, l'inversione

permette di ottenere una risoluzione molto alta delle immagini tomografiche. La riduzione di varianza è considerevole (~50%) e il valore finale di rms è inferiore a 0.5 s.

La risoluzione dei modelli di velocità è di circa 15 km in x e y in 2 strati crostali (8, 22 km) e in 4 strati del mantello superiore (38, 52, 66, 80 km). Il modello permette quindi una maggior definizione delle anomalie in una zona più ampia di quanto precedentemente modellato da Di Stefano et al., 1999. Il modello ottenuto fornisce un quadro geometrico delle strutture profonde che contribuisce alla comprensione della tettonica attiva nella penisola italiana. È in corso di analisi la localizzazione dei terremoti dell'intero catalogo con il modello tridimensionale.

Parallelamente alla diffusione del nuovo catalogo sismico integrato, è stata realizzata la banca dati in linea delle forme d'onda originali della Rete Sismica Nazionale Centralizzata dal 1988 ad oggi. Attualmente, il catalogo delle forme d'onda è consultabile al sito <http://waves.ingv.it>, da dove è possibile fare un *download* dei parametri ipocentrali degli eventi localizzati, dei tempi di arrivo e delle forme d'onda. Tramite il catalogo delle forme d'onda dei terremoti è in fase di studio la possibilità di calcolare in modo automatico e omogeneo le durate del segnale al fine di ottimizzare le regressioni empiriche tra durata e Ml.

Modelli crostali 2-D e 3-D nell'area italiana da dati di sismica attiva (task 2.2)

Durante il secondo anno di attività svolta nell'ambito del progetto, è stato completato il picking dei tempi di primo arrivo delle onde P individuati sulle sezioni sismiche a rifrazione che sono state acquisite nel territorio italiano dal 1968 ad oggi e la costruzione del database contenente tali tempi di arrivo e altre informazioni relative a ciascun profilo.

In particolare sono stati eseguiti i picking dei tempi di arrivo su 419 sezioni sismiche registrate lungo le linee relative ai seguenti progetti: Sicilia 72, Etna 77, Sicilia 80, Sicilia 84, Puglia 72, Calabria 70, Calabria 72, Calabria 79, Tirreno 71, Appennini 74, Toscana 78, Bolsena, DSS79-80, Crop03, Umbria 81-84, Btp 91, Sardegna 82, Ecors 85, Ecors 87, Alp 75, Friuli 78, Sudalp 77, Appennini 83-85, EGT 83, EGT 86, Appennini 87, Bardi 87, Lisa, Cropmare 94, Tomoves 94 e Tomoves 96. Delle 419 sezioni che sono state analizzate, 40 erano state acquisite in configurazione fan.

Alcuni dei dati contenuti nel set di dati sono sezioni a rifrazione (WARR) ad elevata densità, come per esempio i dati relativi ai progetti Lisa e Cropmare. Queste sezioni sono state acquisite nel 1994 congiuntamente con i dati a riflessione quasi verticale (NVR) per mezzo di stazioni sismiche a 3 componenti ubicate lungo la costa italiana. Le sezioni sismiche relative agli altri esperimenti erano state registrate per mezzo di strumenti analogici e quindi sono state successivamente digitalizzate e controllate dall'ex Istituto del CNR, IRRS, (Biella et al., 1994; Osculati et al., 1995; Ferrari et al., 1998; Corsi 1999a; Corsi 1999b) e recentemente processate dall'Istituto IDPA.

L'individuazione dei tempi di primo arrivo delle fasi P è stata eseguita manualmente utilizzando un algoritmo che è stato implementato in ambiente Matlab (vedi allegato al task 2.2).

Sulle sezioni DSS e WARR che sono state analizzate sono stati identificati 11820 tempi di primo arrivo di onde P, che sono stati inseriti nel database con gli errori ad essi associati, le funzioni 1D velocità-profondità calcolate per ciascun profilo ed altre

caratteristiche importanti di ogni sezione sismica. Il database è stato realizzato mediante il software Microsoft Access.

I tempi di arrivo che sono stati correlati sono fasi Pg e Pn relative a onde di penetrazione rispettivamente nella crosta superiore e nel mantello superiore e l'errore medio è 0.025 s.

Per ciascuna curva tempo-offset inserita nel database è stato calcolato un modello di velocità monodimensionale. Le funzioni velocità-profondità sono state determinate usando tre diversi metodi di modellazione: un modello che assume un gradiente di velocità costante, un modello con gradiente di velocità variabile e un modello a strati. Al fine di effettuare analisi tomografiche sia a scala regionale sia locale, sono stati determinati i modelli monodimensionali di velocità medi relativi ad alcune aree, che potrebbero costituire il modello iniziale per l'inversione tomografica. In questo caso sono stati calcolati soltanto i modelli a gradiente costante e variabile, che sono stati ottenuti sia invertendo la dromocrona media relativa all'area, sia mediando le funzioni velocità-profondità associate a ciascun profilo della stessa area. Infine, le fasi Pg e Pn del catalogo sono state integrate con il catalogo strumentale e sono in corso inversioni congiunte dei due dataset.

GdL 3: Leggi di attenuazione, effetti della geologia locale, modelli di pericolosità

Il lavoro svolto dal gruppo di lavoro 3 ha riguardato la determinazione delle leggi di attenuazione regionali del moto del suolo, degli effetti della geologia a scala nazionale, dei modelli di pericolosità sismica "time dependent" e della pericolosità dei maremoti.

Leggi di attenuazione regionali (task 3.1)

Considerato che le caratteristiche delle propagazione crostale non cambiano all'aumentare della magnitudo, e che registrazioni *strong-motion* vengono effettuate molto di rado, abbiamo utilizzato la grande mole di registrazioni *weak-motion* che proviene dal monitoraggio della sismicità di fondo per quantificare le leggi di attenuazione per il *ground motion* a scala regionale.

Le regressioni sono state effettuate su data sets molto importanti di registrazioni *weak-motion*, sia sui valori di picco delle forme d'onda filtrate passabanda, sia sulle ampiezze di Fourier (Malagnini et al., 2000, 2002). I dettagli metodologici sono illustrati nell'allegato al task 3.1.

Insieme ai valori di picco ed alle ampiezze di Fourier viene quantificata, in tutte le bande di frequenza, la durata dello scuotimento significativo in funzione della distanza ipocentrale. Quest'ultima informazione è utilizzata, attraverso lo strumento della Random Vibration Theory (RVT) per modellare i valori di picco in funzione di frequenza e distanza ipocentrale, ovvero per ottenere stime di PGA, PGV, PSA.

Le regioni investigate nel 2002 sono le Alpi Orientali ed Occidentali (Malagnini et al., 2002a,b, Morasca et al., 2002, per un totale di 18,000 forme d'onda da 1800 eventi, e ~6,000 registrazioni da 962 terremoti, rispettivamente), Sicilia Orientale (117 eventi, 1420 serie temporali, Scognamiglio et al., 2002) e l'Appennino Centrale (circa 521 eventi, 8079 sismogrammi, selezionati per il momento da un set di dati di circa 2000 terremoti e ~60000 forme d'onda disponibili). Alcune ricerche svolte nella regione dell'Appennino Centrale sono state effettuate in collaborazione con il progetto GNDDT

“Sviluppo e confronto di metodologie per la valutazione della pericolosità sismica in aree sismogenetiche: ...” (coord. M. Cocco).

Per quanto riguarda un'altra regione d'Italia che si intendeva studiare, la Garfagnana, sono stati selezionati 605 eventi, per un totale di circa 3000 sismogrammi. Il preprocessamento è stato effettuato e i risultati saranno disponibili nel terzo anno.

Effetti della geologia di superficie a scala nazionale (task 3.2)

Rispetto ai tre obiettivi previsti per questo task, l'attività si è svolta come descritto nel seguito:

1) Le schede inviate ai Comuni italiani nel primo anno sono già state compilate per una percentuale pari a circa il 23% del totale, una parte di esse è stata trasmessa all'INGV direttamente via Internet, una parte tramite posta su supporto cartaceo. E' stata sviluppata una pagina web interattiva per la raccolta online dei dati, che consente ai tecnici dei Comuni di compilare il questionario direttamente online. In questo modo il materiale è subito archiviato in un data base, in cui verranno successivamente inseriti i dati dell'archivio cartaceo.

2) Utilizzando la carta geologica 1:500.000, le litologie affioranti sono state suddivise in tre delle classi previste dall'EC8 (terreni di tipo A, B, e C, corrispondenti rispettivamente a roccia, sedimento consolidato e sedimento inconsolidato). Si è effettuata una zonazione geologica del territorio nazionale sulla base delle tre classi, usando un grigliato di 250 metri. E' stata messa a punto una procedura che, partendo da una mappa di hazard di PGA “hard rock” a scala nazionale (periodo di ritorno 475 anni), costruisce lo spettro di risposta elastico EC8 (pseudo-accelerazione) sul grigliato prestabilito tenendo conto della classificazione dei terreni di superficie. Attraverso gli spettri EC8 così costruiti, per ogni punto della griglia vengono calcolati i seguenti parametri di hazard : PGA, intensità di Housner, valore dello spettro di risposta a 0.3, 1 e 2 sec. A titolo di esempio, la figura mostra la variazione che si osserva nell'intensità di Housner quando in una mappa a scala nazionale si considera la geologia affiorante.

Per valutare criticamente i risultati prodotti, si è innanzitutto effettuato un confronto con carte geologiche di maggiore dettaglio (1:10000 e 1:5000).

Utilizzando il metodo del *Confusion Matrix* si è verificato che l'imprecisione nei limiti geologici derivante dalla scala 1:500.000 è intorno al 20% per i terreni di tipo B + C, ma può raggiungere il 40% per i terreni di tipo A. Inoltre, considerati separatamente, i terreni di tipo B e C appaiono spesso intercambiabili. Ci si propone ora di effettuare un secondo test, ben più importante, per valutare quanto nella pratica sia corretto incrementare il livello di protezione sulla base di una stima che prescindendo da indagini su scala locale. Sono state prese in considerazione le mappe di intensità di alcune aree (Friuli, Irpinia, Umbria-Marche, Lazio-Abruzzo) per verificare se dai piani quotati emergano anomalie di cui si possa trovare riscontro nelle stime teoriche.

3) Tra le aree di lacuna, si è lavorato sulla zona Città di Castello – San Sepolcro. Si sono ricostruiti due profili attraverso la Val Tiberina per tener conto delle variazioni in larghezza e profondità della valle stessa. Si è anche predisposta una procedura che, seguendo l'approccio di Pergalani et al. (2000) calcola l'incremento dello spettro di

risposta a probabilità uniforme dovuto alla colonna stratigrafica al sito. Le modellazioni numeriche e il calcolo dei parametri di hazard sono in corso.

Pericolosità per i maremoti (task 3.3)

Il gruppo di lavoro del Task 3.3, composto da INGV e Università di Bologna, si occupa della realizzazione di una carta di pericolosità per i maremoti. Una delle aree più interessanti dal punto di vista tsunamigenico è quella della Sicilia orientale e delle coste tirreniche della Calabria, dove si è concentrata l'attività del secondo anno. Il gruppo ha portato a termine il reperimento di dati batimetrici e geomorfologici per la fascia costiera oggetto di studio e ha provveduto alla digitalizzazione di gran parte del materiale raccolto. È stato portato a termine uno studio dettagliato del maremoto del 1693 per esaminare l'impatto che un evento analogo avrebbe oggi nella stessa area. In particolare è stata fatta una ricostruzione storica accurata dell'urbanizzazione delle località costiere coinvolte, allo scopo di definire la reale mappa di inondazione. Sulla base della ricostruzione e utilizzando mappe tematiche del territorio attuale (mappe catastali, piani regolatori generali, carte dell'Agro, piani territoriali paesistici, ecc.) sono state individuate le strutture che possono essere definite "punti deboli" in caso di un'inondazione paragonabile a quella del 1693.

Parallelamente, il gruppo di lavoro si è occupato della simulazione di maremoti nello stretto di Messina e dello studio di metodi per il calcolo del run-up e del draw-dawn di onde generate da terremoti. Nel primo caso è stato preso in esame il maremoto di Messina del 1908 effettuando ricerche sulla faglia sorgente. Sono state portate a termine simulazioni numeriche del maremoto in una nuova griglia numerica a maglie triangolari per mezzo di un codice di mesh building sviluppato in loco. I risultati mostrano che una faglia sorgente che si prolunga a sud dello stretto nello Ionio almeno fino alla latitudine di Giardini Naxos produce infatti un maremoto più compatibile con le osservazioni (Tinti ed Armigliato, 2003). Questa conclusione conferma studi precedenti condotti sul maremoto dagli stessi autori (Tinti e Armigliato, 2001) e studi recenti compiuti sull'analisi congiunta di dati sismologici e geodetici. Un ulteriore importante elemento al centro della ricerca è stato lo studio del legame tra la deformazione del fondo marino e la generazione di maremoti. Si è indagata l'influenza della topografia superficiale nella zona sorgente sul calcolo delle deformazioni del fondo marino, che a loro volta producono il maremoto. A tale scopo sono stati condotti studi preliminari utilizzando un codice agli elementi finiti per il calcolo di spostamenti e sforzi in un mezzo elastico sviluppato dall'Unità di Ricerca di Bologna. Si è calcolato l'effetto lungo alcuni profili ortogonali alla faglia sorgente del maremoto di Messina (ipotesi di Capuano et al., 1988) e si è trovato conferma che la topografia di superficie caratterizzata da forti gradienti (in pochi chilometri si passa dalle vette della Sila nella Calabria meridionale a profondità superiori a 1000 m nello Stretto) ha un notevole effetto sul calcolo degli spostamenti (Armigliato e Tinti, 2002). Lo studio della propagazione di un maremoto in prossimità della costa è stato condotto mediante metodi analitici generalizzando soluzioni classiche che erano state elaborate da Carrier e Greenspan per le equazioni non lineari di shallow water negli anni 50-60. Si è riusciti infatti a trovare soluzioni esatte relative a perturbazioni iniziali che sono simili a quelle prodotte da terremoti con sorgente vicino alla costa. Lo studio è in fase di svolgimento. Fino ad ora si è potuto dimostrare che in tali circostanze le formule proposte da Synolakis (1987) e largamente utilizzate ancora

oggi in letteratura per la stima del run-up non possono essere applicate quando la sorgente è vicino alla costa (Tonini, 2002).

Pericolosità “time-dependent” (task 3.4)

Rispetto ai tre obiettivi previsti per questo settore, l'attività si è svolta come segue:

1) Nel secondo anno sono stati applicati ad aree campione modelli probabilistici per la valutazione della pericolosità sismica dipendente dal tempo, studiati nel primo anno. Si tratta di modelli dipendenti: a) solo dall'ultimo evento (processi di rinnovo); b) dall'intera storia sismica della regione (processi di rilascio di sforzo). Nel primo caso, tali distribuzioni sono state applicate a quattro zone Italiane: Friuli, Umbria, Irpinia e Stretto di Messina; per esse si sono calcolate le probabilità condizionate di accadimento di un evento qualunque al tempo t misurato a partire da t_0 , tempo trascorso dall'ultimo evento. Le elaborazioni si basano sul catalogo CPTI e sulla zonazione ZS4 (eventi considerati: magnitudo $M_a \geq 4$). La mistura Esponenziale+Weibull evidenzia: una possibile correlazione tempi-magnitudo per il Friuli; un comportamento poissoniano per l'Umbria; un comportamento tendenzialmente bimodale per l'Irpinia; un comportamento nettamente bimodale per lo Stretto di Messina. Nel secondo caso, sono state esaminate due regioni: l'arco calabro e la zona dell'Irpinia-Sannio-Matese, cioè, con riferimento alla zonazione ZS4, le zone dei due insiemi $\{65, \dots, 72\}$ e $\{58, 62, 63, 64\}$. Sono state esaminate diverse versioni dei modelli di rilascio di sforzo, da quella di base in cui un unico processo fisico agisce nell'intera regione, al cosiddetto modello "independent" in cui diversi processi fisici, con differente tasso di accumulo, sono presenti in sottoregioni, al modello "linked" che ammette la possibilità di interazioni positive o negative tra le diverse zone. Resta un problema aperto identificare regioni a cui associare tali modelli; la scelta dovrebbe essere compiuta sulla base di considerazioni geologiche, ma anche tenendo conto del numero di osservazioni disponibili rispetto al numero di parametri da stimare.

2) Relativamente alla validazione dei modelli proposti abbiamo proseguito nell'applicazione del criterio di credibilità che consente di giudicare quale, fra alcuni modelli candidati, sia il migliore ai fini della stima di una particolare grandezza di hazard sismico. L'indagine in un campo di realtà congetturali, sufficientemente vasto da considerarsi esaustivo ai fini pratici, consente di scegliere il modello miglior stimatore. Poiché la grandezza da stimare è variabile nel tempo, tipicamente l'*hazard rate* nella modellazione dei *renewal processes*, si è perciò provveduto ad implementare i codici di calcolo per definire l'errore come contributo integrale e giungere alla preferibilità di uno fra i modelli candidati anche nel caso di hazard variabile nel tempo.

3) Il modello integrato per il calcolo della pericolosità sismica è stato strutturato in relazione ai dati disponibili, ed è migliorabile/modificabile in relazione alle nuove conoscenze. Si compone di diversi livelli di modelli di sorgenti, quantificati con percorsi differenziati, e inseriti in una struttura complessiva di albero logico. Tutte le stime di scuotimento sono riferite al periodo tradizionale $T=475$ anni, con l'utilizzo della relazione di attenuazione della PGA di Ambraseys et al., 1996, senza deviazione standard. Tale scelta infatti è resa necessaria dall'esigenza di poter comparare i risultati con i prodotti precedenti, ma verrà modificata nelle elaborazioni

del modello finale per recepire i risultati del Task 3.1. Il modello integrato è costituito da: un livello definito Background, in cui la sismicità di basso grado ($M < 5.5$) è stata caratterizzata a partire dal catalogo strumentale nel periodo 1981-1996 realizzato da precedenti progetti GNDDT, ad oggi il prodotto più omogeneo e completo disponibile, sia riguardo la stima della magnitudo, sia per localizzazioni e copertura del territorio nazionale; un livello definito DISS che recepisce le sorgenti catalogate nel Database of Potential Sources, accettando l'ipotesi progettuale di sorgenti di geometria e magnitudo caratteristica note. I problemi maggiori riguardano la quantificazione dei tempi di ritorno associati, per i quali è necessario un ulteriore approfondimento con gli operatori del Gruppo di Lavoro 1; ulteriori problemi riguardano la sovrapposizione spaziale di sorgenti, e la rappresentazione geometrica dei dati storici di peggior qualità (sorgenti circolari), escluse per il momento dall'analisi. Le sorgenti DISS sono state suddivise in due sottolivelli, rispettivamente di sorgenti storiche e di sorgenti geologiche, in relazione alle informazioni disponibili: le sperimentazioni time-dependent sono per ora limitate al livello DISS geologiche, ma non entrano nella composizione ad albero logico dei tre livelli di modelli di sorgenti. La mappa presenta un aspetto più frammentato dei prodotti tradizionali, con un significativo influsso dovuto alle proiezioni del livello di sismicità di background. E' in corso il tentativo di vincolare i modelli di sismicità in relazione alle osservazioni geodetiche. Per maggiori dettagli si faccia riferimento alla relazione di obiettivo depositata, e ai documenti ivi citati.

Conclusioni

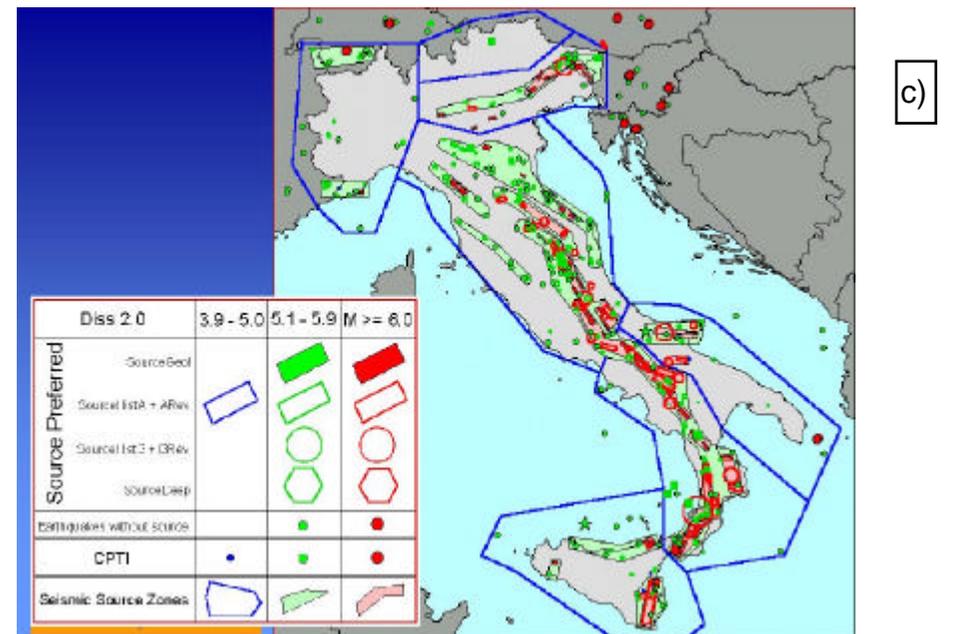
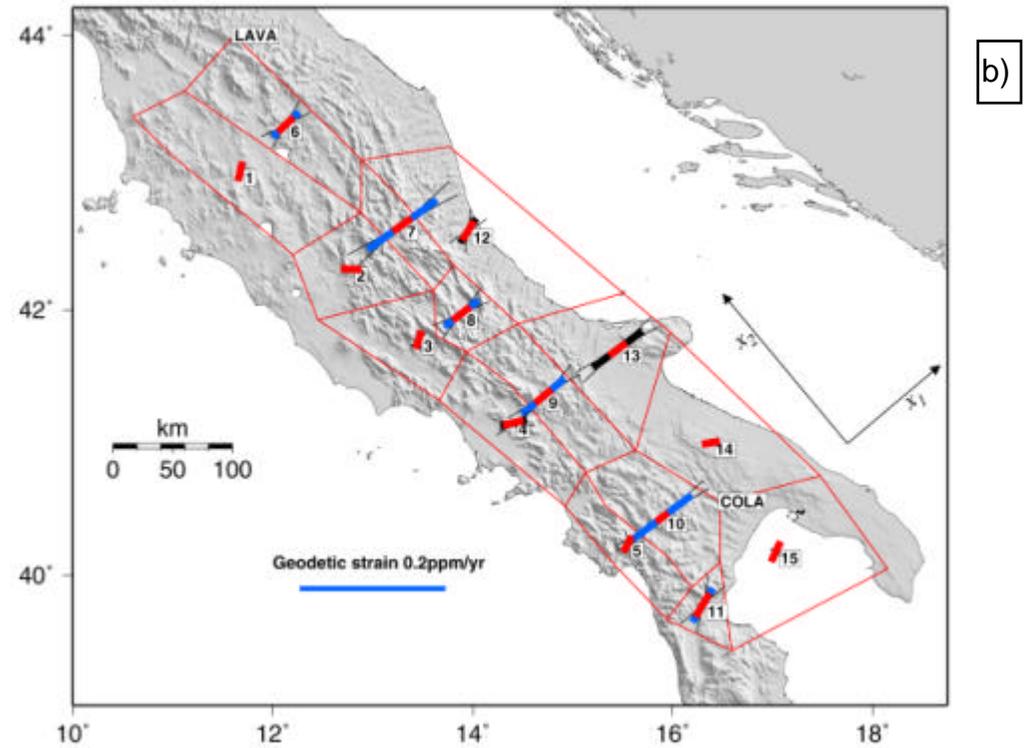
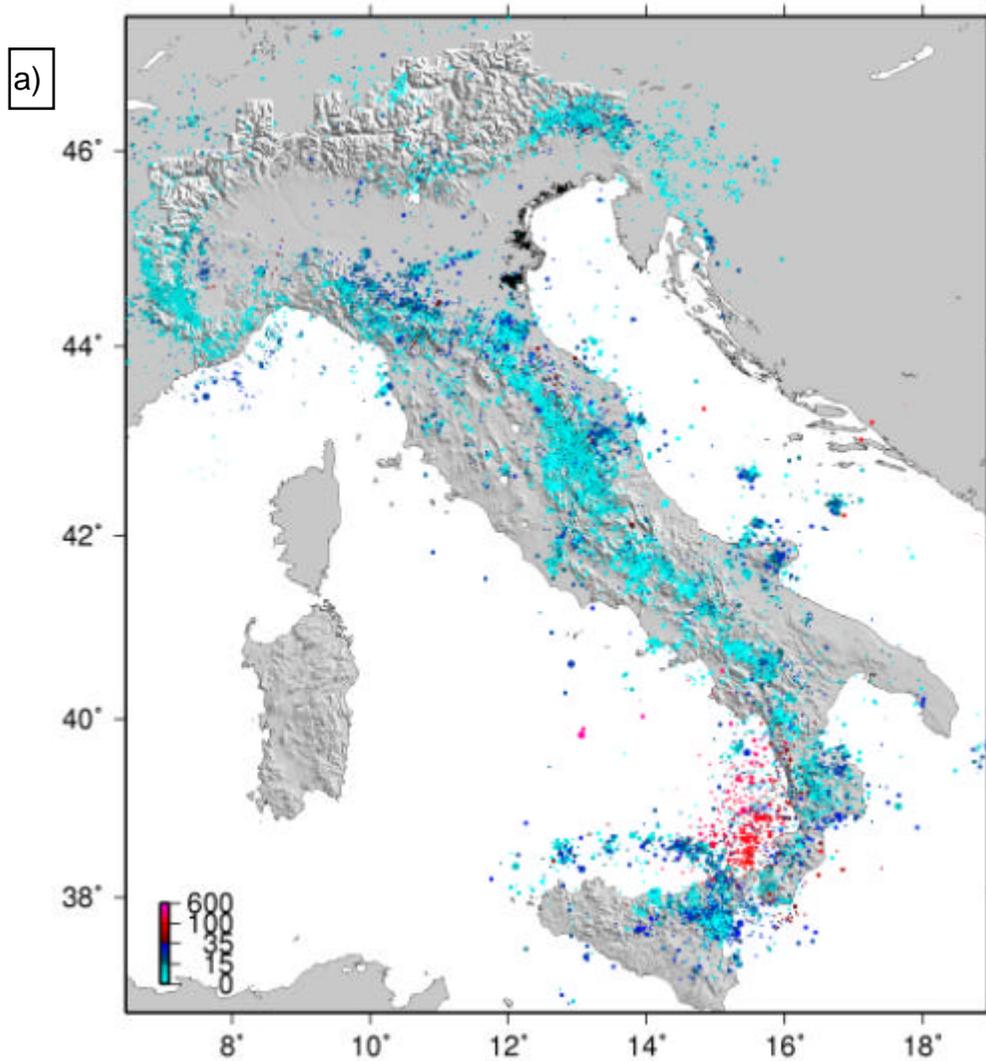
Alla conclusione del secondo anno di attività, gli obiettivi prefissati sono stati quasi tutti raggiunti. Tra questi, una versione aggiornata del catalogo delle sorgenti sismogenetiche (DISS) con l'inserimento di diverse nuove faglie in aree poco note. La revisione delle fonti storiche ha evidenziato alcuni forti terremoti appenninici precedentemente sconosciuti. Allo stesso tempo, sta procedendo lo studio di dettaglio delle due aree identificate come potenziali lacune, attraverso il confronto di diverse metodologie. Un importante vincolo al modello della sismogenesi in Italia sta derivando dalle campagne GPS sulla rete di triangolazione IGM dell'800, che ha fornito risultati originali in Appennino centro-meridionale e in Sicilia. Queste stime saranno usate nel terzo anno del progetto per vincolare i calcoli di pericolosità. Un altro prodotto del secondo anno di attività è il catalogo integrato della sismicità strumentale esteso al 2002, che con i suoi oltre 70.000 terremoti localizzati fornisce un'immagine molto dettagliata delle strutture attive in Italia. E' stato anche realizzato un database dei tempi di arrivo P delle campagne di sismica attiva dagli anni '60 ad oggi, che è in corso di integrazione con i dati citati dei terremoti per vincolare meglio i modelli di velocità crostale e le localizzazioni 3-D.

Inoltre, è in corso di realizzazione una nuova zonazione sismica della regione italiane, basata sulle informazioni sismologiche e geologiche frutto dei diversi task del progetto, che verrà utilizzata per mappe di pericolosità "convenzionali". E' proceduto significativamente il lavoro sulle leggi di attenuazione regionali, basati su grandi quantità di forme d'onda del moto del suolo weak- e strong-motion. I risultati mostrano variazioni significative delle caratteristiche della propagazione delle onde sismiche nelle diverse aree esaminate, che possono quindi influenzare lo scuotimento in maniera importante. E' stato completato nel secondo anno l'invio delle

schede sugli effetti della geologia locale agli oltre 8000 comuni italiani; la raccolta ha raggiunto per ora il 23% del totale. Ancora nell'ambito della stima degli effetti di sito a scala nazionale è stata messa a punto una procedura che, partendo da una mappa di hazard di PGA "hard rock", costruisce lo spettro di risposta elastico EC8 (pseudo-accelerazione) sul grigliato prestabilito tenendo conto di una classificazione semplificata dei terreni di superficie, ottenuta nel progetto sulla base della carta geologica al 500.000. Si sono fatti progressi significativi verso la realizzazione di una carta di pericolosità per i maremoti, concentrandosi particolarmente sulla Calabria e la Sicilia, sia raccogliendo nuovi dati che sviluppando simulazioni numeriche.

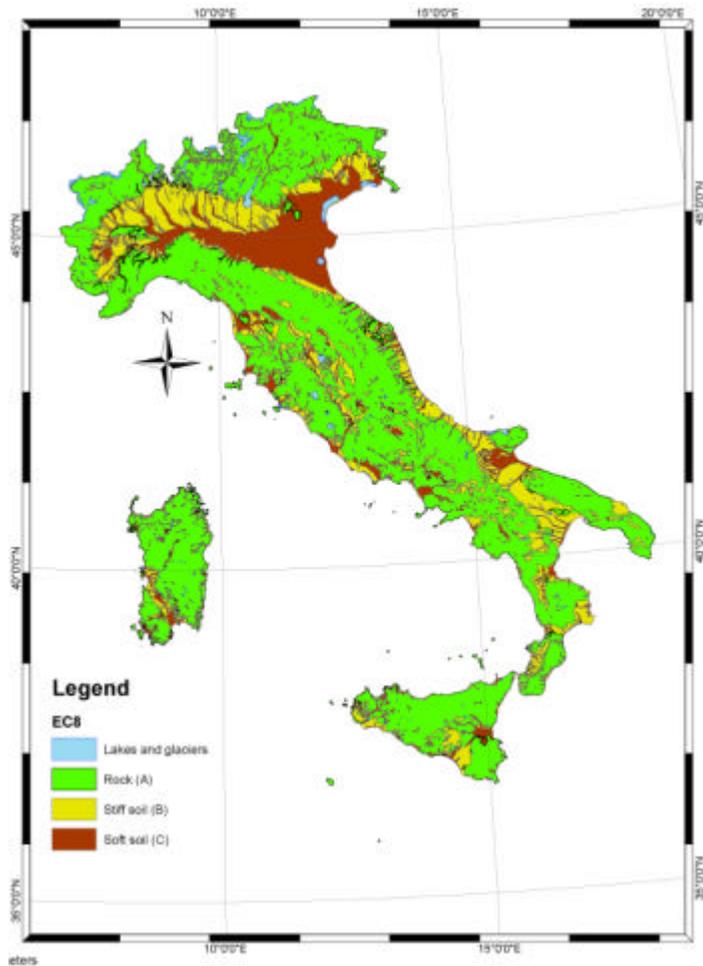
Nello sviluppo delle metodologie per il calcolo della pericolosità "time-dependent", sono stati applicati modelli probabilistici ad alcune aree campione per la valutazione della pericolosità sismica dipendente dal tempo, sia dall'ultimo evento (processi di rinnovo) che dall'intera storia sismica della regione (processi di rilascio di sforzo). È stato predisposto un primo modello integrato per il calcolo della pericolosità sismica, basato sui dati strumentali e delle faglie disponibili al momento. La mappa ottenuta nel secondo anno, che sarà migliorata nel terzo anno del progetto inserendo nuovi vincoli dagli altri prodotti del progetto (stime di deformazione sismica e geodetica, sismicità storica e strumentale), mostra un aspetto più frammentato delle mappe note, mostrando l'influenza non trascurabile della sismicità "di fondo".

All'inizio del terzo anno, sono oramai disponibili quasi tutti i dati di base inizialmente previsti. Questi serviranno per costruire o raffinare le mappe di *hazard* convenzionali e quelle dipendenti dal tempo, che costituiscono l'obiettivo finale del progetto. A questo scopo verrà ampiamente utilizzato il GIS del progetto, costruito nei primi due anni con tutti i dati finora disponibili per effettuare più efficacemente confronti tra diverse basi di dati.



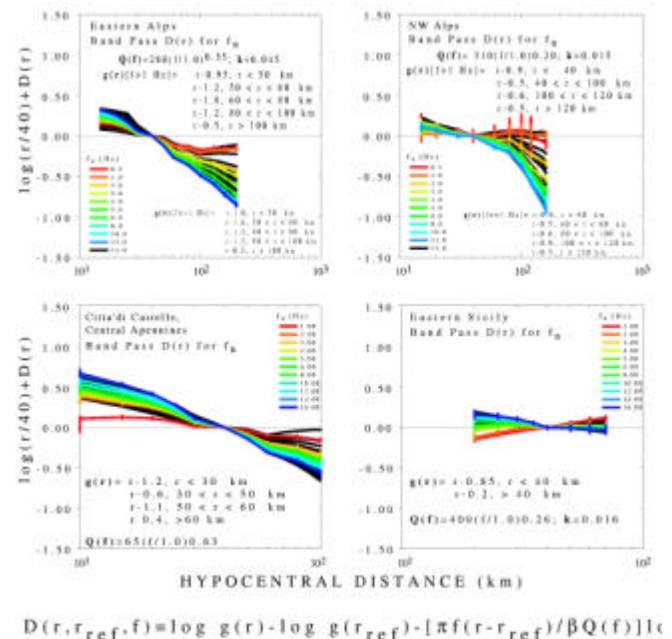
a) localizzazioni epicentrali del catalogo strumentale integrato 1981-2002; b) Shear strain geodetici (blu=estensionale; nero=compressionale) plottati nella direzione degli assi principali del tensore di strain; c) proposta per una nuova zonazione sismica del territorio nazionale derivata dall'analisi della sismicità storica, dal catalogue DISS e dal catalogo della sismicità strumentale

a)



a) Carta della geologia a scala nazionale in accordo con EC8; b) Ciascuno dei 4 riquadri mostra le relazioni di attenuazione empiriche ottenute per le Alpi Orientali, Alpi Occidentali, Sicilia Orientale e Appennino Centrale; c) PGA (g) al 90% di probabilità in 50 anni usando le leggi di attenuazione di Ambraseys et al. (1996). La sismicità è modellata usando CSTI, sorgenti storiche e geologiche del DISS

b)



c)

