



## **Progetto S3 - Scenari di scuotimento in aree di interesse prioritario e/o strategico**

*Responsabili: Marco Mucciarelli (UniBas) e Francesca Pacor (INGV-MI)*

**Rendiconto Finale (1 giugno 2005 - 31 luglio 2007)**

### **Abstract/obiettivi del progetto**

Il Progetto S3 si poneva come obiettivo generale il calcolo di scenari di scuotimento in alcune aree italiane nel caso di accadimento del terremoto massimo credibile (*Maximum Credible Earthquake*).

Gli scenari sono stati prodotti a scala comunale e/o intracomunale e sono stati descritti attraverso mappe rappresentative dell'andamento nello spazio di vari parametri del moto sismico atteso (picchi di accelerazione, di velocità, ordinate spettrali etc.), tramite descrittori della loro distribuzione e tramite *time series*. Particolare attenzione è stata dedicata alla valutazione della distribuzione dei valori predetti in funzione della variabilità dei parametri di ingresso dei modelli descrittivi la sorgente sismica, il mezzo di propagazione e la geologia locale.

Gli scenari sono stati calcolati a diverso livello di dettaglio sia attraverso metodologie semplificate, basate sulla combinazione di modelli empirici predittivi (MEP) del moto e di zonazioni geologiche/geotecniche a scala urbana, sia attraverso tecniche di simulazione di sismogrammi sintetici a faglia finita, in modo da riprodurre gli effetti dei terremoti nel campo vicino (direttività e generazione di impulsi a bassa frequenza). Il mezzo di propagazione è stato simulato attraverso diverse metodologie di calcolo (campo d'onda completo o in approssimazione ad alta frequenza in mezzi 1-D).

Nel progetto S3, inoltre, si sono svolte una serie di attività trasversali e/o propedeutiche al calcolo degli scenari, a carattere prevalentemente metodologico, finalizzate alla definizione e stesura di linee guida da seguire nella generazione di scenari di scuotimento a scala urbana.

Tali attività riguardano tre argomenti principali.

- 1) La definizione, su basi principalmente sismologiche, dei modelli di sorgente da utilizzare nel calcolo di scenari associati ad eventi sismici futuri, di cui cioè non si conoscono le modalità di accadimento.
- 2) La caratterizzazione e rappresentazione parametrica delle risposte sismiche associate a diverse condizioni di sito comunemente riscontrabili nel territorio italiano; la verifica di vari metodi per la stima di  $V_{S30}$  e studi di dettaglio su tipologie di suoli ove questo parametro non sembra una buona approssimazione dell'amplificazione attesa (inversioni di velocità, frane, ammassi rocciosi fratturati, aree con carsismo).
- 3) Lo sviluppo e l'applicazione di metodi di calcolo innovativi per la valutazione del moto sismico a scala locale e/o regionale (integrazione delle tecniche di simulazione stocastiche con quelle deterministiche al fine di ottenere simulazioni realistiche del moto del suolo sia in campo vicino sia lontano su ampia banda di frequenza; introduzione dei risultati ottenuti dalle simulazioni deterministiche a faglia finita del moto del suolo nel classico approccio probabilistico utilizzato per le stime di pericolosità a scala regionale, metodi alternativi associati all'intensità macrosismica).

Il Progetto si è concentrato su quattro aree italiane, due scelte a scopo previsionale e due a scopo di validazione. Come aree di validazione si sono scelte quelle dei comuni maggiormente danneggiati da due eventi recenti: il terremoto del basso Molise del 31 Ottobre 2002 (M = 5.7) e il terremoto del bresciano del 24 Novembre 2004 (M = 5.2). A scopo previsionale si sono studiate l'area urbana di Potenza (PZ) e quella di Gubbio (PG) con estensione anche alla Piana di Gubbio.

La struttura generale del Progetto è illustrata nella Figura 1.

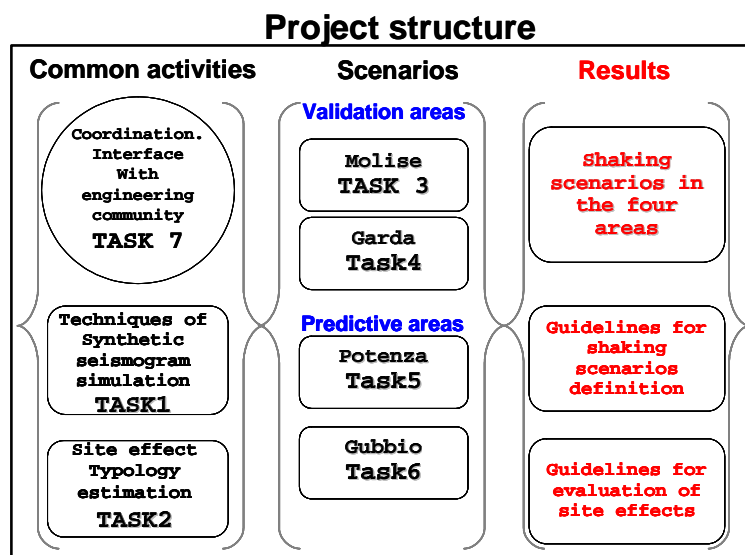


Figura 1: Struttura generale del Progetto S3

## 1. Risultati del progetto: aspetti generali

### *Organizzazione*

Il progetto è stato coordinato direttamente dai responsabili senza la nomina di responsabili di Task; sono state organizzate due riunioni plenarie (30 e 31 Maggio 2005 e 14 giugno 2006 a Roma) e numerosi incontri per singoli Task a cui hanno partecipato le UR coinvolte, quando possibile i referenti DPC e le autorità locali.

Il primo anno di progetto è stato dedicato alla raccolta dati e alle messa a punto delle metodologie; il secondo anno è stato quasi interamente dedicato alla produzione dei risultati.

Poiché nel corso del primo anno il Progetto S3 ha rispettato i tempi e metodi previsti inizialmente, le uniche variazioni apportate hanno riguardato alcune attività sperimentali le quali sono state ridefinite in corso d'opera e descritte in dettaglio nei singoli Task.

A favore del Progetto si segnala l'aggiunta di nuove indagini e calcoli inizialmente non previsti, che si è potuta ottenere da un lato grazie ad una ottimizzazione delle risorse allocate presso alcune unità, dall'altro grazie al coinvolgimento a titolo gratuito di alcuni gruppi di ricerca che hanno trovato di loro interesse collaborare alle attività proposte attingendo a finanziamenti istituzionali o nell'ambito di altre iniziative in corso (ad esempio il modello 3D della Piana di Gubbio).

Particolare attenzione è stata dedicata ai rapporti con gli utenti finali dei prodotti previsti, sia con le amministrazioni locali che con la comunità ingegneristica.

Le autorità locali sono state direttamente coinvolte nelle attività di reperimento dati e sono sempre state invitate alle riunioni di progetto, molte delle quali si sono tenute

nei luoghi oggetto di studio.

Per quanto riguarda invece, i rapporti con la comunità ingegneristica (oggetto del Task 7), è bene ricordare che il documento istitutivo dei progetti prevedeva che i prodotti di S3 dovessero essere interfacciati con studi di vulnerabilità “altrimenti esperiti” allo scopo di produrre scenari di danno. Durante il primo anno di attività è emersa la necessità di un maggiore confronto sui temi al confine tra prodotti sismologici ed ingegneristici, e si è individuato un naturale interlocutore nel gruppo che rappresenta l’altra metà delle ricerche finanziate dal Dipartimento Protezione Civile, ovvero nei progetti ReLUIIS. Il risultato principale e non previsto inizialmente è stata l’organizzazione di un *workshop* sull’input sismico tenutosi il 12 e 13 giugno 2006.

Tutti i *deliverables* previsti inizialmente sono stati regolarmente prodotti e consegnati al committente. Quelli in forma di rapporto sono a disposizione sul sito di progetto, mentre quelli che prevedono la gestione tramite un programma GIS oppure i DVD dei dati di base possono essere richiesti tramite un apposita scheda presente sul sito. Infine, per quanto riguarda il coordinamento con DPC, durante lo svolgimento del progetto si sono svolte due riunioni con la presenza del responsabile designato. I coordinatori hanno inoltre partecipato ad una riunione plenaria richiesta da DPC al termine del primo anno ed alle riunioni sui temi trasversali relativi a Sorgenti Sismiche e Direttività, Modelli di Attenuazione, Effetti di Sito. Per la particolare delicatezza del tema e le possibili ricadute, si è poi sollecitato ed ottenuto un incontro con DPC riguardante i risultati delle simulazioni per l’area del Molise.

### ***Revisione dopo il I anno***

Tra gli aspetti generali del progetto vanno menzionate le azioni intraprese a seguito dei commenti del Comitato dei Revisori.

I commenti riguardavano:

1. La definizione dei risultati in un formato appropriato per le valutazioni di perdite effettuate da DPC.
2. Il trattamento della variabilità aleatoria del moto del suolo ed in particolare come le incertezze saranno propagate al calcolo del danno;
3. La dipendenza esclusiva dal metodo di Nakamura per la caratterizzazione del sito.
4. L’inclusione di aspetti non-lineari e di liquefazione ed utilizzo di tecniche di modellazione dinamica per la sorgente.
5. La produzione di risultati in termini di spettri di risposta e la preparazione di carte di microzonazione spettrale per le aree test.
6. La scelta dei codici di modellazione ad alta frequenza appare limitata.
7. Introdurre anche considerazioni statistiche sul tempo di ritorno o sulla probabilità annuale di eccedenza degli scenari proposti
8. Mostrare come le metodologie proposte siano robuste e come la validazione del danno non dipenda da una particolare combinazione di parametri non risolti dai dati strumentali e che non possono quindi essere usati in fase predittiva.
9. Concentrare gli sforzi per assicurare che la ricerca d’avanguardia possa dare risultati robusti per l’utilizzo da parte di DPC.

1.-2. Per quanto riguarda il commento 1, i due coordinatori hanno collaborato ad una esercitazione nazionale di protezione civile svoltasi dal 10 al 14 maggio 2006 in Val d’Agri con il coinvolgimento di un migliaio di partecipanti. Per quest’area erano

disponibili scenari di scuotimento realizzati da INGV-MI durante i progetti svolti nell'ambito del Programma Quadro 2000-2002 del Gruppo Nazionale Difesa Terremoti. E' stato così possibile, assieme agli ingegneri che coordinavano la parte scientifica dell'esercitazione, seguire tutto il processo dall'integrazione con gli studi di vulnerabilità, attraverso le stime di danno fino allo scenario di perdite/soccorsi attesi. In tutto il processo si è tenuto conto delle incertezze e della loro propagazione, giungendo a farne un elemento caratterizzante della stessa esercitazione.

Il problema principale che viene richiamato anche dal Task 7 di S3, è la necessità da parte degli ingegneri di avere dati di ingresso sotto forma di intensità, e possibilmente sia in scala MCS che EMS. Quanto sopra, si ricollega anche al secondo commento dei revisori circa il trattamento delle incertezze. Per la propagazione delle stesse alle stime di danno è stato fondamentale il confronto con la componente ingegneristica. I modelli che meglio potrebbero tenere conto delle incertezze mediante una convoluzione diretta, come le curve di fragilità, al momento mancano ancora di una base dati estesa e comprensiva di tutte le tipologie di interesse per il territorio italiano.

3. Riguardo al commento circa l'uso esclusivo del metodo di Nakamura come stimatore degli effetti di sito, si ritiene che sia stato originato da un fraintendimento derivante dal fatto che i risultati disponibili alla data del primo incontro con i Revisori e mostrati in quella sede fossero misure di microtremori. In realtà, il metodo HVNR è utilizzato o in combinazione con misure sugli edifici allo scopo di evidenziare la presenza di fenomeni di risonanza o allo scopo di estendere spazialmente i risultati ottenuti in un numero limitato di punti di misura/modellazione.

4. Per quanto la non-linearità, una stima speditiva degli effetti non lineari secondo il metodo proposto da Bazzurro e Cornell (2004) è stata effettuata per i siti del Molise per cui erano disponibili i dati geotecnici di cui al *deliverable PS3-Deliverable D8*. Per quanto riguarda lo studio di possibili fenomeni di liquefazione, non sono state svolte attività in tal senso poiché il budget previsto non consentiva di effettuare i sondaggi geognostici e le prove geotecniche *in situ* ed in laboratorio che sarebbero state necessarie.

L'utilizzo diretto di tecniche di modellazione dinamica della sorgente per il calcolo degli scenari di scuotimento non era previsto nel Progetto S3; si è, infatti, ritenuto preferibile utilizzare tecniche di simulazione note e già sperimentate in progetti precedenti (*progetto GNDT*) al fine di garantire risultati applicabili a più situazioni. I modelli dinamici sono stati utilizzati nell'ambito dello studio parametrico delle sorgenti sismiche per vincolare alcune grandezze quali ad esempio le funzioni sorgente o i range di variabilità del rise time e delle velocità di rottura.

5. Riguardo alla produzione di risultati in termini di spettri di risposta e la preparazione di carte di microzonazione spettrale per le aree test, i primi sono stati inseriti nei rapporti sui singoli siti, mentre le seconde fanno parte della cartografia GIS.

6. Nel corso del II anno di Progetto sono state applicate e discusse tecniche diverse per l'alta frequenze, basate su approcci stocastici (Task 5 - Potenza) o sull'uso delle *Green function* empiriche (*PS3-Deliverable D2*).

7. Le considerazioni statistiche sulla probabilità annuale di eccedenza degli scenari proposti sono state concentrate sul sito di Gubbio, dove lo scenario dipendeva da

una sola faglia.

**8.-9.** Circa la robustezza delle metodologie e la non dipendenza della validazione del danno da una particolare combinazione di parametri, la migliore prova è quella fornita nel Task 5, dove su Potenza sono confrontate tutte le possibili combinazioni di due stime di input con due modelli di vulnerabilità, mostrando un generale accordo ed alcuni aspetti di discordanza facilmente spiegabili. Anche per quanto riguarda la predizione del moto del suolo, le analisi svolte nelle aree predittive di Potenza e Gubbio hanno mostrato come, per giungere a stime realistiche ed affidabili del moto, sia importante da una lato confrontare i risultati da metodi di simulazione a complessità crescente, e dall'altra, per ogni metodo, generare centinaia di scenari, in modo da permettere una trattazione statistica dei risultati.

Circa il punto di ricerca d'avanguardia, ed in particolare della risonanza suolo-edifici, il DPC è sicuramente in grado di comprenderne l'importanza e gestirne i risultati in futuro, come documentato anche dalle recenti ricerche pubblicate da Gallipoli, Mucciarelli & Dolce, 2007.

### ***Risultati principali***

I risultati principali del progetto sono stati i seguenti.

1. Per fornire predizioni realistiche del moto del suolo al *bedrock* con le tecniche deterministiche, è importante verificare l'attendibilità delle stime, confrontando i risultati dello studio di scenario a vari livelli di complessità. Questo confronto permette, infatti, da una parte di valutare l'attendibilità delle previsioni ottenute con le tecniche più sofisticate (ad esempio in Molise) e dall'altra valutare il grado di approssimazione introdotto dalle tecniche più semplificate (ad esempio a Gubbio).
2. La variabilità del moto associata alla sorgente sismica può essere tenuta in conto anche in sede applicativa: per ogni sorgente e per alcuni siti di riferimento si generano centinaia di scenari di rottura fisicamente possibili in modo da fornire l'input sismico sotto forma di distribuzioni dei parametri *strong motion* e dei corrispondenti estimatori statistici (Potenza e Gubbio), riconoscendo anche gli scenari limite.
3. La scelta dei parametri del moto di interesse (picchi di accelerazione, velocità serie temporale) condiziona la scelta del metodo di simulazione da adottare per il calcolo degli scenari: tecniche numeriche *full-wave* sono idonee per il calcolo di spostamento e velocità a basse frequenze ( $f < 2-3\text{Hz}$ ), mentre le tecniche semplificate si adoperano per la velocità e accelerazione ad alte frequenze ( $f > 1\text{Hz}$ ). Tecniche ibride si consigliano per analisi a *time series*.
4. Un altro elemento importante è l'utilizzo, in uno studio di scenario, di registrazioni da eventi avvenuti nella stessa area permettendo: la calibrazione di alcuni parametri dei modelli, la verifica delle capacità di simulazione delle tecniche numeriche, una stima quantitativa dell'incertezza nella predizione del moto, dipendente dalla mancanza di informazione o inadeguatezza delle tecniche adottate.
5. A scopo di pianificazione territoriale si consiglia di generare scenari predittivi di livello 1 e 2, ottenuti con le tecniche di simulazione a faglia estesa. Infatti, si è osservato che le aree di massimo risentimento rispecchiano la geometria della faglia ipotizzata, risultando maggiormente rappresentativi della distribuzione

dello scuotimento in area epicentrale. Questo vale anche nel caso nel caso di terremoti moderati. Da qui, consegue l'importanza di utilizzare modelli di sorgente ben vincolati dai dati.

6. Per gli effetti di sito, si è visto come diverse tecniche di superficie e di foro conducano a risultati confrontabili solo quando le anisotropie e disomogeneità del suolo sono molto contenute. Materiali eterogenei (come le ghiaie) portano a notevoli variazioni delle risposte sismiche modellate a seconda della tecnica utilizzata per la stima dei profili di velocità. Quanto al metodo  $V_{S30}$ , si è visto come vi siano molti casi diffusi sul territorio italiano per i quali questo metodo non fornisce una buona stima delle amplificazioni osservate. Per molte delle tipologie campione si è anche osservata una forte direzionalità negli effetti di amplificazione, con variazioni azimutali non solo dei parametri di picco ma anche di quelli integrali.
7. Per terremoti non molto forti ed in aree caratterizzate da effetti di sito prevalentemente monodimensionali (Garda) si è visto come sia possibile separare l'importanza degli effetti di sorgente (direzionalità) da quelli di sito (inclusi possibili effetti di risonanza suolo-edificato).
8. Per terremoti non molto forti ma in aree caratterizzate da effetti di sito e di propagazione particolarmente complessi (Molise) il contributo della sorgente è identificabile ma insufficiente per produrre i valori di moto del suolo necessari per giustificare i danni osservati. La complessità delle indagini volte ad acquisire i dati geotecnici e geometrici delle coperture, nonché quella dei modelli di calcolo tridimensionali costituiscono una barriera per possibili applicazioni preventive a fine di Protezione Civile. I valori di moto del suolo ottenibili da modelli semplificati sono insufficienti quando non addirittura anticorrelati con il danno (es. amplificazione topografica a S. Giuliano). Un possibile scopo di studi futuri potrebbe essere quello di valutare la probabilità dell'occorrenza di effetti di sito anomali, al fine di rendere edotto DPC sulla probabilità che stime ordinarie di moto del suolo vengano largamente eccedute con conseguenze potenzialmente catastrofiche.
9. Per aree di bacino si è osservato come gli effetti bidimensionali e tridimensionali (non previsti dalla attuale normativa sismica né da quelle in elaborazione) siano di un ordine di grandezza superiore rispetto a quelli dovuti ad effetti topografici. Per la Piana di Gubbio si è comunque osservata una interessante relazione tra frequenza fondamentale ed amplificazione complessiva, con potenziali risvolti per l'inserimento di un parametro facilmente misurabile tra i requisiti sia per gli scenari che anche a scopi progettuali e di normativa.
10. L'interazione con la componente ingegneristica ha permesso di compiere passi avanti nella comprensione del ruolo dei possibili parametri di input negli scenari di danno. In particolare, l'adozione dell'intensità di Housner come parametro di riferimento ha consentito di studiare la variabilità degli effetti di diversi tipi di input, di diversi modelli di vulnerabilità e l'importanza degli effetti di sito, considerando la distribuzione statistica dei dati di input nel suo complesso, e convolvendo di volta in volta con le distribuzioni opportune. Questo ha permesso una gestione diretta delle incertezze senza dover scegliere a priori un singolo stimatore.

## 2. Risultati del progetto: aspetti di dettaglio, per singoli task

Il progetto S3 è diviso in 7 Tasks, come indicato nella Tabella 1; per ogni Task sono stati prodotti diversi *deliverables* (vedi Tabella 1), che descrivono in dettaglio i dati raccolti, le analisi svolte e i principali risultati ottenuti.

Task	Argomento	Deliverable	Titolo	
1	Scenari di scuotimento	D0	Tecniche di simulazione	Rapporto
		D1	Linee guida per il calcolo degli scenari di scuotimento	Rapporto
		D2	Innovative approaches to predict seismic ground motion	Rapporto
2	Effetti di sito	D3-D4-D5	Linee guida per l'introduzione degli effetti di sito negli studi di scenario	Rapporto
3	Scenari area 1: Molise	D6	Data set registrazioni Molise	Cd-rom
		D7	Validation shaking scenarios	Rapporto
		D8	Modelli geotecnici 1D e 2D nei siti prescelti	Rapporto
		D9-D10 -D11	Risposta sismica locale a S. Giuliano di Puglia (CB) e in alcuni comuni confinanti	Rapporto
		D11	GIS-Area Molise	DVD
4	Scenari area 2: Garda	D12	Data set registrazioni Garda	Cd-Rom
		D13	Scenari al bedrock a vari livelli di complessità	Rapporto
		D14-D15	Effetti di sito	Rapporto
		D15 (D25)	GIS – Area Garda	
5	Scenari area 3: Potenza	D16	Data set registrazioni Italia Meridionale	Cd-Rom
		D17	Bedrock shaking scenarios	Rapporto
		D18-D19-D24	Effetti di sito e scenari di danno	Rapporto
		D19	GIS – Area Potenza	
6	Scenari area 4: Gubbio	D20	Bedrock shaking scenarios	Rapporto
		D21	Geological model of the Gubbio basin (Italy) for the characterization of local seismic response	Rapporto
		D22-D23	Shaking scenarios including site effects	Rapporto
		D23	GIS – Area Gubbio	DVD
		D26	Data set registrazioni Gubbio	DVD
7	Interfacciamento con l'ingegneria ed il DPC	D24	Interfacciamento con l'ingegneria ed il DPC: il caso di Potenza	Rapporto
		D25	WebGis: Tecniche semplificate per la presentazione dei risultati di scenario (Applicazione al Garda)	Web

**Tabella 1** - Elenco dei Deliverables prodotti nel Progetto S3, suddivisi per Tasks

### TASK1 - Scenari di scuotimento

Scopo iniziale del Task era la calibrazione e lo sviluppo delle tecniche di simulazione da utilizzare per il calcolo di scenari di scuotimento e la valutazione della variabilità delle predizioni al variare dei parametri del modello. Il Task si è articolato in tre diverse attività. L'attività 1, relativa al confronto fra tecniche di simulazione in alta e bassa frequenza e a larga banda, è stata completata nel primo anno e ha evidenziato le buone prestazioni delle tecniche di simulazione nella riproduzione del terremoto dell'Irpinia (23 novembre 1980, evento a 0 secondi). Inoltre, sempre per lo stesso evento, le varie tecniche sono state impiegate nella generazione di scenari e i risultati sono stati interpretati in relazione alle diverse parametrizzazioni utilizzate dai codici per rappresentare la rottura della sorgente estesa (*PS3-Deliverable D0*).

L'Attività 2, relativa allo studio parametrico delle sorgenti sismiche, ha invece permesso di analizzare la variabilità del moto del suolo in funzione delle modalità di rottura della faglia. Lo studio è stato condotto attraverso le simulazioni numeriche, perché i dati sperimentali esistenti non sono sufficienti per poter quantificare l'influenza dei parametri di rottura sul *ground-motion*. Sono state utilizzate le tecniche a faglia estesa verificate durante il primo anno, simulando oltre 400 scenari su un grigliato di 30 stazioni in un raggio di 50km dalla faglia. I risultati di questa attività sono stati utilizzati per illustrare le linee guida per studi di scenario (*PS3-Deliverable D1*).

Lo sviluppo di metodi innovativi per la valutazione della pericolosità sismica (Attività 3) ha proceduto su tre linee (*PS3-Deliverable D2*).

- a. Sviluppo e applicazione di tecniche numeriche per la generazione di sismogrammi sintetici a larga banda attraverso metodi ibridi (HIC, Gallovic and Brokeshova, 2007) e metodi basati sulle Green Function empiriche (Hutchings, 1994). La tecnica HIC è stata ampiamente utilizzata nel corso del Progetto per il calcolo di scenari sia nelle aree di validazione che nelle aree di predizione.
- b. Messa a punto del metodo probabilistico-deterministico per la stima dell'hazard sismico associato ad una singola faglia (o sistema di faglie) di Convertito et al. (2006) che consente di superare le limitazioni intrinseche sia del classico approccio PSHA che delle tecniche deterministiche. Tale metodo è stato applicato nell'area di Gubbio (*PS3-Deliverable D20*).
- c. Sviluppo di metodologie per il calcolo di scenari in termini di intensità macrosismica.

Il principale prodotto del Task1 è la redazione delle linee guida per il calcolo degli scenari di scuotimento al bedrock, redatte collegialmente dalla UR1, UR2 e UR10 e descritte nel *deliverable PS3-Deliverable D1*. In questo ambito sono state definite le procedure per la realizzazione di scenari di tipo deterministico (messe a confronto con gli approcci probabilistici classici) ed è stata introdotta una classificazione degli scenari secondo tre diversi livelli di complessità. Gli scenari ottenuti mediante modelli empirici predittivi (MEP) vengono considerati come scenari di livello 0, mentre quelli realizzati con metodologie di simulazione approssimate e con metodologie di simulazione a larga banda per la faglia estesa, sono considerati come scenari di livello 1 e di livello 2, rispettivamente (Tabella 3).

	<b>Tecniche</b>	<b>Grandezze stimate</b>	<b>Variabilità associata</b>
<b>Livello 0</b>	Modelli empirici predittivi del moto del suolo (MEP, già chiamate relazioni di attenuazione)	Valori di picco (PGA, PGV, PGD) Ordinate spettrali in intervalli di frequenza prefissati Altri parametri del moto (intensità di Arias, Intensità di Housner,...) Intensità macrosismica	Deviazione standard dei modelli empirici predittivi
<b>Livello 1</b>	Tecniche approssimate di simulazione	Serie temporali "approssimate" (ovvero calcolate su sorgente puntiforme o estesa, per campo vicino e lontano, solo per fasi dirette, con limiti in alta o bassa frequenza,...)	Analisi statistica relativa alla distribuzione dei parametri derivati da famiglie di sismogrammi sintetici simulati.
<b>Livello 2</b>	Tecniche di simulazione a larga banda a faglia estesa	Sismogrammi sintetici larga banda contenenti l'intero campo d'onda.	Analisi statistica relativa alla distribuzione dei parametri derivati da famiglie di sismogrammi sintetici simulati.

**Tabella 3.** Classificazione dei livelli di complessità degli scenari al bedrock adottata nel Progetto S3.



Nelle aree di validazione, il confronto fra dati osservati e scenari a diverso livello di dettaglio ha permesso di valutare l'accuratezza della predizione al crescere della complessità dei modelli, viceversa nelle aree di predizione lo scenario di livello 0 è stato utilizzato come indicatore dell'andamento medio rispetto al quale valutare la variabilità del moto atteso stimabile dai modelli più complessi.

I risultati dello studio parametrico, insieme alle esperienze svolte nelle 4 aree investigate hanno permesso di evidenziare alcuni aspetti metodologici, discussi nelle linee guida, utili per l'impostazione di uno studio di scenario e per la successiva gestione dei risultati. Al fine di ottenere stime del moto affidabili e utilizzabili nelle successive applicazioni, con impegni di tempo e di calcolo dimensionati al problema in esame è stata evidenziata la necessità di:

*Prima di generare gli scenari*

1. Stabilire i parametri del moto del suolo da predire, anche in funzione delle successive applicazioni.
2. Stabilire il grado di variabilità dei parametri da introdurre nei modelli di sorgente, anche in funzione delle conoscenze disponibili e del livello di pericolosità da stimare.
3. Calibrare i modelli utilizzando registrazioni di terremoti avvenuti.

*Dopo aver prodotto gli scenari*

4. Stabilire i criteri per la selezione degli scenari, da utilizzare nelle successive applicazioni.
5. Confrontare i risultati degli scenari a vari livelli di complessità.

## **TASK2 - Effetti di sito**

Scopo iniziale del Task2 era la caratterizzazione e rappresentazione parametrica delle risposte sismiche associate a diverse condizioni di sito comunemente riscontrabili nel territorio italiano e la verifica di vari metodi per la stima di  $V_{S30}$ . Tutti i risultati sono dettagliatamente descritti nei *deliverables PS3-Deliverables D3-D4-D5*.

Tra le tipologie diffuse sul territorio italiano per le quali la semplice caratterizzazione mediante  $V_{S30}$  o altri modelli semplici non forniscono risultati soddisfacenti, ne sono state studiate quattro:

- a. Inversioni di velocità.
- b. Carsismo.
- c. Ammassi Fratturati.
- d. Aree in frana.

Caratteristiche risultate comuni a tutte e quattro le tipologie sono le amplificazioni superiori a quelle previste da  $V_{S30}$  e spiccati effetti direzionali che, con caratteristiche diverse per le 4 tipologie, portano ad osservare notevoli differenze tra le amplificazioni nelle due componenti orizzontali.

Per quanto riguarda le stime di  $V_{S30}$  effettuate con vari metodi, si è visto per il sito campione di Tito che i dati geotecnici, le prove geofisiche di superficie ed in foro restituiscono modelli abbastanza simili ma che causano variazioni nella previsione della frequenza fondamentale del suolo dell'ordine del 10%.

Per il sito di Tomba di Buia, la maggiore anisotropia ha portato ad una maggiore divergenza tra i vari modelli ottenuti con varie tecniche e le amplificazioni osservate. Per il sito di Valco San Paolo (Roma) la rumorosità dell'area urbana non ha consentito nei due anni del progetto di avere un numero adeguato di registrazioni

con un buon rapporto segnale rumore.

Dall'esame delle 4 aree studio sono poi emerse osservazioni importanti per la pratica applicazione degli effetti di sito nella realizzazione di scenari, che sono descritte nei rispettivi *deliverables*.

### **TASK3 - Molise**

#### Scenari al bedrock

Lo scopo principale dello studio di scenario per l'area molisana, era la definizione del moto sismico al bedrock avvenuto durante la scossa principale del 31 Ottobre 2002 (10:32 UTC,  $M_w=5.7$ ) da utilizzare per la modellazione degli effetti di sito in 5 comuni localizzati in area epicentrale (Bonefro, San Giuliano di Puglia, Collotorto, Santa Croce di Magliano e Ripabottoni). A tal fine si è impiegata la tecnica di simulazione *broad-band*, HIC, capace di riprodurre il campo d'onda completo tra 0 e 10 Hz (scenario di livello 2). Gli scenari a minore livello di complessità, generati mediante modelli empirici predittivi (scenari livello 0) oppure con metodi asintotici di simulazione da faglia estesa (scenari di livello 1), sono stati utilizzati per confrontare i risultati ottenuti con la simulazione *broad-band* (scenari di livello 2).

Tutti i risultati sono descritti nel *Deliverable PS3-D7*.

Gli accelerogrammi registrati dalle stazioni situate a distanze epicentrali < 60 km durante la scossa principale sono stati impiegati per vincolare la sorgente sismogenetica dell'evento del 31 Ottobre. Tale registrazioni presentano livelli di scuotimento significativamente diversi. A parità di distanza, le stazioni situate verso Est hanno infatti registrato valori di accelerazione fino a 10 volte superiori rispetto alle stazioni localizzate a Ovest dell'epicentro. Utilizzando la tecnica di simulazione DSM (*Pacor et al., 2005*) per riprodurre i presunti effetti di direttività della prima scossa, i due modelli di faglia proposti in letteratura come sorgenti sismogenetiche delle scosse principali della sequenza, VDL05 (*Valleè e Di Luccio, 2005*) e BV05 (*Basili e Vannoli, 2005*), sono stati impiegati per simulare l'evento del 31 ottobre. Dal confronto con gli accelerogrammi registrati è stato possibile individuare BV05 come la sorgente sismogenetica più appropriata da utilizzare per le successive simulazioni di scenario.

Dati strong e weak motion registrati durante l'intera sequenza sismica molisana (2002-2003) sono stati invece utilizzati per stimare l'attenuazione spettrale  $Q(f)$ , e il modello empirico predittivo MEP a scala locale, LU06 (*Morasca et al., 2007*) da utilizzare nel calcolo degli scenari a livello 0.

La procedura di validazione ha permesso di verificare le capacità predittive delle diverse tecniche di simulazione impiegate e ha consentito la definizione di un modello sismologico per gli eventi principali della sequenza.

Sulla base di questi risultati sono stati simulati gli scenari a diversi livelli di complessità, che hanno tutti fornito un valore massimo di PGA al bedrock di circa 100 gal in area epicentrale. I sismogrammi sintetici mostrano, in generale, ampiezze e contenuto in frequenza simili. Le simulazioni ottenute con HIC sono, comunque, caratterizzate da un maggior livello di complessità e durate maggiori, come conseguenza di una modellazione più dettagliata degli effetti di sorgente e di propagazione. Va tuttavia sottolineato che, nell'area molisana, i dati registrati presentano forme d'onda estremamente complesse, le cui caratteristiche non possono essere interpretate solo in termini di sorgente e di sito. In questa area dovrebbero

essere realizzati modelli di propagazione anisotropi e le funzioni di Green dovrebbero essere simulate con codici di calcolo 2D.

#### Scenari al sito

Gli scenari di moto del suolo per l'area colpita da terremoto del Molise nel 2002 costituivano il tentativo più ambizioso del progetto S3. La verifica a posteriori delle capacità predittive degli scenari si doveva confrontare con un quadro estremamente diversificato sia a scala intra-che inter-comunale.

Gli effetti congiunti di sito e sorgente dovevano spiegare alcune osservazioni quali:

- Due gradi di intensità macrosismica in più osservati a S. Giuliano rispetto ai comuni limitrofi, che in un raggio di 3 km hanno subito danni inferiori.
- La variabilità dei danni all'interno dei singoli abitati, come le distribuzioni di danneggiamento osservate a San Giuliano ed a Bonefro.
- La necessità di avere almeno un fattore 2 sulle PGA tra le zone più o meno danneggiate in San Giuliano per spiegare la differenza dei danni al netto delle vulnerabilità, identiche nei 4 comuni più colpiti (*Augliera et al., 2004*).
- La presenza a San Giuliano di amplificazioni verticali (*Augliera et al., 2004*, *Cara et al., 2005*) e di forti effetti direzionali (con prevalenza della accelerazioni in direzione EW, *Strollo et al., 2007*).
- Accelerazioni di almeno 0.3g nella zona su argille di Bonefro (*Mucciarelli et al., 2004*).

Il risultato acquisito è stato in linea con le osservazioni, ma mentre per i comuni limitrofi sono state sufficienti modellazioni 1-D, con una piccola importanza degli effetti non lineari, per San Giuliano si è resa necessaria una modellazione 3-D.

Le modellazioni 2-d hanno fornito risultati coerenti con gli osservabili solo quando sono state prodotte utilizzando sezioni dal modello 3-d ed abbandonando modelli troppo semplificati (bacini simmetrici, sinclinali, ecc.).

Per costruire il modello 3-D si sono rese necessarie campagne di rilevamento geologico ed indagini geofisiche assai complesse (tomografie geoelettriche, microgravimetria, sismica a riflessione).

In sostanza, il *caveat* più importante per la Protezione Civile riguarda proprio la complessità delle indagini e dei modelli necessari per riprodurre il danno osservato: a priori, nessun modello semplificato attualmente noto avrebbe potuto prevedere in dettaglio quanto accaduto.

Un'ultima considerazione per il sito di Bonefro, dove una modellazione altrettanto non comunemente disponibile ha mostrato l'importanza dell'interazione tra edifici adiacenti per fenomeni di *back-radiation* dell'energia sismica, ponendo in evidenza come l'approssimazione di campo libero sia limitativa in presenza dell'edificato.

Tutti i dettagli delle analisi insieme ai risultati di scenario sono riportati nei *Deliverables PS3-D8* e *Deliverable PS3-D9-D10-D11*.

## **TASK4 - Garda**

#### Scenari al bedrock

Lo scopo di questa attività era la validazione di alcune metodologie per la stima dello scuotimento applicate allo studio del terremoto di Salò del 24 Novembre 2004 (M 5.2), da proporre per il calcolo di scenari da terremoti moderati (*Deliverable PS3-Deliverable 13*).

A tal fine sono stati utilizzati dati di intensità  $I_{MCS}$  osservata (QUEST, 2005), che mostrano una grande dispersione, con valori di  $I_{MCS}$  variabili tra V e VII-VIII nei primi 10 km e la registrazione accelerometrica ottenuta dalla stazione GVD della Rete Accelerometrica Nazionale, localizzata nel comune di Vallio Terme, situata a circa 10 km dall'epicentro. Date le modeste dimensioni del terremoto e considerata la tipologia dei dati utilizzati per la validazione, sono stati realizzati scenari di scuotimento a due soli livelli di complessità: il livello 0, realizzato mediante l'impiego di diversi modelli empirici predittivi (in termini di intensità  $I_{MCS}$ , e valori di picco di accelerazione e di velocità,  $a_{MAX}$  e  $v_{MAX}$ ) e il livello 1, ottenuto con l'impiego di una tecnica di simulazione asintotica da sorgente estesa.

I risultati principali di questo studio sono stati:

1. La definizione di un modello sismologico per l'evento del 24 Novembre 2004, riconoscendo la compatibilità della struttura sismogenetica ipotizzata con le osservazioni e stimando un modello spettrale per l'attenuazione, ottenuto dall'analisi del data set delle registrazioni sismometriche raccolte durante la sequenza sismica del Garda. La sorgente è descritta da una faglia inversa avente la stessa giacitura della sorgente sismogenetica dell'evento del 1901 ( $I_0 = VIII$  MCS da Gruppo di lavoro CPTI, 2004; DISS Working Group, 2006) su cui si è propagata una rottura a velocità piuttosto lenta (2.1 km/s).
2. L'individuazione della miglior legge di attenuazione in intensità (FC06; Faccioli e Cauzzi, 2006) per la generazione di scenari isotropi, basata sulla sola conoscenza della magnitudo e della localizzazione dell'evento, da utilizzare per la generazione di scenari in sede di emergenza e della miglior relazione per convertire i valori di picco del moto in intensità (FC06\_ $v_{MAX}$ ; Faccioli e Cauzzi, 2006).
3. Aver mostrato che metodologie a faglia estesa forniscono, in area epicentrale, risultati migliori rispetto ai modelli isotropi anche nel caso di terremoti moderati, in quanto in grado di riprodurre la distribuzione anisotropa dell'intensità macrosismica osservata entro i primi 10 km dall'epicentro.
4. La generazione di scenari predittivi di livello 1, realizzati sulla base dei risultati ottenuti dalla procedura di validazione e sulla variazione di alcuni parametri poco vincolati, quali la profondità minima della faglia, e la posizione del punto di enucleazione, imprevedibile per eventi futuri. Questi scenari mostrano distribuzioni dello scuotimento strettamente legate alla geometria della faglia ipotizzata. Si propone l'utilizzo di tali scenari a fini di pianificazione territoriale.

#### Scenari al sito

Nell'area del Garda non erano previsti grossi investimenti per la caratterizzazione della risposta di sito. Lo scopo principale di questa attività è stata la classificazione dei suoli secondo la normativa italiana (Ordinanza PCM 3274; 2003 e Norme tecniche per le costruzioni; D.M. 14/09/05) attraverso l'utilizzo congiunto delle informazioni geologiche e della frequenza di risonanza dei depositi, calcolata mediante i rapporti spettrali della componente orizzontale su quella verticale, H/V, di misure di rumore ambientale.

Per la caratterizzazione delle formazioni litologiche dell'area in esame sono state effettuate due campagne di misure di rumore in quattro comuni della Val Sabbia

(Barghe, Sabbio Chiese, Vobarno e Salò, per un totale di 27 siti), a Gardone Riviera (8 misurazioni) e a Toscolano Maderno (12 misure). La scelta delle località è stata guidata da considerazioni circa la distribuzione del danneggiamento, la presenza di depositi fluviali e/o fluvio-glaciali, condizioni di pendio e l'esistenza di conoidi di detrito. Inoltre, è stata condotta una campagna di misura su alcuni degli edifici maggiormente danneggiati durante l'evento in area epicentrale.

I risultati, descritti dettagliatamente nel *deliverable PS3-Deliverables D14-D15*, mostrano che in generale gli effetti di sito maggiormente significativi si hanno in presenza di depositi fluviali, fluvio-glaciali, terrazze alluvionali e conoidi (es. Barghe, Vobarno, Toscolano Maderno), mentre si osservano amplificazioni trascurabili in presenza di formazioni rocciose o pendii (Clibbio, Gardone).

La variabilità a piccola scala del danneggiamento può quindi essere attribuita alla presenza di effetti di amplificazione locale, dovuti al brusco contrasto di impedenza tra calcari e sedimenti soffici. Infine, come per altri terremoti di piccola intensità, gli edifici maggiormente danneggiati potrebbero essere stati interessati da fenomeni di risonanza terreno-edificio.

## **TASK5 - Potenza**

### Scenari al bedrock

Lo scopo principale di questa attività è stato il calcolo di scenari di scuotimento predittivi, da utilizzare per le stime di danno. In particolare, è stato affrontato uno studio di scenario del tipo *multiple-faults*, ovvero tenendo conto di scenari generati da molte faglie a un solo sito. Inoltre l'interazione con gli ingegneri dell'unità di ricerca UR6 ha permesso di stabilire i criteri di selezione degli scenari e le modalità con cui fornire l'input sismico per le successive analisi. Si rimanda al *PS3-Deliverable D17* per maggiori dettagli.

A Potenza gli scenari sono stati calcolati con la seguente procedura:

1. Sono state individuate le sorgenti potenzialmente pericolose per la città, risultate pari a 9. Di queste, 7 sono localizzate a circa 20 km dal sito, corrispondenti a faglie normali capaci di generare eventi di magnitudo compresa fra 6.2 - 6.9, le altre 2 localizzate nei pressi di Potenza sono situate a profondità maggiori (circa 20 km) e corrispondono a faglie di tipo trascorrente capaci di generare eventi di intensità moderata con (M pari a 5.7).
2. Sono stati generati scenari di scuotimento a livello 1 attraverso tecniche di simulazione approssimate che hanno consentito la selezione preliminare delle sorgenti a più alta pericolosità. Sono state così identificate le tre faglie che producono il massimo dello scuotimento atteso a Potenza in termini di picco di accelerazione, di velocità ed Intensità di Housner.
3. Per le faglie identificate, sono stati generati scenari di scuotimento a livello 2 con la tecnica *broad band* HIC. Per ogni sorgente sono stati generati centinaia di modelli di rottura, variando la distribuzione di slip, i punti di enucleazione e la velocità di rottura. L'uso di una tecnica *broad-band* ha consentito di ottenere informazioni affidabili sia su parametri del moto del suolo in bassa frequenza (PGV) che su parametri ingegneristici legati alla durata (intensità di Arias), non sempre è ben riprodotta dalle tecniche in alta frequenza.
4. Per ogni faglia e per vari parametri *strong motion* (PGA, PGV, PGD, PGA/PGV, intensità di Arias e di Housner) sono state definite le corrispondenti distribuzioni statistiche. Le distribuzioni sono state caratterizzate in termini di media e

deviazione standard, mediana, 75-esimo e 84-esimo percentile, moda, minimo e massimo i cui valori sono poi stati utilizzati per la valutazione del danno. Inoltre è stata calcolata per le faglie selezionate la probabilità di occorrenza per le intensità comprese fra il VI e XI MCS, secondo la procedura proposta da Albarello et al. (2007).

5. Allo scopo di permettere agli ingegneri di investigare quali fossero i parametri di input più adeguati per i diversi modelli di vulnerabilità, per ogni faglia, sono state fornite tre famiglie di 7 accelerogrammi, i cui parametri strong motion corrispondevano a specifici requisiti. Il primo gruppo è stato selezionato in modo che i 7 accelerogrammi avessero il picco di accelerazione uguale alla: media, mediana, moda, 75% percentile, 84-percentile, minimo e massimo. Il secondo e terzo gruppo includevano 7 accelerogrammi, con picco di accelerazione e intensità di Housner nell'intorno del valore mediano delle distribuzioni.

#### Scenari al sito

La generazione di scenari di danno per Potenza, al di là dei risultati ottenuti e resi disponibili sul GIS, ha fatto emergere alcune importanti questioni metodologiche, che vengono di seguito riportate. Tutti i dettagli sono riportati nel *deliverable PS3-Deliverables D18-D19-D24*.

1. Per l'analisi di edifici esistenti, l'approccio a curve di fragilità porta ad una maggiore articolazione e completezza rispetto al modello a matrici di danno. Il parametro più indicato per svolgere analisi dinamiche su edifici esistenti è risultata essere l'intensità di Housner;
2. Avendo a disposizione una buona quantità di registrazioni sismometriche in un adeguato numero di siti, l'estensione della stima delle amplificazioni di sito può essere agevolmente estesa ad aree vaste seguendo l'approccio seguente:
  - a. si calcolano i rapporti di Housner tra le componenti orizzontali dei terremoti registrati al sito di riferimento e quelle degli altri siti;
  - b. si effettuano misure di microtremori che ricoprono tutto il territorio di interesse, calcolando il rapporti HVSR;
  - c. si calcola la funzione di correlazione tra i rapporti HVSR da microtremori ed i rapporti HVSR da terremoti alle stazioni sismiche;
  - d. si attribuisce ad ogni punto lo stesso rapporto di Housner della stazione sismica con la quale si osserva la maggior correlazione.
3. Per confrontare gli scenari a curve di fragilità con quelli a matrici di danno è stato necessario avere dati di intensità macrosismica come input. Questi sono stati ottenuti sia da relazioni di attenuazione recentemente fornite nell'ambito del progetto S1 che convertendo i sismogrammi sintetici. L'analisi della correlazione tra intensità macrosismica ed intensità di Housner, unitamente all'esame dei rapporti tra IH alle stazioni sismiche, ha mostrato per gli scenari di danno l'inadeguatezza di una assunzione che sta diventando abbastanza comune in Italia: l'identificazione tra rapporto di Housner ed il coefficiente fondazionale per le analisi sismiche secondo la vecchia normativa. L'analisi dei rapporti a Potenza ha mostrato valori sino a 1.8, ben al di sopra di 1.4, fattore che viene comunemente considerato come limite del coefficiente fondazionale. D'altro lato, l'analisi della relazione tra IH ed intensità macrosismica ha mostrato come un rapporto di 1.4 sia ancora inferiore a quanto necessario per aumentare l'intensità

di mezzo grado; per avere differenze di un grado di intensità è necessario almeno un raddoppio dell'intensità di Housner.

4. L'analisi delle frequenze degli edifici ha permesso di evidenziare una dipendenza della stessa dall'età di costruzione degli edifici. Anche se il livello di aggregazione del dato disponibile non ha permesso considerazioni legate all'ubicazione del singolo edificio, emerge la possibilità di avere numerosi casi di risonanza tra edificio e suolo di fondazione.

## **TASK6 - Gubbio**

### Scenari al bedrock

Gli scenari di scuotimento realizzati per la città e il bacino di Gubbio hanno permesso di mettere a punto le strategie per uno studio di scenario del tipo *multiple-sites-multiple-faults*, ovvero tenendo conto di scenari generati da 2 faglie a più siti e, successivamente, applicando le possibili strategie per la selezione dello scenario rappresentativo da utilizzare per le successive stime degli effetti di sito (*deliverable PS3-Deliverable D20*).

Gli scenari sono stati calcolati in corrispondenza di due strutture sismogenetiche, potenzialmente pericolose per la città di Gubbio, proposte dal DISS (ITGG037 e ITGG038) e capaci di dar luogo a terremoti di magnitudo massima pari a 6, localizzate a circa 10 km dall'area oggetto di indagine. Data la vicinanza delle sorgenti e la necessità di ben campionare il bacino in modo da poter valutare la variabilità, estremamente complessa, della risposta sismica della valle, si è reso necessario simulare in oltre 30 siti lo scuotimento sismico.

Lo procedura adottata in questa area di predizione è stata la seguente:

1. Selezione di 4 siti, rappresentativi della bacino e della città di Gubbio.
2. Validazione del modello utilizzato per descrivere il mezzo di propagazione e della geometria della faglie, attraverso la simulazione del terremoto di Gubbio del 1984 (M 5.7).
3. Generazione, a questi siti, di circa 10000 scenari con la tecnica DSM, ottenuti variando i parametri cinematici descriventi la rottura sulle faglie ITG037 e ITG038 e corrispondenti agli scenari di livello 1.
4. Individuazione della combinazione di parametri che forniscono i valori medi del moto e confronto con le stime predette dagli scenari a livello 0.
5. Verifica che lo scenario medio non generi significative ampiezze del moto, legate a fenomeni di bassa frequenza, quali spostamento permanente e impulsi di lungo periodo dovuti alla direttività, attraverso il calcolo di sismogrammi sintetici a livello 2.
6. Produzione degli scenari al *bedrock* in termini di picchi del moto (PGA e PGV e ordinate spettrali in accelerazione) e sismogrammi sintetici rappresentativi della fase *strong motion*, corrispondenti alle sorgenti definite al punto 4.

Il confronto fra le distribuzioni dei picchi di accelerazione sintetiche calcolate con i modelli a faglia estesa e quelle ottenute dai modelli empirici ha mostrato risultati consistenti sia per quanto riguarda i valori medi che la deviazione standard associate. Nel bacino sono stati stimati picchi di accelerazione rispettivamente pari a 0.28g per la faglia ITGG038 e 0.33g per ITGG037. Per entrambe le faglie a Gubbio città è stato predetto un valore di accelerazione pari a 0.27g, molo vicino a quello proposto dalla mappa di pericolosità sismica, per un tempo di ritorno 475 anni.

Prima di procedere al calcolo degli scenari predittivi, si è proceduto alla simulazione del terremoto di Gubbio del 1984 (M 5.7), avvenuto su una porzione di una delle faglie selezionate per il calcolo del terremoto di riferimento. I risultati ottenuti da questo studio hanno indicato da una parte l'adeguatezza dei modelli di faglia e del mezzo di propagazione da adottare nel calcolo degli scenari predittivi, dall'altra le capacità delle tecniche HIC e DSM a simulare i dati osservati, includendo alcune caratteristiche tipiche del moto del suolo in campo vicino.

In questa area è stato anche mostrato un esempio di applicazione del metodo probabilistico-deterministico proposto da Convertito et al. (2006), e descritto nel *deliverable PS3-Deliverable D2*, basato sull'utilizzo di sismogrammi sintetici ottenuti simulando un numero molto elevato di processi di rottura possibili per la faglia in esame, piuttosto che mediante l'utilizzo di relazioni empiriche predittive del moto del suolo. In particolare sono stati calcolati, a partire dai sismogrammi sintetici simulati a tre siti in esame, i valori di accelerazione spettrale (*damping* 5%) ad 11 periodi prefissati con lo scopo di costruire gli spettri di *hazard* uniforme (UHS). Sulla base dell'*activity rate* stimato per le due faglie ( $6.62 \times 10^{-4}$  anni<sup>-1</sup>), l'analisi probabilistico-deterministica è stata condotta considerando quattro periodi di interesse:  $T_r=20000, 30000, 40000$  e  $50000$  anni il che equivale a supporre che, in media, possano avvenire circa 13 eventi sismici all'interno del periodo di interesse più breve. I risultati sono stati confrontati quelli ottenuti mediante il calcolo, secondo un approccio puramente probabilistico, della pericolosità utilizzando, nel caso presente, il modello empirico predittivo di Sabetta e Pugliese (1996).

#### Scenari al sito

Nell'ambito del Progetto l'area urbana di Gubbio è stata selezionata poiché l'abitato di Gubbio e i suoi dintorni sono rappresentativi di tipologie urbanistiche e/o geomorfologiche molto diffuse in Italia centrale: un centro storico di valenza culturale ed artistica fondato su versante roccioso e aree di espansione residenziale e produttiva insistenti su una piana alluvionale.

Scopo di questa attività è stata la caratterizzazione sismica del bacino, con lo scopo generale di comprendere e quantificare gli effetti di sito nelle conche intramontane.

Nella piana sono state programmate e svolte molteplici indagini sperimentali sia di sismica attiva che passiva, favorite anche dall'intensa attività sismica tipica della zona. Tali indagini hanno riguardato un'attività di monitoraggio con l'installazione di 4 transetti temporanei di stazioni sismometriche, che hanno operato da Giugno 2005 fino a Maggio 2006. Due transetti sono stati posizionati in direzione trasversale all'asse della piana, uno in direzione longitudinale e l'ultimo presso il centro storico di Gubbio. Sono stati registrati più di 300 terremoti locali e regionali, con una magnitudo massima pari a M 4. Parallelamente è stata condotta un'ampia campagna di misure di rumore (per un totale di 90 siti indagati) mediante la tecnica a singola stazione (o dei rapporti spettrali HVSR) per la stima delle frequenze di risonanza del sottosuolo. Inoltre, sono state realizzate 4 misure di rumore con *array* sismico per la definizione di alcuni profili medi di velocità delle onde S nei sedimenti soffici rappresentativo dell'area di piana. Sono stati anche realizzati 2 *downholes*, di cui uno finanziato dal progetto DPC-S6, fino a 50 metri e un *array* 2D di stazioni sismiche. In corrispondenza di uno dei transetti trasversali è stata effettuata l'acquisizione di una linea sismica, lunga 4,5 km circa, per eseguire una tomografia dei tempi d'arrivo e determinare, attraverso la posizione e la forma di possibili orizzonti riflettenti, la



geometria del bacino al di sotto di 500m di profondità. Infine per caratterizzare i primi 30 metri del sottosuolo per un'estensione di circa 30 km<sup>2</sup>, sono stati condotti studi specifici basati sia sull'acquisizione di stratigrafie, fornite dal Comune di Gubbio. Tutte le attività ed i risultati prodotti sono descritti nei *deliverables PS3-Deliverable D21 e PS3-Deliverables D22-D23*.

I principali prodotti di questo Task sono stati i seguenti.

1. La realizzazione di un modello geologico tecnico in cui sono stati caratterizzati i primi 30 - 50 metri della copertura sedimentaria e di una carta di zonazione del bacino, suddiviso in tre classi definite sulla base del loro comportamento deformativo nei primi 50 metri.
2. La realizzazione del modello geologico 3D del bacino, con un Sistema Informativo Territoriale. La ricostruzione ha mostrato che il bacino ha una struttura asimmetrica non rappresentabile con geometrie cilindriche. Il bedrock raggiunge profondità fra i 500 e i 700 m, la copertura sedimentaria è formata da una serie di strati di argille e sabbie depositatesi secondo una struttura monoclinale aventi velocità delle onde S piuttosto elevate (tra i 600 - 900 m/s);
3. Il calcolo delle risposte di sito empiriche nella piana e nella città, espresse in termini di funzioni trasferimento. I risultati hanno mostrato che solo i metodi basati sui rapporti spettrali rispetto ad una stazione di riferimento su roccia (SSR) sono in grado di stimare gli effetti di bacino 2D-3D, viceversa i rapporti spettrali della componente orizzontale rispetto alla verticale (HVSR), a causa delle forti amplificazioni di questa ultima, forniscono indicazioni solo sulla risposta 1D. Si è trovato che i siti nella città non presentano significative amplificazioni, viceversa elevatissime amplificazioni si trovano per tutti i siti localizzati nella piana, con ampiezze fra 5 e 20 su un'ampia banda di frequenze fra 0.2-0.3 Hz localmente.
4. La definizione dei fattori di amplificazione in tutto al bacino, ovvero anche in siti dove non erano state installate le stazioni sismometriche, attraverso la messa a punto una procedura empirica, così schematizzabile:
  - a. Stima di curve di amplificazione attraverso rapporti spettrali SSR (componenti orizzontali) calcolati utilizzando spettri di risposta e utilizzando i dati delle stazioni velocimetriche.
  - b. Associazione tra le curve di amplificazioni sperimentali e le frequenze fondamentali dei siti  $f_0$  attraverso tecniche di interpolazione.
  - c. Validazione delle curve così stimate con le registrazioni raccolte nel bacino e non utilizzate nella stima dei fattori di amplificazione
  - d. Classificazione del bacino sulla base delle frequenze di risonanza  $f_0$ , stimate dalle misure di rumore.
  - e. Applicazione dei fattori di amplificazione, definiti in funzione della frequenza e di  $f_0$  all'intero bacino.

In questo modo sono stati realizzati gli scenari di scuotimento al sito a differenti ordinate spettrali, mostrando chiaramente la necessità di valutare l'*hazard* considerando gli effetti di sito.

La peculiarità di questo bacino è quella di fornire amplificazioni estremamente variabili a seconda della profondità di sedimenti che sono caratterizzati da identici valori di  $V_{S30}$ . Tali effetti hanno bisogno inoltre di essere valutati con studi ad hoc, poiché potrebbero essere fortemente sottostimati dall'applicazione dell'attuale normativa italiana che indicherebbe per, l'intero bacino, l'applicazione di spettri di tipo C.

## **TASK7 - Interfacciamento con l'ingegneria e DPC**

Oltre a quanto citato nel Task 5 (Potenza), l'interfacciamento con la componente ingegneristica ha permesso di svolgere due attività non originariamente previste.

Allo scopo di verificare le difficoltà che possono emergere nel trasferimento dei dati di scenario agli utenti finali l'U.R. ha partecipato ad una esercitazione nazionale di protezione civile svoltasi dal 10 al 14 maggio 2006 in Val d'Agri con il coinvolgimento di un migliaio di partecipanti. Per quest'area erano disponibili scenari di scuotimento realizzati da INGV-MI durante i progetti GNDT-2004. E' stato così possibile seguire tutto il processo partendo dall'integrazione con gli studi di vulnerabilità, attraverso le stime di danno fino allo scenario di perdite/soccorsi attesi. In tutto il processo si è tenuto conto delle incertezze e della loro propagazione, giungendo a farne un elemento caratterizzante della stessa esercitazione.

Inoltre, durante il primo anno di attività è emersa la necessità di un maggiore confronto sui temi al confine tra prodotti sismologici ed ingegneristici, e si è individuato un naturale interlocutore nel gruppo che rappresenta l'altra metà delle ricerche finanziate dal Dipartimento Protezione Civile, ovvero nei progetti ReLUIIS. Il risultato principale e non previsto inizialmente è stata l'organizzazione di un workshop sull'input sismico tenuto il 12 e 13 giugno 2006 presso il centro convegni della Università Federico Secondo ad Anacapri. I risultati del workshop sono stati diffusi sul sito [http://www.reluis.it/doc/convegni\\_eventi/workshop\\_02.htm](http://www.reluis.it/doc/convegni_eventi/workshop_02.htm).

Per quanto riguarda l'interfacciamento con DPC, sono stati progettati e messi a punto i GIS, per la gestione dei risultati degli studi di scenario di tutte le 4 aree. I GIS sono stati strutturati in modo tale da essere facilmente trasferibili e consultabili.

A titolo esemplificativo, utilizzando i risultati ottenuti nell'area del Garda, è stato prodotto, con un sistema WebGIS, uno studio scenario consultabile (interrogazione dati) e navigabile, permettendo la visualizzazione dei vari livelli informativi ([http://esse3.mi.ingv.it/garda\\_alov/Progetto\\_Garda.htm](http://esse3.mi.ingv.it/garda_alov/Progetto_Garda.htm)).

### **3. Eventuali difficoltà maggiori, modifiche di indirizzo, ecc.**

Come già accennato nell'introduzione, non si sono rilevate difficoltà particolari nelle attività di ricerca, né si sono rese necessarie modifiche rispetto a quanto previsto.

L'analisi del rischio che ha corredato il progetto (cap. 5) evidenziava come elementi a maggiore criticità le misure geofisiche in campagna e l'acquisizione di dati sismologici. In entrambi i casi non si sono rilevati problemi.

Una difficoltà operativa è stata segnalata da alcune sub-unità che hanno ricevuto i finanziamenti con ritardo rispetto alle unità principali. Questo è stato causato dai passaggi formali necessari tra capofila ed associati, ed il problema ha assunto dimensioni particolarmente allarmanti per sub-unità dipendenti da U.R. principale allocata presso istituti C.N.R. La nuova gestione centralizzata dell'ente ha impedito la necessaria agilità nei passaggi finanziari, ostacolati anche dalla chiusura del programma centrale di contabilità da fine Novembre ai primi di Marzo. Questo ha posto le sub-unità nella condizione di dover anticipare molte spese e quindi di avere a disposizione un tempo molto stretto per formalizzare gli impegni di spesa.

L'UR3 dell'O.G.S. è stata costretta a sospendere un assegno di ricerca in atto, a sensi di norma vigente, per sopravvenuta grave malattia del titolare, indirizzando i fondi ad altra attività concordata con i coordinatori.

#### **4. Presentazione dei *deliverables*, per singoli *deliverable***

##### **TASK1 - Scenari di scuotimento**

**D0.** In questo rapporto è descritto in dettaglio il confronto fra le tecniche di simulazione adottate nel Progetto S3. Per ogni tecnica sono descritti i principi teorici su cui si basano. Successivamente si illustra l'applicazione al terremoto dell'Irpinia del 1980 descrivendo i parametri utilizzati (geometria della faglia, modello di velocità e attenuazione, parametri cinematici della rottura), gli accelerogrammi registrati e i confronti effettuati fra sintetici e dati. Infine si conclude con i calcoli di scenario in termini di PGA e PGV ottenuti dalle tecniche ibride DSM e HIC nell'ipotesi che si verifichi nuovamente il terremoto ma con diverse modalità.

**D1.** Questo *deliverable* descrive le linee guida per il calcolo degli scenari al bedrock. Il rapporto apre con la definizione di scenario e una breve descrizione degli approcci probabilistici e deterministici per la stima dell'hazard, al fine di comprendere le principali differenze in termini di dati di ingresso e di prodotti. Viene poi introdotta la classificazione degli scenari deterministici utilizzata in questo Progetto. Nel capitolo 3 viene discussa la variabilità degli scenari associata ai processi di rottura sulla faglia. Sono sintetizzati i principali risultati di questo studio parametrico e si rimanda alle Appendici 1, 2 e 3 per tutti i dettagli. Il capitolo 4 sintetizza gli studi di scenario al bedrock effettuati nelle 4 aree discutendo i risultati ottenuti dagli scenari calcolati ai diversi livelli di complessità. Nelle conclusioni sono indicati i principali aspetti metodologici emersi nel Progetto per affrontare uno studio di scenario.

**D2.** Questo *deliverable* descrive, con alcuni esempi di applicazione, le metodologie innovative per la stima dello scuotimento sismico messe a punto nel corso del Progetto. Il capitolo 2 sintetizza la tecnica di simulazione di una faglia estesa per generare segnali a larga banda; il capitolo 3 riassume l'approccio probabilistico deterministico di Convertito et al., (2006); il capitolo 4 mostra un esempio di applicazione di una tecnica di simulazione basata sulle Green Function empiriche e nell'ultimo capitolo si illustra una metodologia per il calcolo di scenari espressi in termini di intensità macrosismica con alcuni esempi di applicazione.

##### **TASK2 - Effetti di sito**

**D3-D4-D5.** Questo unico rapporto racchiude i tre *deliverables* relativi al Task 2. Inizialmente vengono descritti i casi tipici di situazioni comuni sul territorio italiano per i quali non si prevedeva che  $V_{S30}$  fosse un parametro significativo, ovvero le frane, le cavità e aree di faglia, le inversioni di velocità e gli ammassi rocciosi fratturati. Al capitolo è stato aggiunto un paragrafo non inizialmente previsto relativo al confronto tra  $V_{S30}$  ed amplificazioni osservate.

Seguono poi i tre siti test per la verifica della congruità dei modelli ottenibili con diverse tecniche di misura in foro ed in superficie e per i quali erano disponibili registrazioni accelerometriche in foro ed in superficie, nell'ordine Tomba di Buia (UD), Tito Scalo (PZ) e Roma - Valco San Paolo.

Infine il capitolo conclusivo riporta la sintesi delle esperienze maturate relativamente all'inclusione degli effetti di sito negli scenari delle 4 aree studio.

##### **TASK3- Molise**

**D6.** Il CD-ROM contiene le registrazioni velocimetriche e accelerometriche in

formato non corretto relative alla sequenza molisana del 2002 e utilizzate nel Progetto per la calibrazione delle leggi di attenuazione predittive.

Il data set velocimetrico contiene 2787 registrazioni in formato SAC, relative a 86 terremoti e 25 stazioni; quello accelerometrico è archiviato in formato ASCII e composto da 24 registrazioni analogiche e 540 digitali, relative a 51 terremoti e 30 stazioni. Per entrambi i *dataset*, ogni file è corredato di un *header* che riporta le caratteristiche più importanti della registrazione. Le informazioni relative ai parametri ipocentrali, alla magnitudo e alle caratteristiche delle stazioni di misura (posizione, caratteristiche strumentali, etc.) sono contenute in alcuni files Excel.

**D7.** Questo rapporto descrive le attività svolte per il calcolo del moto al bedrock nei comuni molisani di San Giuliano di Puglia, Bonefro, Colletorto, S.Croce di Magliano, e Ripabottoni verificatosi durante gli eventi del 31 Ottobre e 1 Novembre 2002.

Nel capitolo 2, si riassumono gli studi svolti sul data set accelerometrico e velocimetrico registrato durante la sequenza molisana per ricavare un modello empirico predittivo e un modello di attenuazione spettrale. Il capitolo 3 elenca i metodi di simulazione utilizzati, mentre il capitolo 4 discute gli scenari al bedrock prodotti a vari livelli di complessità.

**D8.** In questo rapporto sono descritti i modelli geotecnici 1D e/o 2D per i comuni del Molise selezionati nel Progetto. La caratterizzazione della geometria e delle proprietà geotecniche del sottosuolo a San Giuliano si è basata su una revisione complessiva degli studi geologici di base e delle stratigrafie raccolte dalle indagini geognostiche (più di 80 sondaggi) eseguite dopo l'evento del 31.10.2002. Queste informazioni costituiscono un supporto più che abbondante per la definizione della variabilità delle caratteristiche stratigrafiche in superficie ma dovranno essere integrate con i risultati delle tomografie geoelettriche già eseguite e delle ulteriori indagini sismiche previste dal Progetto, per definire la morfologia profonda di sottosuolo più attendibile per le analisi di scenario. Le proprietà geotecniche dei terreni argillosi sono state invece definite con notevole accuratezza in base ai risultati delle indagini geofisiche in foro (8 prove DH e 3 CH) ed alle numerose prove di taglio torsionale ciclico (CTS) e di colonna risonante (RC) in laboratorio che hanno permesso di ricavare i profili di  $V_S$  e  $V_P$  con la profondità e le curve di variazione di rigidità normalizzata,  $G/G_0$ , e smorzamento,  $D$ , con la deformazione. Per il comune di Ripabottoni, i modelli sono stati definiti sulla base delle mappe geologiche e geomorfologiche aggiornate e 3 nuovi sondaggi geognostici e downholes; inoltre sono state calcolate le funzioni di trasferimento per diversi punti ubicati all'interno del centro storico utilizzando metodi numerici di simulazione 1D e metodologie spettrali basate sui dati raccolti dalla rete sismica temporanea installata dall'Università di Genova.

**D9-D10-D11.** Un unico rapporto raccoglie le elaborazioni sull'area del Molise, per una migliore leggibilità e coerenza. Il deliverable si apre con la descrizione delle campagne di misura a San Giuliano di Puglia, ovvero le tre tomografie geoelettriche, le misure microgravimetriche, la tomografia sismica e le nuove misure di velocità delle onde S condotte con il dilatometro sismico. Il capitolo successivo integra questi dati geofisici con il nuovo rilievo geologico condotto nell'area per giungere al modello geologico/strutturale e geofisico tridimensionale che è stato poi digitalizzato con il programma GOCAD. Il capitolo sull'analisi di risposta sismica locale inizia con il calcolo delle funzioni di trasferimento empiriche dedotte dalle elaborazioni dei segnali registrati dalle stazioni mobili. Si passa quindi alle funzioni

di trasferimento 1D (sia con modelli lineari che con modelli non lineari). Dal modello 3D sono state estratte le sezioni 2D oggetto di modellazione agli elementi finiti. Il capitolo si conclude con l'analisi della risposta sismica locale mediante un modello 3D. Gli ultimi due capitoli sono dedicati alla stima della risposta sismica in altri siti ed allo studio della risposta sismica includendo gli edifici presenti in località Fontana della Terra a Bonefro.

**D11.** È il DVD contenente il GIS realizzato per l'area del Molise (la descrizione della struttura e dei *layers* è documentata nel *Deliverable D9-D10-D11*). Nel GIS è stata raccolta la cartografia di base riguardante l'inquadramento geografico e amministrativo della regione mentre dati di maggior dettaglio sono stati immagazzinati per i comuni di San Giuliano di Puglia, Santa Croce di Magliano, Bonefro e Collotorto. In particolare per il comune di San Giuliano di Puglia sono state archiviate le carte geologiche di dettaglio, l'ubicazione delle misure geofisiche effettuate e la carta dei danni. Informazioni relative alla sismicità dell'area sono anche disponibili. Attualmente, sono archiviati i tre scenari di scuotimento calcolati secondo le condizioni di roccia (D7) per l'evento del 31 Ottobre 2002, per l'evento del 1 Novembre 2002 e uno scenario complessivo considerando entrambi gli eventi.

#### **TASK4 - Garda**

**D12.** E' stato predisposto un DVD anziché un CD visto il volume dei dati. Il DVD contiene le forme d'onda degli eventi registrati dalle stazioni installate a cura della Unità di Emergenza ReteMobile (INGV-CNT) in collaborazione con la Sezione di Milano a seguito dell'evento del 24 novembre 2004 (ore 23:59 locali). Oltre ai dati delle 10 stazioni della Rete temporanea vengono fornite le forme d'onda delle stazioni gestite dalla Sezione di Milano e delle 6 stazioni più vicine della Rete Sismica Nazionale Centralizzata (INGV-CNT). Le forme d'onda sono fornite anche corrette per la risposta strumentale e trasformate in accelerazione e spostamento. In totale sono disponibili 4380 forme d'onda (1460 valori di picco massimo in accelerazione, velocità e spostamento), relative a 187 eventi, registrati sino al 14 dicembre 2004. Sono inoltre disponibili le letture delle fasi P ed S e le localizzazioni di routine degli eventi. Per le determinazioni focali sono state inoltre utilizzati i tempi d'arrivo relativi alla Rete Sismica della Provincia di Trento e alla Rete Sismica del CRS-Udine. Nell'header di ogni file (in formato SAC), oltre ai parametri usuali, sono inserite le letture effettuate e la localizzazione dell'evento

**D13.** Questo rapporto descrive gli scenari di validazione e predizione realizzati nell'area del Garda. Il capitolo 2 apre con la descrizione del terremoto di Salò del 24 Novembre 2004, nei capitoli 3 e 4 e 5 si descrivono la sequenza sismica e l'utilizzo del data set per la stima dei modelli empirici predittivi e del modello spettrale di attenuazione, validi rispettivamente per l'Italia centro settentrionale e in area epicentrale. Il capitolo 6 sintetizza il lavoro svolto per la generazione degli scenari, calcolati direttamente in intensità macrosismica e attraverso relazioni di conversione da valori di picco del moto e gli scenari predittivi, validati con i dati di intensità macrosismica osservati durante l'evento.

**D14-D15.** Questo rapporto descrive le metodologie semplificate che sono state proposte per la valutazione degli effetti di sito nell'area del Garda. Il capitolo 2 descrive le campagne di misura di microtremore nei comuni interessati dall'evento sismico con i principali risultati volti all'individuazione delle frequenze di risonanza dei siti investigati. Il capitolo 3 descrive la classificazione dei siti su base geologica e

sull'uso congiunto delle informazioni geologiche e le misure di rumore. Infine sono riportati i risultati della campagna di misura di rumore effettuata in alcuni edifici danneggiati durante l'evento sismico.

**D15.** È il DVD contenente il GIS realizzato per l'area del Garda (la descrizione della struttura e dei *layers* è documentata nel *Deliverable* D14-D15), contenente dati di carattere generale, ad estensione subregionale-provinciale e dati di dettaglio, quali ad esempio i risultati delle misure di rumore. Inoltre nel GIS si riportano gli scenari di scuotimento calcolati per condizioni di suolo rigido (D13), sia quelli prodotti tenendo in considerazione gli effetti di amplificazione locale, valutati attraverso la classificazione geologica.

#### **TASK5 - Potenza**

**D16.** È stato predisposto un CD che raccoglie le registrazioni digitali a tre componenti disponibili per eventi in un raggio di 300 Km da Potenza, registrati da stazioni ubicate nell'Appennino Lucano. Si tratta sia di registrazioni sismometriche che accelerometriche. I dati sono stati convertiti nel formato SAC. Non è stata eseguita alcuna operazione di correzione. Si è predisposta un'interfaccia in formato HTML che permette l'interrogazione della banca dati secondo i parametri di interesse (magnitudo, localizzazione, disponibilità in più stazioni) e la visualizzazione e gestione delle tracce mediante un *applet* di SeisGram.

**D17.** In questo rapporto sono descritte le attività relative al calcolo degli scenari predittivi al *bedrock*. Il capitolo 2 descrive le faglie potenzialmente pericolose per la città di Potenza, il capitolo 3 riporta tutte le attività svolte per la generazione degli scenari di scuotimento ai livelli di complessità 1 e 2, oltre che una verifica dei risultati ottenuti dall'applicazione di una tecnica stocastica di alta frequenza. Nel capitolo 4 viene descritta l'applicazione di una procedura per la stima delle intensità risentite per le faglie più pericolose a Potenza. Tutti i risultati di questo rapporto sono stati utilizzati per il calcolo degli scenari di danno.

**D18-D19-D24.** La ragione per cui i *deliverables* sono stati accorpati, è la loro stretta interdipendenza. Il sito di Potenza era stato scelto come area di studio poiché vi era la disponibilità di una notevole quantità di dati di vulnerabilità a vario livello di complessità. Questo rende Potenza il sito ideale per confrontarsi all'interfaccia tra sismologia ed ingegneria, e molte delle elaborazioni svolte per il calcolo degli scenari di danno sono alla base anche della valutazione di quali siano i parametri più opportuni da utilizzare. In particolare, facendo riferimento alla numerazione originaria dei *deliverables*, il capitolo 1.3 fa riferimento a D18 (Funzioni di trasferimento e risposta in frequenza degli edifici); I capitoli da 1.1 a 1.2.5 sono D19 (Introduzione ai dati contenuti nel DVD GIS area Potenza), ma allo stesso tempo quelli da 1.2.3 a 1.2.4 fanno parte di D24 (Specifiche dei parametri sismici necessari per la generazione di scenari nel presente e immediato futuro). A quest'ultimo deliverable fanno riferimento anche 3 capitoli che descrivono l'attività di interfaccia tra sismologia ed ingegneria che non erano originariamente previste, ma che hanno interessato appartenenti alle due comunità scientifiche come gemmazione di idee importanti per il Progetto S3. I risultati di queste attività sono riportati nel capitolo 2 (*Selezione di accelerogrammi naturali e sintetici per la predisposizione di curve di fragilità e Scenari di danno sismico per l'esercitazione nazionale di protezione civile "Terremoto Val d'Agri 2006"*) e nel capitolo 3 (*Sintesi del workshop INGV-RELUIS: input sismico*).

**D19.** È il DVD contenente il GIS dell'area di Potenza (la descrizione della struttura e

dei *layers* è documentata nel *Deliverable* D18-D19-D24). Sono archiviati dati di base e informazioni di carattere sismologico. A livello di dettaglio sono archiviati scenari di danno per sezioni di censimento (ISTAT2001), senza e con effetto di sito, considerando rispettivamente varie sorgenti sismiche e diverse stime di input sismico. Per un quartiere sono state inserite anche informazioni di dettaglio degli edifici.

## **TASK6 - Gubbio**

**D20.** In questo rapporto sono sintetizzate le attività relative al calcolo degli scenari predittivi a Gubbio e nella piana. Il capitolo 2 descrive le faglie potenzialmente pericolose per Gubbio, mentre il capitolo 3 riporta il calcolo degli scenari a vari livelli di complessità. Nel paragrafo 3.2 è illustrato in dettaglio lo studio di simulazione dell'evento di Gubbio del 1984 e nel capitolo 3.4 si mostrano i risultati dell'applicazione di un metodo probabilistico-deterministico alle faglie di Gubbio.

**D21.** Il rapporto sintetizza il lavoro svolto per la ricostruzione del modello 3D del bacino di Gubbio. I primi 4 capitoli sono dedicati alla descrizione della raccolta dati (geologici, geotecnica) e delle campagne di misure (*downholes*, misure di rumore linea sismica), il capitolo 5 alla ricostruzione del modello 3D con un sistema GIS utilizzando tutte le misure e dati raccolti e il capitolo 6 ai risultati relativi al modello geotecnica dei primi 50m, al calcolo di funzioni di trasferimento teoriche 1D e i primi risultati della simulazione 3D del bacino.

**D22-D23.** Il rapporto descrive il *data set* di registrazioni velocimetriche raccolte durante l'esperimento e il loro utilizzo per la stima degli effetti di sito. Il capitolo 2 illustra la strumentazione utilizzata e i dati raccolti dai vari transetti installati, il capitolo 3 riguarda la stima delle funzioni di trasferimento empiriche con diversi metodi di analisi, il capitolo 4 espone la procedura per il calcolo dei fattori di amplificazione nell'intero bacino applicati successivamente per il calcolo degli scenari con inclusi gli effetti di sito (Capitolo 6). Una breve analisi di misure ambientali effettuate per diverse tipologie di edifici nell'area di Gubbio è riportata nel capitolo 5.

**D23.** È il DVD contenente il GIS dell'area di Gubbio (la descrizione della struttura e dei *layers* è documentata nel *Deliverable* D22-D23). Sono archiviati gli scenari di scuotimento al bedrock e su suolo, calcolati usando le funzioni di amplificazione prodotte per il bacino. Il GIS contiene anche la mappa delle frequenze fondamentali  $f_0$  e la mappa delle amplificazioni a 1Hz e 20Hz. I dati sono presentati sia in formato puntuale (valori di  $f_0$  da rumore sismico e da terremoto, accelerazioni in corrispondenza dei siti simulati) sia come valori interpolati. Sono inoltre riportate le funzioni di trasferimento per le stazioni dei vari transetti e il modello a 3D sotto forma di *raster*, rappresentanti lo spessore delle varie unità.

**D26.** - E' stato predisposto un DVD anzichè un CD visto il volume dei dati. Si sono raccolti i dati velocimetrici digitali a tre componenti registrati dai 4 transetti installati nel Progetto. Le registrazioni sono relative a circa 300 eventi locali, regionali e telesismici registrati nella Piana di Gubbio da Giugno 2005 fino a maggio 2006. I dati sono forniti nella versione non corretta in formato SAC. Per i dati già processati sono state inserite le immagini delle tracce corrette, componente NS. Sono inoltre inserite le misure di rumore effettuate in 90 siti distribuiti nella piana, in formato ASCII. Il DVD è completamente navigabile e contiene anche le principali informazioni relative alla strumentazione utilizzata.

## TASK7 - Interfacciamento con l'Ingegneria e DPC

D24. vedi *Deliverables D18-D19-D24*

D25. Questo deliverable è il WebGis relativo agli scenari elaborati nell'area del Garda e rappresenta una versione semplificata del GIS di progetto (vedi Deliverable D15). È realizzato utilizzando il programma ALOV, sviluppato dall'università di Sidney (ALOV Software, <http://www.alov.org/>).

È consultabile all'indirizzo [http://esse3.mi.ingv.it/garda\\_alov/Progetto\\_Garda.htm](http://esse3.mi.ingv.it/garda_alov/Progetto_Garda.htm)

### Pubblicazioni

Di seguito si elencano le pubblicazioni che sono state prodotte con il contributo del Progetto S3.

#### Pubblicazioni su riviste internazionali

- Calderoni G., Rovelli A., Milana G., and Valensise G. (2007). Evidence for low stress drop of the October-November 2002 earthquakes in Molise, central-southern Italy, *Journal of Geophysical Research (to be submitted)*
- Caputo R., Salviulo L., Piscitelli S., Loperte A. (2007). Late Quaternary activity along the Scorciabuoi Fault (Southern Italy) as inferred from electrical resistivity tomographies, *Annals of Geophysics*, Vol. 50, N. 2, 137-148
- Caputo R. (2007). Sea-level curves: Perplexities of an end-user in morphotectonic applications, *Global and Planetary Change*, 57, 417-423
- Convertito V., A. Emolo, and A. Zollo (2006). Seismic-hazard assessment for a characteristic earthquake scenario: an integrated probabilistic-deterministic method. *Bull. Seism. Soc. Am.* **96**, 377-391, doi:10.1785/0120050024.
- Del Gaudio V. & Wasowski J. (2007): Directivity of slope dynamic response to seismic shaking. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L12301, doi:10.1029/2007GL029842.
- Gallovič F., and J. Brokešová (2007). *Hybrid k-squared source model for strong ground motion simulations: introduction. Phys. Earth. Planet. Int.* **160**, 34-50.
- Gallovič F., and J. Burjánek (2007). Directivity in strong ground motion modelling methods. *Ann. Geophys.* (in press)
- Laurenzano G., E. Priolo, M. R. Gallipoli, M. Mucciarelli, F. C. Ponzio. Effect of Vibrating Buildings on Free-Field Motion and on Adjacent Structures: the Bonefro (Italy) Case History. *BSSA* (submitted).
- Lombardo G., Rigano R. (2007). Local seismic response in Catania (Italy): a test area in the northern part of the town. *Engineering Geology* (in print).
- Lombardo G., Rigano R. (2006). Amplification of ground motion in fault and fracture zones: observations from the Tremestieri fault, Mt. Etna (Italy). *J. Volc. Geoth. Res.*, 153, 3-4, 167-176.
- Martino S., Minutolo A., Paciello A., Rovelli A., Scarascia Mugnozza G. and Verrubbi V. (2006). Seismic microzonation of jointed rock-mass ridges through a combined geomechanical and seismometric approach. *Natural Hazards*, 39, 419-449.
- Massa M., Marzorati S., D'Alema E., Di Giacomo D. and Augliera P. (2007). Site classification assessment for estimating empirical attenuation relationships for North-Central Italy earthquakes, *J. Earthqu. Eng.* (accepted).
- Morasca P., Zolezzi F., Spallarossa D., and L. Luzi (2007). Ground motion models for the Molise region (Southern Italy), *Soil. Dynam. and Earthq. Eng.*, (accepted).
- Mucciarelli M. and M.R. Gallipoli (2007); Damping estimate for simple buildings through non-parametric analysis of a single ambient vibration recording, *Annals Geoph.* (in press).
- Pacor F., D. Bindi, L. Luzi, S. Parolai S., S. Marzorati and Monachesi G. (2006). Characteristics of strong ground motion data recorded at Gubbio (Central Italy), *Bull. Earthqu. Eng.*, doi: 10.1007/s10518-006-9026-X.
- Parolai S., M. Mucciarelli, M. R. Gallipoli, S. M. Richwalski, A. Strollo (2007) Comparison of site responses estimated using earthquake data and S-wave velocity structure derived from seismic noise array recordings at the Tito test site (Southern Italy), *Bull. Seism. Soc. Am.* (in press)
- Rigano R., Cara F., Lombardo G., Rovelli A. (2007). Evidence for ground motion polarization on fractured lava of fault zones: observations on Mt. Etna volcano. *J. Geophys. Res.* (to be submitted)



- Silvestri F., Vitone C., D'Onofrio A., Cotecchia F., Puglia R., Santucci de Magistris F. (2006). The influence of meso-structure on the mechanical behaviour of a marly clay from low to high strains. *Symposium to celebrate Prof. Tatsuoka's 60th birthday*, Roma
- Sirovich L., Pettenati F. (2007). Validation of a Kinematic, Parametric, Approach to Calculate Intensity Scenarios. (In preparation for *Bull. Seism. Soc. Am*).
- Strollo A., Richwalski S. M., Parolai S., Gallipoli M. R., Mucciarelli M., Caputo R. (2007). Site effects of the 2002 Molise earthquake, Italy: analysis of strong motion, ambient noise, and synthetic data from 2D modelling in San Giuliano di Puglia *Journal Bul. Earthq.Eng.*, Vol. 5, N. 3, 347-362, DOI 10.1007/s10518-007-9033-6.

#### **Publicazioni a convegni**

- Costanzo A., D'Onofrio A., Silvestri F. (2007) Analisi dei danni registrati nel borgo di Gerace durante gli eventi sismici della Calabria del 1783, *XI Congresso Nazionale "L'ingegneria Sismica in Italia"*, ANIDIS, 10-14 Giugno, Pisa.
- Costanzo A., D'Onofrio A., Silvestri F. (2007) Numerical simulations of the ground deformation recorded in the historical town of Gerace during the seismic events in Calabria (1783), *4th Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering*. June 25-28, Thessaloniki, paper no. 1613.
- Costanzo A., D'Onofrio A., Lanzo G., Pagliaroli A., Penna A., Puglia R., Santucci De Magistris F., Sica S., Silvestri F., Tommasi P. (2007) Seismic response of historical centres in Italy: selected case studies, *Workshop on 'Geotechnical Earthquake Engineering related to Monuments and Historical Centers'*, Proc. IV ICEGE, Thessaloniki.
- Costanzo A., (2007) Numerical simulations of the seismic response of the Gerace cliff during the Calabrian seismic sequence (1783), *XVIII European Young Geotechnical Engineers' Conference (EYGEC)*, Ancona
- Del Gaudio V., Wasowski J., Venisti N., Pierri P. (2007): Response of landslide-prone hillslopes to seismic shaking: evidence of amplification and spectral polarization from an accelerometric monitoring network at Caramanico Terme (Italy). *Proceedings 1st North American Landslide Conference*, Vail, Colorado (U.S.A.), 3-8 June 2007, ISBN 978-0-975-4295-3-2, pp. 856-866.
- Franceschina G., F. Pacor, G. Cultrera, A. Emolo, and F. Gallovič (2006). Modelling directivity effects of the October 31, 2002 (Mw=5.8), Molise, Southern Italy, earthquake. *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*; September 3-8, Geneva, Switzerland Paper number 1424
- Laurenzano G., E. Priolo, M. R. Gallipoli, M. Mucciarelli, F. C. Ponzo (2007). Effect of Vibrating Buildings on Free-Field Motion and on Adjacent Structures: the Bonefro (Italy) Case History. *4th Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering*. June 25-28, Thessaloniki. Paper No. 1386.
- Luzi, L., Morasca, P., Zolezzi, F., Bindi, D., Pacor, F., Spallarossa, D. .G., Franceschina (2006) Ground motion models for Molise region (southern Italy). *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*; September 3-8, Geneva, Switzerland , paper n. 938
- Mucciarelli M., M.R. Gallipoli (2006); Comparison between Vs30 and other estimates of site amplification in Italy, *Proc. of the First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, 3-8 September, Geneva (Switzerland), Paper n. 270
- Mucciarelli M., M.R. Gallipoli (2006); Estimate of frequency and damping for large sets of building in dense urban area, *Proc. of the First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, 3-8 September, Geneva (Switzerland). Paper n. 211
- Pessina, V., G. Franceschina, P. Vannoli, L. Luzi and F. Pacor (2006) Damage Distribution and Seismological Model of the November 2004, Salò (Northern Italy) Earthquake, *Proc. of the First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, September 3-8, Geneva, Switzerland paper n. 1371.
- Puglia R., Lanzo G., Pagliaroli A., Sica S., Silvestri F. (2007) Ground motion amplification in San Giuliano di Puglia (Southern Italy) during the 2002 Molise earthquake, *4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*. June 25-28, Thessaloniki, paper no. 1611.
- Puglia R., Silvestri F. (2007). Analisi di risposta sismica locale del centro urbano di San Giuliano di Puglia (CB), *Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica (IARG)*, Salerno.
- Sirovich L., Pettenati F. (2007). A new Kinematic Approach to Calculate Seismic Hazard Scenarios (Intensity and Peak Ground Displacement); an Example in SE Sicily. *AGU2007, Acapulco*, Proc. ref. n. S51A-01.

## Comunicazioni a convegni

- Ameri G., Cirella, G. Cultrera, A. Emolo, G. Franceschina, F. Gallovič, I. Hunstad, F. Pacor, A. Piatanesi, and E. Tinti (2006). Effects of directivity on shaking scenarios: an application to the 1980 Irpinia earthquake, M6.9, Southern Italy. *SSA Meeting – 100<sup>th</sup> Anniversary Earthquake Conference*, San Francisco, USA.
- Augliera P., D'Alema E., Di Giacomo D., Marzorati S. and Massa M. (2006) Un approccio sismologico strumentale allo studio del terremoto del 24 novembre 2004, *Università di Brescia, Facoltà di Ingegneria, Seminari Scientifici e Culturali*, 14 Novembre
- Barani S., De Ferrari R., Ferretti G., Eva C. and Spallarossa D. (2006) Site amplification factor assessment via a multidisciplinary approach: an application in Molise region (Southern Italy). *1st European Conf. Earthquake Engineering and Seismology*; September 3-8, Geneva, Switzerland.
- Cara F., Parolai S., Monachesi G., Milkereit R., Günther E., Di Giulio G., Milana G., Bindi D., Rovelli A. (2006). Test sites in Europe for the evaluation of ground motion amplification: site response of the Gubbio basin (central Italy) using weak motions recorded by linear seismic arrays. *1st European Conf. Earthquake Engineering and Seismology*; September 3-8, Geneva, Switzerland.
- Cavallaro A., Grasso S., Maugeri M. (2006). Clay Soil Characterisation by the New Seismic Dilatometer Marchetti Test (SDMT). *Proc. of the Second International Conference on the Flat Dilatometer*, Washington, April 2 - 5.
- Cavallaro A., Grasso S., Maugeri M. (2006). Volcanic Soil Characterisation and Site Response Analysis in the city of Catania. *Proc. of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*. The Moscone Center, San Francisco, California, April 18 - 22.
- Convertito, V., A. Emolo, F. Gallovič, and A. Zollo, A. (2005). Probabilistic-Deterministic Hazard Scenario for the 1980 Irpinia Earthquake M=6.9, Southern Italy, *IASPEI General Assembly, October 2-8, Santiago, Chile*.
- Convertito, V., F. Gallovič, A. Emolo, and A. Zollo. (2005). Integrated Deterministic and Probabilistic Strong Ground Motion Prediction: Application to 1980 Irpinia Earthquake, M=6.9, Southern Italy, *AGU 2005 Fall Meeting, San Francisco, USA, Eos Trans. AGU, 86(52), Fall Meet. Suppl., Abstract S51D-1045*.
- Cultrera G., Cirella A., Emolo A., Herrero A., Pacor F., Tinti E., Cocco M. (2007). Variabilità dei parametri ground-motion in funzione della descrizione cinematica dei meccanismi di rottura: dall'Umbria-Marche agli studi parametrici. *Workshop "Dieci anni dopo il terremoto dell'Umbria-Marche: stato delle conoscenze sulla sismogenesi in Italia"*, 26-27 giugno, Camerino
- D'Amico V., Picozzi M., Baliva F., Albarello D., Menichetti M., Bozzano F., Martino S., Rivellino S. and Scarascia Mugnozza G. (2006). Test sites in Europe for the evaluation of ground motion amplification: site response of the Gubbio basin (central Italy) using geological data and seismic noise measurements. *1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*,
- D'Amico V., Albarello D., Baliva F. e Picozzi M. (2005). Indagine esplorativa mediante misure di rumore ambientale per la caratterizzazione della risposta sismica nel territorio di Gubbio. *24° Convegno del GNGTS, Roma 15-17 novembre*.
- Del Gaudio V., Venisti N., Pierri P. & Wasowski J. (2007): Application of the Refraction Microtremor technique to investigate the characteristics of seismic response of landslide-prone hillslopes. *EGU General Assembly, 15-20 April, Vienna. Geophysical Research Abstracts, Vol. 9, 02421, 2007 SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2007-A-02421*.
- Del Gaudio V., Wasowski J. (2006): Risultati di alcuni test per la valutazione dell'anisotropia nella risposta sismica di sito. *25° Convegno del GNGTS, Roma, 28-30 novembre 2006. Riassunti Estesi delle comunicazioni*, pp. 233-236.
- Del Gaudio V. & Wasowski J. (2007): New observations on directivity phenomena in the dynamic response of slopes to seismic shaking. *EGU General Assembly, 15-20 April, Vienna. Geophysical Research Abstracts, Vol. 9, 01868, 2007 SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2007-A-01868*.
- Del Gaudio V., Wasowski J., Venisti N., Pierri P. (2005): Nuovi dati sulla risposta sismica locale in aree di pendio instabile. *24° Convegno G.N.G.T.S., Roma, 15-17 novembre 2005, Riassunti Estesi delle comunicazioni*, pp. 235-238.
- Del Gaudio V., Wasowski J., Venisti N. and Pierri P. (2006): Polarisation and spectral properties of the seismic site response of landslide-prone hillslopes: a case study from Italy. *EGU General Assembly 2006, Vienna, 2-7 April 2006. Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 02228, 2006 SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU06-A-02228*.

- Emolo, A., and F. Gallovič. (2005). Relations Between Instrumental Ground Motion Parameters and MCS Intensity in Italy, Application to the Simulated 1980 Irpinia Earthquake, M=6.9, Southern Italy, *IASPEI General Assembly, October 2-8, Santiago, Chile*.
- Eva C., De Ferrari R., Barani S., Ferretti G. (2006) Is the Vs30 a reliable measure of soil classification? *1st European Conf. Earthquake Engineering and Seismology*; September 3-8, Geneva, Switzerland.
- Gallovič, F., and P. Franek (2007). Application of synthetic transfer functions to earthquake motion scenario study in the Grenoble valley, French Alps. *EGU General Assembly*, 15 - 20 April, Vienna, Austria
- Grasso S., Maugeri M. (2006). Using Kd And Vs From Seismic Dilatometer (SDMT) For Evaluating Soil Liquefaction. *Proc. of the Second Int. Conf. on the Flat Dilatometer*, Washington, April 2-5.
- Grasso S., Maugeri M., Spina L. (2006). Seismic Microzonation of The City Of Catania for the Etna Earthquake (M=6.2) of February 20, 1818. *Proc. of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*. The Moscone Center, San Francisco, California, April 18 - 22.
- Guerriero L., Bovenga F., Nutricato R., Wasowski J., Casarano D., Gostelow P., Del Gaudio V., Blonda P. and Refice A. (2006): Developing a Landslide Early Warning System based on satellite measurements. *EGU General Assembly 2006, Vienna, 2-7 April 2006*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 07362, 2006 SRef-ID: 1607- 7962/gra/EGU06-A-07362.
- Lanzo G. , Lombardo G., Pagliaroli A., Rigano R. (2006). Effects of natural and artificial cavities in the evaluation of local seismic response. *25° Convegno Nazionale GNGTS, Roma*, 244-246.
- Lombardo G., Rigano R., Pappalardo G., Castelli F. (2006). Evaluation of the thickness of alluvial sediments in the Catania plain through a geophysical and hydrogeological approach. *25° Convegno Nazionale GNGTS, Roma*, 208-210.
- Marzorati S., Di Giacomo D., D'Alema E., Massa M., Bindi D. e Augliera P., (2006), Osservazione di Microsismi nel Nord Italia, *25° Convegno Nazionale GNGTS, Roma*, 28-30 novembre.
- Marzorati S., Bauz R., Cara F., Di Giacomo D., Gunther E., Monachesi G., Bindi D., Parolai S., (2006), Microsismi osservati a Gubbio (PG): applicazione al calcolo dei rapporti spettrali H/V nell'intervallo [0.1-1] Hz, *25° Convegno Nazionale GNGTS, Roma* 28-30 novembre.
- Massa M., Marzorati S., D'Alema E., Di Giacomo D. and Augliera P. (2006). Site classification assessment for estimating empirical attenuation relationships for North-Central Italy earthquakes. *1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva, 3-8 September.
- Massa M., Ameri G., Pacor F., Augliera P. and Castro R. (2007) A method to select EGF by using waveform similarity analysis: an application for modelling the 24 of November 2004 Salò earthquake (northern Italy, ML 5.2), *EGU General Assembly*, Wien, April.
- Pacor F., Cultrera G., Emolo A., Gallovič F., Cirella A., Hunstad I., Piatanesi A., Tinti E., Ameri G., Franceschina G. (2006). Effects of directivity on shaking scenarios: an application to the 1980 Irpinia earthquake, M 6.9, Southern Italy. *Proc. of 100th Anniversary Earth. Conf. commemorating the 1906 San Francisco earthquake, SSA Annual meeting*; 18-22 April, San Francisco, California
- Pacor, F.; Rovelli, A.; Boehm, G.; Albarello, D.; Parolai, S.; Mucciarelli, M.; Ferretti, G.; Scarascia, G. (2007) DPC-INGV S3 Project - The Gubbio experiment: multidisciplinary investigations for the characterisation of local seismic response. *Oral Session, EGU General Assembly*, Wien, April.
- Pacor F. e Gruppo di Lavoro Task 6-Gubbio, 2006, "Progetto DPC-INGV S3 - l'esperienza di Gubbio: indagini multidisciplinari per la caratterizzazione della risposta sismica locale", *25° Convegno Nazionale GNGTS, Roma*.
- Pettenati F. , Sirovich L. (2006), Two validations of a kinematic approach to calculate seismic hazard scenarios. *1st European Conf. Earthquake Engineering and Seismology*. September 3-8, 2006, Geneva, Switzerland
- Piscitelli S. (2007). Electrical Resistivity Tomography investigations in some Italian active volcanic and seismic areas. *Bilateral Seminar Italy-Japan on Electromagnetics in Seismic and Volcanic Areas*, Chiba-Minato, Chiba, Japan, July 25-27.
- Rigano R., Lombardo G., Barbano M.S., Cosentino M., Distefano G. (2006). Pericolosità e risposta sismica locale nell'area di Lentini (Sicilia sud-orientale). *25° Convegno GNGTS, Roma*, 226-228.
- Zolezzi, F., Morasca, P., Mayeda, K. And Eva C (2006) Attenuation tomography of the Southern Apennines *EGU - Vienna* 2-7 April.
- Zonno, G., Carvalho, A. (2006). Modeling the 1980 Irpinia earthquake by stochastic simulation. Comparison of seismic scenarios using finite-fault simulation methods. *1st European Conf. Earthquake Engineering and Seismology*, September 3-8, Geneva, Switzerland.

## 5. Riferimenti bibliografici

- Albarelo D., V. D'Amico, P. Gasperini, F. Pettenati, R. Rotondi e G. Zonno, 2007. Nuova formulazione delle procedure per la stima dell'intensità macrosismica da dati epicentrali o da risentimenti in zone vicine. Progetto DPC-INGV S1, <http://esse1.mi.ingv.it/d10.html>
- Augliera P., M. Dolce, G. Franceschina, M. Frapiccini, M. R. Gallipoli, P. Harabaglia, L. Luzi, A. Masi, S. Marzorati, M. Mucciarelli, F. Pacor, L. Samela (2004) Site amplification in the epicentral area of the 31/10/2002 earthquake (Molise, Italy): comparison between damage data, microtremors, weak- and strong-motions. *13th World Conference on Earthquake Engineering* Vancouver, 2004 - CD-Rom, Paper No. 725
- Basili, R., and Vannoli, P. (2005). Source ITGG052 *San Giuliano di Puglia* and Source ITGG053 *Ripabottoni*. In: DISS Working Group, Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), 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/DISS/> - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.
- Bazzurro, P., and C. A. Cornell (2004a), Ground-motion amplification in nonlinear soil sites with uncertain properties, *Bull. Seism. Soc. Am.* 94, no. 6, 2090-2109.
- Bazzurro, P., and C. A. Cornell (2004b), Nonlinear soil-site effects in probabilistic seismic-hazard analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.* 96, 2110-2123.
- Cara F., A. Rovelli, G. Di Giulio, F. Marra, Th. Braun, G. Cultrera, R. Azzara, and E. Boschi (2005) The role of site effects on the intensity anomaly of San Giuliano di Puglia inferred from aftershocks of the Molise, Central Southern Italy, sequence, November 2002, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 95(4):1457-1468
- Convertito V., A. Emolo, and A. Zollo (2006). Seismic-hazard assessment for a characteristic earthquake scenario: an integrated probabilistic-deterministic method. *Bull. Seism. Soc. Am.* 96, 377-391, doi:10.1785/0120050024.
- DISS Working Group (2006). Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.0.2: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. <http://www.ingv.it/DISS/>, © INGV 2005, 2006 - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - All rights reserved.
- Faccioli, E., Cauzzi, C. (2006). Macroseismic intensities for seismic scenarios, estimated from instrumentally based correlations. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, 3-8 September, Paper Number: 569
- Gallipoli M. R., Mucciarelli M., Dolce M., (2007) Dinamica degli edifici, in " Scenari di pericolosità sismica della fascia costiera marchigiana - Microzonazione sismica di Senigallia" a cura M. Mucciarelli e P. Tiberi, 275-284
- Gallovič F., and J. Brokešová (2007). *Hybrid k-squared source model for strong ground motion simulations: introduction*. *Phys. Earth. Planet. Int.* 160, 34-50.
- Gruppo di lavoro CPTI (2004). Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2004 (CPTI04), INGV, Bologna. <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI04/>
- Hutchings, L. (1994). Kinematic Earthquake Models and Synthesized Ground Motion Using Empirical Green's Functions. *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, pp. 1028-1050.
- Morasca P., Zolezzi F., Spallarossa D., and L. Luzi (2007). Ground motion models for the Molise region (Southern Italy), *Soil. Dynam. and Earthq. Eng.*, (accepted).
- Mucciarelli M., Masi A., Gallipoli M.R., Harabaglia P., Vona M., Ponzo F. and Dolce M. (2004) Analysis of r.c. building dynamic response and soil-building resonance based on

- data recorded during a damaging earthquake (Molise, Italy 2002), *Bull. Seism. Soc. Am.*, **94**, 5, 1943-1953.
- Norme tecniche per le costruzioni (2005); D.M. 14/09/05 (Gazzetta Ufficiale n. 222 del 23/11/2005)
- Ordinanza PCM 3274 (2003) Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione del territorio nazionale e di normative tecniche (G.U. n.105 del 08/05/2003)
- Pacor, F., Cultrera, G., Mendez, A. and Cocco, M. (2005), Finite Fault Modeling of Strong Motion Using a Hybrid Deterministic-Stochastic Approach, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **95**, 225-240.
- QUEST (QUick Earthquake Survey Team) (2005). Rilievo macrosismico del terremoto del Garda del 24 novembre 2004, *Ingegneria Sismica*, Anno XXII - N.2, 44-59.
- Strollo A., S. M. Richwalski, S. Parolai, M. R. Gallipoli, M. Mucciarelli and R. Caputo, (2007) Site effects of the 2002 Molise earthquake, Italy: analysis of strong motion, ambient noise, and synthetic data from 2D modelling in San Giuliano di Puglia, *Bull. Earthq. Eng.*, doi 10.1007/s10518-007-9033-67.
- Vallée, M. and Di Luccio, F. (2005), Source analysis of the 2002 Molise, southern Italy, twin earthquakes (10/31 and 11/01), *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L12309.