

Progetto S2: proposta per un programma di ricerca relativo alle stime di pericolosità sismica

Dario Albarello

Dip. di Scienze della Terra, Università degli Studi di Siena

Via Laterina, 8, 53100 Siena

Basi Concettuali, Motivazioni e Scopi

Nell'ambito delle linee di indirizzo decennali per i progetti previsti dall'accordo quadro DPC-INGV per il decennio 2012-2021, il progetto S2 ha come finalità principali *“lo sviluppo e il confronto di differenti modelli per il calcolo della pericolosità sismica a lungo e medio termine e di metodologie per la loro validazione, fino al conseguimento di modelli finali di consenso”* inteso che *“.. si rende necessario uno sforzo per omogeneizzare e integrare i risultati ottenuti attraverso i diversi approcci e per assimilare le nuove informazioni in un modello nazionale di pericolosità”*. Per questa finalità è prevista una prima fase, nella quale sono identificate due aree di studio (la Pianura Padana e l'Appennino Meridionale (dal Lazio e Abruzzo meridionali fino al confine fra la Basilicata e la Calabria). Vengono quindi definiti gli elementi di base del programma. L'obiettivo finale è definire una carta di scuotimento atteso relativamente ad intervalli di esposizione che, se si considera la terminologia definita da Jordan et al. (2011), vanno da qualche anno a diversi anni (“lungo termine”) e da qualche mese a qualche anno (“medio termine”). Inoltre viene fissata la scala spaziale di interesse che, almeno per quanto riguarda la potenziale applicabilità dei risultati, deve permettere la formulazione di un modello “nazionale” di pericolosità. Trattandosi di fatto di un tentativo di previsione di futuri scuotimenti sismici, la scala temporale e quella spaziale di potenziale interesse distinguono questo progetto dal Progetto S3. Un altro chiaro elemento di differenziazione fra S2 ed S3 è che il primo è più direttamente finalizzato alla stima del rischio nel medio e lungo termine ed ha come obiettivo finale la definizione dello scuotimento atteso caratterizzato da una determinata probabilità di eccedenza in un intervallo di esposizione predeterminato (o, in modo equivalente, della probabilità di eccedenza relativa ai diversi livelli di scuotimento attesi nell'intervallo di esposizione) nei vari punti dell'area di interesse, mentre il secondo è più legato alla individuazione di volumi crostali capaci di generare nel breve termine eventi sismici significativi. In pratica: mentre il “focus” di S2 è uno scenario di scuotimento (in termini di un limite superiore ragionevolmente atteso), quello di S3 è la determinazione dello stato del processo sismogenico.

Trattandosi di tentativi di previsione di scenari di scuotimento condotte in condizioni di incertezza (sia essa di carattere epistemico o aleatorio secondo una distinzione da alcuni ritenuta importante), l'esito dell'indagine dovrà comunque avere una forma “probabilistica” che caratterizzi il livello di verosimiglianza associato alle stime fornite. In questo contesto, i vari approcci alla “previsione” degli scenari di scuotimento futuri si differenziano essenzialmente per il diverso ruolo attribuito alla componente deterministica delle stime (ovvero quella base informativa legata alla modellazione fisica e geologica del processo indagato) in rapporto alla componente statistico/probabilistica (ovvero legata alla modellazione stocastica dello stesso processo). In questo senso, entrambe i progetti S2 ed S3 devono svilupparsi lungo un percorso che fa tesoro dei risultati raggiunti nell'ambito del progetto S1, più strettamente orientato allo sviluppo delle conoscenze relative al processo sismogenico.

Per quanto riguarda la specificità di questa ipotesi di lavoro per il progetto S2, vengono identificate due obiettivi il cui conseguimento potrebbe portare un consistente avanzamento delle conoscenze in quest'ambito

e, soprattutto, garantire un trasferimento efficace sul piano applicativo (norma sismica, valutazioni di rischio, ecc.) delle conoscenze disponibili sulla sismicità dell'area italiana.

Il primo è l'individuazione dei possibili modelli alternativi per la stima della pericolosità sismica che si rivelino effettivamente applicabili (in termini di efficace parametrizzazione, consistenza interna, plausibilità fisica, computabilità, utilità dei risultati) all'area Italiana. Allo stato attuale, esistono vari modelli di calcolo (dipendenti dal tempo o meno) già applicati localmente in varie parti del territorio italiano e che meritano indagini approfondite. Due gli elementi chiave di ciascuno di questi modelli: il ruolo e la caratterizzazione delle sorgenti sismogeniche (in termini geometrici e di potenziale sismogenico) e la definizione del campo di scuotimento indotto dall'attivazione di ciascuna di queste (leggi di attenuazione). Sebbene i due aspetti possano essere analizzati separatamente (per esempio come si è fatto nell'ambito del vecchio progetto S2), è il loro uso combinato a fornire il risultato finale (la pericolosità) e quindi a richiedere una valutazione integrata. I vari modelli di calcolo si differenziano per le diverse modalità utilizzate per combinare questi due elementi informativi all'interno di un percorso capace di fornire stime di scuotimento e relativo livello di verosimiglianza per l'intera area di studio. In quest'ambito risulta essenziale valutare l'effettiva applicabilità di ciascuno schema di calcolo in rapporto alle informazioni effettivamente disponibili. Analisi di "sensibilità" (per esempio Musson, 2012), confronto fra risultati prodotti da modelli differenti, modellazioni numeriche di vario genere, possono rivelarsi utili per la individuazione di elementi di criticità interni a ciascun modello di calcolo e valutarne l'effettiva applicabilità. Tutti questi modelli avranno come "pietra di paragone" (benchmark) il risultato ottenuto dal gruppo di lavoro MPS04, che portato alla definizione della Carta di Pericolosità Sismica del Territorio nazionale a partire dall'approccio Cornell-McGuire (Bender e Perkins, 1987). Questo prodotto rappresenta il frutto più maturo di un lungo percorso partito nell'ormai lontano 1984 e si è andato costantemente sviluppando (pur mantenendo lo stesso impianto teorico e computazionale) fino alla carta del 2004. Questo prodotto costituisce di fatto il termine di confronto per tutte le stime alternative che aspirano a recepire e tradurre in termini applicativi le conoscenze sui processi sismo genici che si sono andati sviluppando nel corso degli ultimi anni. Un altro elemento importante per differenziare i diversi approcci è la modalità scelta per la parametrizzazione dello scuotimento (o del danno) di volta in volta considerata. Questo aspetto gioca un ruolo essenziale nel definire il dominio di applicazione di ciascuna procedura. Una sostanziale differenza in questo senso esiste fra una parametrizzazione dello scuotimento in termini spettrali (PGA, PSA, Housner Intensity, ecc.) ed una in termini macrosismici. Questa differenza non riguarda solo la scelta delle relazioni di attenuazione da applicare, quanto l'intero impianto di calcolo e di parametrizzazione.

Il secondo obiettivo è quello di affrontare il problema della potenziale coesistenza di modelli di calcolo alternativi (in termini di ipotesi di base, utilizzo delle informazioni disponibili, ecc.), tutti "a priori" ugualmente plausibili ed internamente consistenti, che risultano in valutazioni di pericolosità sismica assai diverse fra loro (si veda per esempio Pace et al., 2011). A questa molteplicità di soluzioni si aggiunge la sensibilità di molti di questi modelli a elementi informativi spesso affetti a loro volta da notevoli incertezze talvolta difficilmente quantificabili (per esempio la geometria delle strutture sorgente nell'approccio Cornell-McGuire o le caratteristiche dei "Kernel" di liscio nell'approccio del tipo "smoothed seismicity"). In questo contesto, l'uso di approcci ad "albero logico" (p.es., SSHAC 1997) per gestire questo genere di incertezze ("epistemiche" secondo alcuni) sposta il problema dalla scelta "a priori" di un modello ad una scelta "a priori" del peso attribuito a ciascun modello nell'ambito di una stima di pericolosità "combinata". In questo contesto risulta quindi prioritario definire metodologie per la definizione del livello di attendibilità associato a ciascun modello o combinazione di modelli. Questo risultato può essere raggiunto tramite procedure di valutazione condivise

capaci di valutare l'effettivo potenziale predittivo di ciascun modello. Elemento chiave di questa analisi è la valutazione dello schema di calcolo nella sua interezza a partire dal confronto degli esiti finali del calcolo (la stima di scuotimento o della probabilità associata a quest'ultimo) con osservabili opportunamente selezionati relativamente ad un periodo di controllo. Laddove possibile queste valutazioni dovrebbero avere carattere "prospettivo" ovvero riguardare osservabili non considerati nella parametrizzazione del modello di calcolo. Procedure in questo senso sono già state delineate nell'ambito del vecchio progetto S2 e possono essere agevolmente implementate ed applicate nell'ambito del nuovo progetto.

Articolazione del progetto

Nel progetto proposto vengono delineate due linee principali di indagine (sottoprogetti):

- a) Definizione, parametrizzazione ed applicazione di modelli di calcolo della pericolosità sismica alternativi al modello MPS04 (sia dipendenti che non dipendenti dal tempo) e loro applicazione nelle aree di studio della Pianura Padana e dell'Appennino Meridionale relativamente a periodi di esposizione compresi fra qualche anno e qualche decina di anni, ovvero su intervalli tali da risultare di interesse per finalità di protezione civile volte alla riduzione del rischio nel medio e lungo termine; in quest'ambito è prevista la definizione di carte di pericolosità in termini di diversi parametri di scuotimento e danno da utilizzare per la prevenzione del rischio sismico. Scopo del sottoprogetto è quello di fornire mappe di scuotimento confrontabili con quelle di MPS04 ed eventualmente utilizzabili da parte del DPC. Questo prodotto ha il duplice scopo di "allineare" tutti i possibili "competitori" per una carta nazionale di pericolosità inducendo i diversi proponenti a confrontarsi con l'esigenza di un prodotto direttamente utilizzabile da parte del DPC.

Non vengono individuati specifici task relativi all'impiego di determinati osservabili per la caratterizzazione del processo di generazione dei terremoti (vincoli tettonici, osservazioni geodetiche, ecc.) né riguardo alle modalità utilizzate per la modellazione delle modalità di propagazione dell'energia sismica (leggi di attenuazione specifiche per le diverse aree, leggi di attenuazione per terremoti profondi, effetti di campo vicino, propagazione deterministica). Queste ricerche verranno invece svolte (se ritenuto necessario) su indicazione e sotto la responsabilità e la direzione dei coordinatori delle diverse UR coinvolte, che si faranno carico di definire la quota parte di risorse economiche e umane dedicate a questo scopo. Questa scelta ha soprattutto il fine di garantire un livello di integrazione ottimale degli elementi necessari alla costruzione delle carte di pericolosità, evitando forme di parcellizzazione delle ricerche e carente organizzazione interna delle diverse componenti dello schema di calcolo.

Strumento di calcolo essenziale per lo sviluppo delle ricerche in questa linea sarà il codice CRISIS, messo a disposizione del DPC come esito del precedente progetto S2 (Deliverable 6.1, progetto S2 2007-2009). In questo senso, i risultati previsti costituiscono una integrazione ed una estensione di quanto prodotto in proposito nell'ambito del progetto S2 del progetto DPC-INGV 2007-2009 (Deliverable D6.3). Si tratta di una integrazione per quanto riguarda l'insieme dei modelli di calcolo utilizzati che si estende a comprendere modalità di calcolo non considerate in precedenza. Si tratta infine di una estensione per quanto riguarda l'area di studio che va a coprire l'intera pianura padana e l'Appennino meridionale, laddove in precedenza si limitava a solo 39 siti relativi a stazioni accelerometriche.

All'interno di questo sottoprogetto e limitatamente all'area della Pianura Padana, è anche previsto uno studio preliminare sulla pericolosità indotta da impianti di sfruttamento e stoccaggio di risorse energetiche.

- b) Valutazione dei prodotti ottenuti dai diversi schemi di calcolo mediante confronto (quantitativo) con osservabili opportunamente selezionati e conformi al tipo di previsione di scuotimento effettuata e combinazione delle stime ottenute in uno schema capace di produrre stime condivise ("di consenso"), aggiornate (in rapporto allo stato delle conoscenze disponibili) e di immediato utilizzo della pericolosità sismica delle aree analizzate. Questa valutazione e soprattutto la formulazione di una eventuale carta di consenso verranno condotte coinvolgendo tutti i soggetti istituzionali e accademici che in passato hanno contribuito alla formulazione delle carte nazionali di pericolosità sismica (INGV, OGS, DPC, Università).

Sottoprogetto S2_a

S2.a. Task 1: Modelli indipendenti dal tempo

Lo scopo è quello di proporre stime di pericolosità sul territorio nazionale metodologicamente affini al modello utilizzato da MPS04, ma differenti nella struttura di calcolo, le ipotesi di base e l'impiego di informazioni pregresse. Di interesse in questo senso è lo sviluppo di carte di pericolosità basate sull'approccio MPS04 ma utilizzando diverse e più dettagliate geometrie delle zone sismogeniche per le due aree della pianura padana e dell'Appennino meridionale e considerando anche parametrizzazioni spettrali dello scuotimento di tipo integrale (Intensità di Housner e di Arias, Intensità macrosismica). Un esempio in questo senso è fornito dal lavoro di D'Amico et al. (2012) per la Sicilia Orientale. Di potenziale interesse sarà anche l'applicazione estensiva di modelli alternativi basati sulla modellazione statistica della sismicità senza l'uso di informazioni sismotettoniche ("smoothed seismicity") e il modello di calcolo basato sull'analisi delle storie sismiche al sito ("approccio di sito"). Si tratta di modelli già sviluppati e collaudati (p.es., Albarello et al., 2002; Akinci et al., 2004; Gomez-Capera et al., 2010) che andranno applicati alle due aree producendo carte di pericolosità fra loro confrontabili e di pronto utilizzo. Viene prevista la costruzione di carte di scuotimento (in termini spettrali e/o macrosismici) a probabilità fissata (o alternativamente in termini carte di probabilità per diversi livelli di scuotimento) su una griglia regolare del tipo di quella utilizzata per MPS04 relativamente a tre periodi di durata pari a 5, 20 e 50 anni. Dato che si tratta di una prosecuzione di indagini già avviate e in continuità con studi precedenti, si prevede di dedicare a questo argomento circa un quarto delle risorse disponibili e prevedere il loro completamento **entro il primo anno** del progetto.

S2.a. Task 2 Modelli dipendenti dal tempo

Lo scopo è quello di applicare alle due aree di studio schemi di calcolo della pericolosità dipendenti dal tempo che fanno un uso più estensivo (rispetto ai modelli indipendenti dal tempo) di elementi di tipo deterministico. Tre i possibili elementi di novità rispetto agli approcci indipendenti dal tempo: la individuazione di sorgenti sismogeniche definite nel dettaglio (faglie), l'impiego di modelli di ricorrenza non stazionari sulla singola struttura (modello di ricarica ecc.), la modellazione in termini probabilistici dell'interazione a breve a lungo raggio fra l'attività di sorgenti sismogeniche (siano esse

faglie singole o strutture complesse) inclusi fenomeni di clustering spazio-temporale. Ciascuno di questi modelli deve essere strutturato in modo da permettere una stima dello scuotimento massimo atteso (o delle probabilità associate ai diversi livelli di scuotimento) nell'intervallo di esposizione (con dimensioni dell'ordine di anni o decine di anni) direttamente confrontabili con quelle fornite dai modelli indipendenti da tempo. Nel primo anno del progetto potranno essere utilmente sviluppate completamente solo procedure già applicate in passato su aree ristrette. In particolare vengono considerati potenziali candidati i modelli del tipo di quelli a loro tempo sviluppati da Pace et al. (2006, 2010), Akinci et al. (2009), Peresan et al. (2009), Panza et al. (2011), Zuccaro et al. (2011), Lombardi et al. (2009), Kagan e Jackson (2012). Per questi studi viene prevista l'erogazione nel primo anno di circa ... K€ essenzialmente dedicati al completamento di studi pregressi e alla specializzazione dei metodi disponibili alle due aree di interesse. Come esito di queste indagini saranno prodotte carte di scuotimento (in termini spettrali anche di tipo integrale e/o macrosismici) a probabilità fissata (o alternativamente in termini carte di probabilità per diversi livelli di scuotimento) su una griglia regolare del tipo di quella utilizzata per MPS04 relativamente a tre periodi di esposizione pari rispettivamente a 5, 20 e 50 anni. Trattandosi di stime dipendenti dal tempo, le carte di scuotimento relative ai tre periodi di esposizione verranno prodotte a fini "retrospettivi" per i periodi 2006-2010, 1991-2010, 1961-2010 e a fini prospettivi per i periodi 2013-2017, 2013-2022, 2013-2062. Le mappe retrospettive hanno lo scopo di fornire indicazioni per un confronto con le osservazioni di scuotimento relative ai diversi periodi di esposizione. Per questo motivo, laddove possibile, le relative mappe di pericolosità dovrebbero essere redatte considerando le sole informazioni disponibili prima dell'inizio del relativo periodo di esposizione.

Accanto a questa attività saranno considerati anche studi pilota volti alla definizione di modelli di calcolo interamente innovativi che tengano conto delle dell'interazione fra strutture sismogeniche sia a partire da modelli fenomenologici (p.es., Zoller e Hainzl, 2010; Console et al., 2010) che da indicazioni di tipo deterministico (p.es. Mantovani et al., 2012) . Trattandosi di studi esplorativi volti alla messa a punto di modelli interamente innovativi, si prevede un finanziamento iniziale piuttosto ridotto per il primo anno, che verrà però incrementato negli anni successivi, anche in funzione dei risultati conseguiti in termini di effettiva applicabilità dei metodi in termini di scenari di scuotimento attesi.

S2.a. Task 3 Ruolo della geologia locale (scala 1:50000)

Una delle difficoltà che si presentano nella valutazione empirica delle carte di pericolosità è la difficoltà di trovare osservabili (registrazioni accelerometriche in particolare) relativi a siti di riferimento e quindi compatibili con stime di pericolosità di tipo standard. Questo problema potrebbe essere parzialmente superato se le stime di pericolosità potessero tenere conto delle condizioni locali responsabili di alterazioni del moto sismico. Viene proposto uno studio pilota volto a definire indicatori sintetici (proxies) disponibili su area vasta, delle condizioni di sito (geomorfologiche e strutturali) capaci di influenzare la pericolosità sismica. In questo senso sono state condotte alcune esperienze nell'area dell'Italia Nord Orientale (Carulli et al., 2002) che potrebbero fornire indicazioni da sviluppare. Dato il carattere preliminare dello studio, il finanziamento previsto è ridotto e potrà essere ampliato negli anni successivi.

S2.a. Task 4 Sismicità indotta

Negli ultimi anni è grandemente cresciuta la consapevolezza dei pericoli indotti da attività minerarie (estrazione e iniezione di fluidi nel sottosuolo) e da strutture di stoccaggio energetico (dighe) nella perturbazione dell'equilibrio dinamico del sottosuolo, perturbazione che talvolta esita nell'occorrenza di eventi sismici potenzialmente dannosi. Circa una decina di serbatoi naturali sono attualmente in uso e circa 15 in fase di sviluppo o in attesa di approvazione (Nomisma Energia, <http://www.nomismaenergia.it>). Studi condotti in varie regioni del mondo dimostrano che questi eventi, indotti dall'attività antropica, possono contribuire in modo significativo alla pericolosità sismica delle aree interessate dagli impianti. Al di là degli studi promossi ormai molti anni fa da Caloi negli anni '60 del '900 e da pochi altri (p.es. Piccinelli et al., 1995), da molti anni manca nel nostro paese un'attenta attenzione al problema. All'interno del sottoprogetto, si vogliono gettare le basi per una rinascita dell'attenzione al problema utilizzando essenzialmente esperienze condotte in altri paesi. Scopo ultimo di questa attività sarà fornire linee guida per la stima della pericolosità sismica indotta da impianti minerari o di stoccaggio nell'area della pianura Padana, recentemente oggetto di indagini specifiche. In particolare, questo progetto si propone di dare avvio ad una serie di azioni mirate a colmare queste lacune e permettere di definire procedure e standard per la valutazione della pericolosità sismica e il controllo delle attività. In un anno di lavoro ci si propone di fare il punto sulla situazione esistente riconoscendo e valutando lo stato dell'arte sull'argomento (normativa e pratiche applicative in Italia e negli altri paesi) soprattutto in rapporto alle procedure adottate per la valutazione della pericolosità sismica indotta. Dato il carattere preliminare dello studio, il finanziamento previsto è ridotto.

Sottoprogetto S2_b

S2.b. Task 1 Osservabili di controllo

Si tratta di costruire una banca dati specificamente dedicata alla validazione delle stime di pericolosità sismica relative ai periodi di esposizione considerati nei calcoli retrospettivi della pericolosità. Per quanto riguarda i parametri spettrali, si tratta di considerare anche dati accelerometriche esistenti (ITACA, ecc.) individuando quelle situazioni dove il livello di completezza della documentazione disponibile, le informazioni sulle condizioni geologiche al sito possano garantire una buona rappresentatività dei dati di scuotimento disponibili nelle diverse forme di interesse (parametri spettrali integrali, ecc.). Riguardo ai dati macrosismici, si tratta di utilizzare le informazioni raccolte nelle più recenti basi dati (DBMI11, ecc.) per definire l'insieme dei dati effettivamente utilizzabili per la validazione. Si tratta in particolare di omogeneizzazione (laddove necessario) le stime di intensità rapporto alle diverse scale macrosismiche utilizzate (EMS92, MCS, Questionari on-line). Data la disponibilità di dati, il finanziamento iniziale previsto per questo sottoprogetto è ridotto.

S2.b. Task 2 Validazione empirica delle stime di pericolosità sismica

Le metodologie idonee per il controllo su base empirica delle stime di pericolosità sismica sono state ben codificate e descritte nei prodotti forniti dal precedente progetto S2 (2007-2009 <http://nuovoprogettoesse2.stru.polimi.it/>, Deliverable D6.2). Si tratta di diverse procedure formalmente coerenti e consolidate e che hanno già trovato applicazione in passato (Albarelo e

D'Amico, 2008; Mucciarelli et al., 2008). Si tratta in questa fase di aggiornare il quadro teorico già delineato in passato, valutando possibili estensioni che implementino strategie di “probability scoring” utilizzate in altri campi di ricerca (p.es., Lind, 1996). Le procedure così definite verranno utilizzate nella parte finale del progetto per fornire valutazioni di attendibilità dei risultati prodotti nei task 1 e 2 del sottoprogetto S2a in termini di scenari di scuotimento atteso mediante un confronto con le osservazioni accelerometriche e macrosismiche relative ai periodi di esposizione considerati in questi due task. Il finanziamento previsto per questo Task ridotto potrà essere incrementato negli anni successivi del progetto.

Risultati attesi nel primo anno in rapporto alle linee guida e possibilità di utilizzo da parte del DPC

Uno dei principali risultati attesi e di più diretto utilizzo da parte del DPC sarà la disponibilità di un insieme di carte di pericolosità sismica per le due aree di interesse (Pianura Padana, Appennino meridionale) prodotte utilizzando approcci non dipendenti dal tempo (Task 1 Sottoprogetto a) e dipendenti dal tempo (Task 2, Sottoprogetto b). Le carte saranno fornite in forma omogenea (ovvero su una griglia regolare identica a quella utilizzata per la carta di riferimento MPS04) utilizzando parametri di scuotimento atteso in termini spettrali (PSA, Intensità di Housner, intensità di Arias, ecc.) ed in forma macrosismica (MCS, EMS92). Le stime saranno fornite per 6 periodi di esposizione (2006-2010, 1991-2010, 1961-2010, 2013-2017, 2013-2022, 2013-2062). I tre periodi “retrospettivi” serviranno per la validazione empirica mentre i tre periodi “prospettivi” permetteranno una valutazione diretta delle effettive differenze fra le mappe prodotte secondo i diversi approcci. Nella formulazione di queste carte di pericolosità, tutte le informazioni messe eventualmente a disposizione da UR operanti nell’ambito di S1 o da dati provenienti da altri gruppi di ricerca (data geodetici, dati sismici, ecc.) verranno utilizzati dalle diverse UR per la parametrizzazione dei relativi modelli di calcolo.

Un secondo prodotto di immediato utilizzo è quello prodotto nell’ambito del Task 1 del Sottoprogetto b relativo ad una raccolta di dati pregressi aggiornata ed omogenea relativamente ai dati macrosismici ed accelerometrici relativi a siti posti su suolo di riferimento.

Il terzo prodotto sarà una prima valutazione della qualità delle carte retrospettive proposte dalle diverse UR nel Task 1 del sottoprogetto a ottenuta a partire dal confronto con le osservazioni messe a disposizione nell’ambito del Task 2 del sottoprogetto b.

Un quarto prodotto (Task 4 del sottoprogetto a) sarà un documento di sintesi riguardo allo stato dell’arte riguardo alla pericolosità sismica relativa alla sismicità indotta da attività antropica e stoccaggio di fluidi nel sottosuolo.

Un quinto prodotto sarà una prima valutazione dei potenziali parametri geologici e geomorfologici potenzialmente utili per una prima specializzazione per stime di pericolosità relative a siti accelerometrici collocati su suoli soffici o comunque diversi dal suolo rigido di riferimento.

Risultati attesi negli anni successivi

Gli sviluppi relativi agli anni successivi del progetto riguarderanno essenzialmente gli studi pilota iniziati nel primo anno e relativi essenzialmente alla interazione fra strutture sismogeniche sia a partire da

modelli fenomenologici che da indicazioni di tipo deterministico. Altro tema oggetto di possibili sviluppi sarà l'impiego di possibili proiezioni di tipo geologico/geomorfologico su area vasta per la determinazione di mappe di pericolosità confrontabili con osservazioni accelerometriche relativi a siti soffici o comunque differenti dai siti di riferimento.

Viene rimandata ad anni successivi la formulazione di carte di pericolosità integrate ovvero basate sulla combinazione probabilistica (Bayesiana) di carte di pericolosità prodotte secondo schemi differenti. L'integrazione fra le diverse carte verrà effettuata tenendo conto del livello di verosimiglianza associato a ciascuna carta e dedotto dal confronto con gli osservabili nel primo anno del progetto.

Bibliografia

- Albarelo D., Brammerini F., D'Amico V., Lucantoni A., Naso G., 2002. Italian intensity hazard maps: a comparison between results from different methodologies. *Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata*, 43, 249-262
- Albarelo D., D'Amico V., 2008. Testing probabilistic seismic hazard estimates by comparison with observations: an example in Italy. *Geophys.J.Int.*, 175, 1088–1094, doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03928.x
- Akinci, A., C. Mueller, L. Malagnini, and A. Lombardi (2004). Seismic hazard estimate in the Alps and Apennines (Italy) using smoothed historical seismicity and regionalized predictive ground-motion relationships, *Boll. Geof. Teor. Appl.* 45, 285–304.
- Akinci; A., F. Galadini, D. Pantosti, M. Petersen, L. Malagnini and D. Perkins, Effect of time dependence on probabilistic seismic hazard maps and deaggregation for the central Apennines, Italy, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 99, 585-610, 2009.
- Bender, B., and D. Perkins (1987). SEISRISK III: A computer program for seismic hazard estimation, U.S. Geol. Surv. Bulletin 1772, 48 pp.
- Carulli, G.B.; Cucchi, F.; Rebez, A.; Peruzza, L.; Slejko, D.; Codermatz, R., 2002, Seismic hazard in the Friuli - Venezia Giulia region (NE Italy) considering different soil typologies , *Mem. Soc. Geol. It.*. 2002
- Console, R., M. Murru, G. Falcone, Perturbation of earthquake probability for interacting faults by static Coulomb stress changes, *J. of Seismology*, 14, 67-77, doi: 10.1007/s10950-008-9149-4, 2010.
- D'Agostino, N., S. Mantenuto, E. D'Anastasio, A. Avallone, G. Selvaggi, M. Barchi, C. Collettini, F. Radicioni, A. Stoppini, and F. Fastellini (2009), Contemporary crustal extension in the Umbria_Marche Apennines from regional CGPS networks and comparison between geodetic and seismic deformation, *Tectonophysics*, 476, 3–12, doi:10.1016/j.tecto.2008.09.033.
- Gomez Capera A.A., D'Amico V., Meletti C., Rovida A., Albarelo D., 2010. Seismic hazard assessment in terms of macroseismic intensity in Italy: a critical analysis from the comparison of different computational procedures. *Bull.Seism.Soc.Am.*, Vol. 100, No. 4, pp. 1614–1631, doi: 10.1785/0120090212
- Kagan Y.Y., Jackson D.D., 2012. Whole Earth high-resolution earthquake forecasts, , *Geophys. J. Int.* DOI: 10.1111/j.1365-246X.2012.05521.x
- Lind, N.C., 1996. Validation of probabilistic models, *Civ. Eng. Syst.*, 13, 175-183.
- Lombardi, A. M., W. Marzocchi, Double branching model to forecast the next $M \geq 5.0$ earthquakes in Italy, *Tectonophysics*, doi:10.1016/j.tecto.2009.06.014, 2009.
- Mantovani E., Viti M., Babbucci D., Cenni N., Tamburelli C. and Vannucchi A.; 2012: *Middle term prediction of earthquakes in Italy: some remarks on empirical and deterministic approaches*. *Boll. Geof. Teor. Appl.*, 53, 89-111, doi: 10.4430/bgta0037.

- Mucciarelli M., Albarello D., D'Amico V., 2008. Comparison of Probabilistic Seismic Hazard estimates in Italy. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 98, No. 6, pp. 2652–2664, doi: 10.1785/0120080077
- Pace B., L. Peruzza, G. Lavecchia, P. Boncio Layered seismogenic source model and probabilistic seismic-hazard analyses in Central Italy, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 96, 107-132, doi:10.1785/0120040231, 2006.
- Pace, B., L. Peruzza, F. Visini, LASSCI2009.2: layered earthquake rupture forecast model for central Italy, submitted to the CSEP project, *Annals of Geophysics*, 53, 85-97, 2010.
- Panza, G.; K. Irikura; M. Kouteva; A. Peresan, Z. Wang, R. Saragoni, Advanced Seismic Hazard Assessment, Part I: Seismic Hazard Assessment, *Pure and Applied Geophysics (PAGEOPH)*, 168, 1-9, doi: 10.1007/s00024-010-0179-9, 2011.
- Peresan, A, E. Zuccolo, F. Vaccari, A. Gorshkov; Panza, G.F., Neo-Deterministic Seismic Hazard and Pattern Recognition Techniques: Time-Dependent Scenarios for North-Eastern Italy, *Pure and Applied Geophysics (PAGEOPH)*, 168, 583-607, doi:10.1007/s00024-010-0166-1, 2011.
- Peresan, A; E. Zuccolo; F. Vaccari; G.F. Panza, Neo-deterministic seismic hazard scenarios for North-Eastern Italy , *Bollettino della Società Geologica Italiana*, 128, 229-238, 2009.
- Peruzza L., B. Pace, and F. Visini, Fault-Based Earthquake Rupture Forecast in Central Italy: Remarks after the L'Aquila Mw 6.3 Event , *Bull. of the Seism. Soc. of Am. (Short Note)*, , v. 101, p. 404-412, 2011.
- Piccinelli F.G., Mucciarelli M., Federici P. e Albarello D., 1995 - The microseismic network of the Ridracoli dam: data and interpretation. *PAGEOPH*, **145**, 1, 97-108
- Senior Seismic Hazard Analysis Committee – SSHAC, 1997. Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis: guidance on uncertainties and use of experts. Report NUREG-CR-6372, in 2 volumes, Washington D.C., U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Zoller G and Hainzl S (2010). Recurrence time distributions of large earthquakes in a stochastic model for coupled fault systems: the role of fault interaction. *BSSA*, 97, doi: 10.1785/0120060262.
- Zuccolo, E.; F. Vaccari; A. Peresan; G. Panza, Neo-Deterministic and Probabilistic Seismic Hazard Assessments: a Comparison over the Italian Territory, *Pure and Applied Geophysics (PAGEOPH)*, 168, 69-83, doi:10.1007/s00024-010-0151-8, 2011.