



**INGV-Istituto Nazionale di
Geofisica e Vulcanologia**

**DPC-Dipartimento della
Protezione Civile**



**Convenzione INGV-DPC 2004 – 2006 / Progetto S1
Proseguimento della assistenza al DPC per il completamento e la gestione della
mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 e progettazione di
ulteriori sviluppi**

Task 2 – Realizzazione di valutazioni di pericolosità sismica in termini di intensità macrosismica ed effettuazione di confronti fra MPS04 e tali valutazioni

Deliverable D12 Codice per il calcolo della pericolosità sismica da dati di sito: SASHA (Site Approach to Seismic Hazard Assessment)

V. D'Amico^(1*), D. Albarello⁽¹⁾

⁽¹⁾Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Siena
(*ora: Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Sezione di Milano-Pavia)

26 luglio 2007

Indice

Riassunto

Abstract

Introduzione

Esecuzione di SASHA

Fase 1: Scelte iniziali relative ai file di input/output

Fase 2: Costruzione della storia sismica di sito

Fase 3: Calcolo della pericolosità sismica

Appendice A - L'approccio "di sito": metodologia

Appendice B - Formato dei file di input/output

Bibliografia

Allegato - Eseguibile di SASHA ed esempio dei file di input/output

Riassunto

Viene presentato il codice di calcolo SASHA che implementa l'approccio probabilistico proposto da Albarello e Mucciarelli (2002) alla stima della pericolosità sismica in termini di intensità macrosismica. Elemento chiave della metodologia è la storia sismica locale, ovvero i risentimenti documentati al sito dei terremoti passati eventualmente integrati da risentimenti "virtuali" dedotti a partire da dati epicentrali. La procedura (approccio "di sito"), appositamente sviluppata per l'analisi di dati di intensità, consente di utilizzare in modo formalmente corretto la grande quantità di informazioni macrosismiche disponibili in paesi come l'Italia.

Oltre al presente testo, nel quale è descritto in dettaglio l'utilizzo del programma (metodologia, opzioni di calcolo, formato dei file di input/output), vengono allegati l'eseguibile di SASHA e un esempio dei file di input (catalogo epicentrale e dei risentimenti macrosismici, elenco di località) e output.

Abstract

We present the code SASHA which implements the probabilistic approach proposed by Albarello and Mucciarelli (2002) to the seismic hazard assessment in terms of macroseismic intensity. Key element of the methodology is the local seismic history, i.e. documented felt data available at the site for past earthquakes which can be integrated by "virtual" effects deduced from epicentral information. The procedure ("site" approach), purposely developed for handling intensity data, allows a full and formally correct exploitation of the huge amount of macroseismic information available in countries like Italy.

In addition to this text, where we describe the usage of the program (methodology, computational options, format of input/output files), the executable of SASHA along with examples of input (epicentral and felt data catalogues, list of localities) and output files are attached.

Introduzione

SASHA (Site Approach to Seismic Hazard Assessment) è il codice di calcolo che implementa l'approccio "di sito" (Albarelli e Mucciarelli, 2002) alla stima probabilistica della pericolosità sismica, in termini di intensità macrosismica, basata sull'impiego dei dati documentari disponibili al sito riguardo agli effetti dei terremoti passati (per la descrizione della metodologia si veda l'Appendice A).

La pericolosità sismica (per i dodici gradi di intensità della scala MCS) può essere calcolata, per una serie di località o per nodi di una griglia geografica, a partire dai soli effetti sismici osservati al sito durante i terremoti del passato (risentimenti macrosismici), da questi integrati con gli effetti attesi localmente a partire da dati epicentrali o soltanto da questi ultimi.

Esecuzione di SASHA

Facendo doppio click sul file "sasha", viene eseguito il codice di calcolo con le seguenti opzioni (in corsivo sono elencate le richieste relative alle modalità di analisi, tra virgolette le scelte possibili):

Fase 1: Scelte iniziali relative ai file di input/output

(per il formato dei file si veda l'Appendice B)

- *Option for Seismic Hazard Computation (1=at localities; 2=at nodes of a geographical grid):*

L'opzione consente di scegliere se il calcolo della pericolosità viene effettuato per una serie di località (es., capoluoghi comunali identificati tramite codice Istat e coordinate) o per nodi (identificati tramite coordinate) di una griglia geografica regolare o irregolare

- Se "1": *Input File of Localities:*
Se "2": *Input File of Grid Nodes:*

Inserire il nome del file che contiene l'elenco delle località (es., "localities.txt" allegato) o dei nodi della griglia (es., "grid_nodes.txt" allegato)

- *Output File of Estimated Hazard Values:*

Inserire il nome del file di uscita dove vengono scritti i risultati dei calcoli

Fase 2: Costruzione della storia sismica di sito

- *Option for Site Seismic History (1=attenuated; 2=felt; 3=felt+attenuated):*

L'opzione consente di scegliere se il calcolo della pericolosità viene effettuato a partire da:

“1”: i soli effetti sismici attesi al sito a partire da dati epicentrali (risentimenti attenuati)

“2”: i soli effetti sismici osservati al sito durante i terremoti del passato (risentimenti osservati)

“3”: i risentimenti osservati integrati con quelli attenuati

Se “1” o “3”:

La storia sismica del sito (in termini di probabilità di eccedenza $P_l(I_s)$, come descritto nella (1) in Appendice A) viene costruita dai risentimenti attenuati a partire dai terremoti riportati nel catalogo epicentrale (es., CPTI04: Gruppo di lavoro CPTI, 2004), verificatisi all'interno di un'area circolare centrata nel sito in esame (di raggio pari a un valore stabilito) e con un'intensità epicentrale maggiore o uguale a un valore di soglia stabilito.

Sono richieste le seguenti informazioni:

- *Input File of Epicentral Catalogue:*

Inserire il nome del file relativo al catalogo epicentrale (es., “cpti04_Ie.txt” o “cpti04_I0.txt” allegati)

- *Search Area Radius (km) around the Site for Earthquakes Selection:*

Inserire il raggio (es., “200” km) dell'area circolare centrata nel sito entro la quale vengono selezionati i terremoti da considerare nel calcolo

- *Epicentral Intensity Threshold (integer value) for Earthquakes Selection:*

Inserire la soglia minima di intensità epicentrale (“0” se nessuna soglia) per la selezione dei terremoti da considerare

- *Option for Computing the Attenuated Site History (int=internal function; ext=external file):*

L'opzione consente di scegliere come calcolare i risentimenti attenuati:

“int”: tramite una relazione di attenuazione valida per il territorio italiano (eq. (1-4) in Appendice A) e definita all'interno del codice di calcolo (in questo caso deve essere utilizzato il file “cpti04_Ie.txt”)

“ext”: i risentimenti attenuati vengono letti da un file esterno che riporta le probabilità di eccedenza $P_l(I_s)$, dal I al XII grado di intensità, per diversi valori di distanza e intensità epicentrale. In questo caso:

- *Input File of Attenuated Effects:*
Inserire il nome del file con i valori di $P_l(I_s)$ per bin di distanza e intensità epicentrale (es., “table_prob.txt” allegata, da utilizzare con il file “cpti04_I0.txt”, dove sono riportati i valori calcolati per il territorio italiano mediante la relazione di attenuazione in forma binomiale descritta in Albarello et al., 2007).

- *Option for Attenuation Law (gen=general; comb=local+general):*

L’opzione consente di scegliere se utilizzare un’unica legge di attenuazione valida per il territorio italiano oppure se integrarla con una legge locale:

“gen”: per tutti i terremoti viene utilizzata la relazione di attenuazione nazionale (eq. (4) in Appendice A o da file esterno)

“comb”: se al terremoto, nell’ultimo campo del file relativo al catalogo epicentrale, è associato il codice “0”, viene utilizzata la relazione nazionale;
se è associato il codice “1”, viene utilizzata una legge di attenuazione locale per la quale devono essere inseriti i seguenti parametri (a, b, c, d):

- *Parameters of the Local Attenuation Law in the form $I=a+b D+c \ln(D)+d I_e$:*
(I_e è l’intensità epicentrale e D la distanza ipocentrale)
- *Average Hypocentral Depth:*
- *Standard Deviation of the Local Attenuation Law:*

Se l’opzione relativa alla costruzione della storia di sito è:

“1”: Termina la Fase 2 e si passa alla Fase 3

“2”: Inizia la Fase 2

“3”: Prosegue la Fase 2

Se “2” o “3”:

La storia di sito viene costruita a partire dai soli risentimenti osservati (“2”) riportati nel database delle osservazioni macrosismiche (es., DBMI04: Stucchi et al., 2007) oppure integrando e cioè sostituendo ai risentimenti attenuati quelli realmente osservati (“3”).

In entrambi i casi, sono richieste le seguenti informazioni:

- *Input File of Felt Data Catalogue:*

Inserire il nome del file relativo al database delle osservazioni macrosismiche (es., “dbmi04.txt” allegato) associato al catalogo epicentrale

- *Search Area Radius (km) around the Site for Felt Data Selection:*

Inserire il raggio (es., "2" km) dell'area circolare centrata nel sito entro la quale vengono selezionati i risentimenti macrosismici da attribuire alla località

- *Option for Felt Data Selection (near=nearest data; imax=maximum intensity data):*

L'opzione consente di scegliere come attribuire al sito i risentimenti:

"near": per ciascun terremoto, viene considerato il risentimento più vicino al sito tra quelli all'interno dell'area di selezione

"imax": per ciascun terremoto, viene considerato il risentimento di massima intensità tra quelli all'interno dell'area di selezione

La definizione di un'area di ricerca centrata nel sito per la selezione dei risentimenti osservati consente di evitare di perdere eventuali risentimenti attribuiti al sito in esame ma con coordinate non esattamente corrispondenti a quelle riportate nel file di input delle località o dei nodi della griglia.

Se la pericolosità viene calcolata per una serie di località, il sito è identificato tramite un codice (es., Istat01) e, secondariamente, tramite le coordinate. In questo caso, per ogni terremoto, vengono selezionati soltanto i risentimenti osservati in località con lo stesso codice (es., nel caso del codice Istat, nello stesso territorio comunale) e, tra questi, quelli all'interno dell'area di selezione.

Se invece la pericolosità viene calcolata per nodi di una griglia geografica, il sito è identificato tramite le sole coordinate. In questo caso, per ogni terremoto, vengono selezionati i risentimenti osservati all'interno dell'area di selezione.

Se l'opzione relativa alla costruzione della storia di sito è "3":

- *Correction by Neighbouring Felt Data (yes; no):*

L'opzione consente di scegliere se integrare la storia di sito con eventuali risentimenti osservati in località vicine:

"yes": i risentimenti attenuati vengono "corretti" in base all'intensità attribuita, per lo stesso terremoto, alla località più vicina entro 20 km (eq. (5-8) in Appendice A)

"no": non si tiene conto dei risentimenti osservati in località vicine

Fase 3: Calcolo della pericolosità sismica

- *Starting and Ending Date of the Catalogue Considered:*

Inserire l'anno iniziale e finale del catalogo sismico di sito da analizzare per la stima di pericolosità (t_0 e t_f definiti in Appendice A). Questa scelta riguarda anche la

selezione dei terremoti dal catalogo epicentrale e dei risentimenti dal database delle osservazioni macrosismiche

- *Hazard Exposure Time (yr):*

Inserire il periodo di esposizione Δt (si veda l'Appendice A) per il quale viene calcolata la pericolosità (es., "50" anni)

- *Exceedance Probability (%) for I_{ref} and PGA_{ref} :*

Inserire la probabilità di eccedenza P_{exc} (es., "10" %) in base alla quale vengono calcolati i valori di I_{ref} e PGA_{ref} (rispettivamente "intensità e PGA di riferimento" nelle eq. (16-21) in Appendice A)

- *Statistical Completeness Computation (yes; no):*

L'opzione consente di scegliere come calcolare la pericolosità:

"yes": la pericolosità viene calcolata tenendo conto della completezza statistica della storia di sito, come descritto in Appendice A

"no": la pericolosità viene calcolata senza tenere conto della completezza statistica della storia di sito, ovvero assumendo che l'intero catalogo in esame sia completo

- *Option for PGA -Intensity Relation (gor; ls):*

L'opzione consente di scegliere quale relazione empirica utilizzare per calcolare il valore di "PGA di riferimento" (PGA_{ref}) a partire dalle stime di pericolosità in intensità (si veda Gómez Capera et al., 2007):

"gor": una relazione ottenuta per il territorio italiano mediante un'analisi di regressione ortogonale generalizzata (eq. (20) in Appendice A)

"ls": una relazione ottenuta per il territorio italiano mediante un'analisi di regressione standard ai minimi quadrati (eq. (21) in Appendice A)

Durante l'esecuzione del codice di calcolo vengono visualizzati i nomi delle località o i numeri dei nodi della griglia per i quali viene progressivamente calcolata la pericolosità. Al termine dell'esecuzione, viene indicato il numero complessivo di terremoti e/o di risentimenti macrosismici presi in esame nell'analisi e viene prodotto il file di output con le stime di pericolosità richieste.

Appendice A – L’approccio “di sito”: metodologia

L’approccio “di sito” alla stima della pericolosità sismica (Albarello e Mucciarelli, 2002) è basato sull’analisi della storia locale degli effetti prodotti dai terremoti passati. Nell’ambito di questa tecnica, appositamente sviluppata per l’analisi di informazioni macrosismiche, la storia sismica di sito viene ricostruita dai dati documentari tenendo conto dei differenti livelli di incertezza e completezza.

Il calcolo della pericolosità sismica (probabilità H che durante un futuro intervallo di tempo Δt il sito in esame venga colpito da almeno un terremoto con effetti locali di intensità maggiore o uguale a I_s) prevede tre fasi successive.

I. Costruzione della storia sismica di sito

La ricostruzione degli effetti locali prodotti dai terremoti del passato è caratterizzata da una significativa incertezza. Questa incertezza può essere espressa in termini di valori di probabilità di eccedenza $P_l(I_s)$, che rappresenta la probabilità che l’ l -mo evento sia stato risentito al sito con una intensità almeno pari a I_s (Magri et al., 1994).

Nel caso dei terremoti per i quali sono disponibili informazioni macrosismiche locali, i valori di $P_l(I_s)$ (dal I al XII grado MCS) vengono direttamente stimati a partire dai giudizi esperti degli storici quantificati in termini di valori di intensità risentita al sito I_{loc} . A questo proposito, i dati di intensità riportati nei cataloghi in uso in Italia sono corredati da una stima grossolana dell’incertezza associata. In particolare sono presenti due tipi di dato: il dato “certo” (una sola indicazione di intensità I_{loc}' , es. VI) e il dato “incerto” (due possibili valori contigui di intensità $I_{loc}' - I_{loc}''$, es. VI-VII). Il vettore di probabilità $P_l(I_s)$ associato a ciascun terremoto viene così definito:

$$\begin{array}{ll} \text{dato "certo":} & P_l(I_s)=1 \text{ per } I_s \leq I_{loc}' \text{ e } P_l(I_s)=0 \text{ per } I_s > I_{loc}' \\ \text{dato "incerto":} & P_l(I_s)=1 \text{ per } I_s \leq I_{loc}', P_l(I_s)=0.5 \text{ per } I_s = I_{loc}'' \text{ e } P_l(I_s)=0 \text{ per } I_s > I_{loc}'' \end{array}$$

(quest’ultima posizione equivale ad attribuire identica verosimiglianza alle ipotesi $I_{loc}=I_{loc}'$ e $I_{loc}=I_{loc}''$).

In assenza invece di documentazione diretta riguardo agli effetti sismici locali, questi possono essere stimati a partire dai dati epicentrali del terremoto, ovvero

$$P_l(I_s) = \sum_{I_e=1}^{12} p(I_e) S(I_s | I_e, D) \quad (1)$$

dove p indica la probabilità che l'intensità epicentrale sia uguale a I_e e S è la probabilità condizionale che gli effetti al sito siano di intensità almeno pari a I_s dato un terremoto caratterizzato da un'intensità all'epicentro I_e e verificatosi a una distanza ipocentrale D .

S rappresenta quindi una funzione di attenuazione in forma probabilistica (Albarelo e D'Amico, 2004; 2005)

$$S = \text{prob}[I \geq I_s | I_e, D] = 1 - P(I_s | I_e, D) \quad (2)$$

dove P è la funzione di distribuzione cumulativa di Gauss, caratterizzata da una media μ ($\mu = F(I_e, D)$), comunemente definita "relazione di attenuazione" e da una deviazione standard σ , corretta per tenere conto del carattere discreto di I_s (es., Albarelo et al., 2001a), ovvero

$$P(I_s | I_e, D) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{I_s - 0.5} e^{-\frac{[x - \mu(I_e, D)]^2}{2\sigma^2}} dx \quad (3)$$

In particolare, in questa versione del codice di calcolo viene utilizzata la seguente relazione di attenuazione definita sull'intero territorio italiano (Pasolini et al., 2007):

$$\mu(I_E, D) = I_E - 0.0086(D - h) - 1.037[\ln(D) - \ln(h)] \quad (4)$$

dove

I_E = valore di intensità atteso all'epicentro

$D = (R^2 + h^2)^{1/2}$ (R = distanza epicentrale in km)

$h = 3.91$ km

$\sigma = 0.690$ (se I_E è calcolata dal campo macrosismico)

$\sigma = 0.87$ (se I_E è calcolata dalla magnitudo M_{av})

$\sigma = 0.98$ (se I_E è calcolata dalla intensità epicentrale I_0)

(per i dettagli, si veda Albarelo et al., 2007).

Gli effetti sismici così stimati a partire dalle informazioni epicentrali possono essere "corretti" sulla base di eventuali valori di intensità osservati, per i medesimi terremoti, in località vicine al sito in esame.

Obiettivo della correzione è determinare la probabilità $q_l(I_s | I_v)$ che l'intensità al sito sia I_s posto che, per lo stesso l -mo evento, nella località più vicina (entro una data distanza) sia stata osservata un'intensità I_v .

A questo scopo si applica il teorema di Bayes nella forma

$$q_l(I_s|I_v) = q_l(I_s) \frac{q(I_v|I_s)}{\sum_{I=1}^{12} [q_l(I)q(I_v|I)]} \quad (5)$$

dove $q_l(I_s)$ è una distribuzione di probabilità che definisce la verosimiglianza dell'ipotesi che durante l' l -mo terremoto l'intensità al sito sia stata pari a I_s e si ottiene a partire dal vettore di probabilità $P_l(I_s)$ stimato nella (1) tramite la relazione di attenuazione, ovvero

$$q_l(I_s) = P_l(I_s) - P_l(I_s + 1) \quad (6)$$

mentre $q(I_v|I_s)$ rappresenta la probabilità che, per un'intensità al sito pari a I_s , l'intensità nella località più vicina (entro 20 km) sia I_v ed è stata calcolata nella seguente forma tabellare per singoli valori di $\Delta I = I_v - I_s$ (Albarello et al., 2007):

$\Delta I = I_v - I_s$	$q(\Delta I)$
<-5	0.00000
-5	0.00001
-4	0.00053
-3	0.00396
-2	0.02823
-1	0.17920
0	0.55575
1	0.19115
2	0.03493
3	0.00539
4	0.00082
5	0.00002
>5	0.00000

Tabella: valori di $q(I_v|I_s)$, espressi come probabilità che l'intensità al sito I_s differisca di una quantità pari a ΔI da quella osservata nella località più vicina I_v

Nel caso in cui I_v sia incerta tra due valori contigui di intensità I_v' e I_v'' , si avrà che

$$q_l(I_s|I_v) = 0.5q_l(I_s|I_v') + 0.5q_l(I_s|I_v'') \quad (7)$$

Ai fini del calcolo della pericolosità, occorre infine stimare il vettore di probabilità $P_l(I_s|I_v)$, analogo al vettore $P_l(I_s)$ definito sopra, che si determina come segue a partire dalla (7)

$$P_l(I_s|I_v) = \text{prob}(I \geq I_s|I_v) = \sum_{I=I_s}^{12} q_l(I|I_v) \quad (8)$$

II. Stima della completezza della storia sismica locale

Le informazioni disponibili al sito sulla sismicità del passato coprono un intervallo temporale molto più esteso di quello caratterizzato da un soddisfacente livello di attendibilità. In generale, più lungo è tale intervallo, più incerte e incomplete risultano le conoscenze relative agli effetti sismici passati ma, allo stesso tempo, migliore risulta la loro rappresentatività, ovvero l'arco di tempo coperto dal catalogo sismico disponibile è sufficientemente esteso per "catturare" le proprietà statistiche essenziali del processo sismogenico di un'area (es., tassi di sismicità medi). Ne consegue quindi che entrambi gli aspetti devono essere considerati per valutare la completezza della storia sismica di sito in un dato intervallo di tempo ΔT (probabilità $P(C)$ che questa sia rappresentativa della sismicità reale).

A questo scopo, la completezza del catalogo di sito è stimata mediante una metodologia statistica (Albarello et al., 2001b) basata sulle due seguenti assunzioni: *i*) il processo sismogenico è stazionario, ovvero può essere descritto in termini di proprietà statistiche indipendenti dal tempo; *ii*) la porzione più recente del catalogo risulta completa.

In generale, la stima della pericolosità sismica può essere condotta a partire da L possibili scelte dell'intervallo temporale ΔT_i , compreso tra t_f e t_i (rispettivamente, estremo più recente e un qualsiasi punto di inizio del catalogo in esame), coperto dalla storia sismica di sito. La probabilità $P_i(C)$ che il catalogo sia completo può quindi essere calcolata per ognuno degli L periodi ΔT_i ottenuti spostando progressivamente all'indietro t_i nell'intervallo $[t_0, t_f]$, dove t_0 corrisponde all'estremo più antico del catalogo analizzato.

Come detto sopra, la probabilità $P_i(C)$ associata a uno specifico intervallo ΔT_i considerato per l'analisi di completezza risulta

$$P_i(C) = P_i(R)P_i(C|R) \quad (9)$$

dove $P_i(R)$ indica il grado di fiducia nell'ipotesi R che il catalogo disponibile per ΔT_i sia statisticamente rappresentativo del processo sismogenico e $P_i(C|R)$ rappresenta la probabilità condizionale che, assumendo valida l'ipotesi R , il catalogo sia completo.

In particolare, $P_i(C|R)$ viene calcolata tramite un test binomiale, suddividendo l'intervallo ΔT_i in $2N$ sotto-intervalli non sovrapposti di durata δt ($2N = \Delta T_i / \delta t$) e confrontando i tassi di sismicità osservati in ognuno di tali intervalli nella prima parte del catalogo con quelli corrispondenti nella seconda parte (Albarello et al., 2001b).

Riguardo a $P_i(R)$, invece, in assenza di informazioni *a priori* riguardo alle proprietà statistiche a lungo termine del processo sismogenico, si assume che abbia un andamento linearmente crescente con l'estensione temporale della storia sismica di sito.

La (9) diventa quindi

$$P_i(C) = \frac{\Delta T_i}{\Delta T_{\max}} P_i(C|R) \quad (10)$$

con ΔT_{\max} che corrisponde al più esteso intervallo di tempo coperto dal catalogo disponibile.

Per soddisfare le condizioni di reciproca esclusività ed esaustività, la (10) viene infine riscritta come

$$P_i^*(C) = \frac{P_i(C)}{\sum_{i=1}^L P_i(C)} \quad (11)$$

dove la somma al denominatore è estesa alle L possibili scelte dell'anno iniziale t_i del catalogo in esame e $P_i^*(C)$ rappresenta la "funzione di completezza" di questo per l'intervallo ΔT_i .

III. Stima della pericolosità sismica

A partire dalla storia sismica locale, per ogni specifico intervallo di tempo Δt_j di durata pari a Δt ("tempo di esposizione"), è possibile stimare la probabilità Q_j che almeno uno dei terremoti considerati sia stato realmente risentito al sito con un'intensità maggiore o uguale a I_s . Se N_j è il numero complessivo di eventi verificatisi durante Δt_j , risulta

$$Q_j = Q(\Delta t, I_s | \Delta t_j) = 1 - \prod_{l=1}^{N_j} [1 - P_l(I_s)] \quad (12)$$

Assumendo che il catalogo disponibile al sito copra un intervallo di tempo ΔT_i , è possibile individuare un numero K_i di distinti intervalli temporali Δt_j (parzialmente sovrapposti) che coprono il periodo ΔT_i . In particolare

$$K_i = \frac{t_f - \Delta t - t_i + 2}{dt} \quad (13)$$

dove t_i e t_f corrispondono rispettivamente all'inizio e alla fine del catalogo in esame e dt è l'unità di tempo.

La pericolosità sismica H_i per l'intensità I_s e il tempo di esposizione Δt può essere calcolata nella forma

$$H_i = H(\Delta t, I_s | \Delta T_i) = \sum_{j=1}^{K_i} s(\Delta t_j) Q(\Delta t, I_s | \Delta t_j) \quad (14)$$

dove è esplicitata la dipendenza di H dalla scelta di uno degli L possibili sotto-cataloghi di durata ΔT_i .

Nella (14), $s(\Delta t_j)$ rappresenta la probabilità che durante un qualsiasi periodo futuro Δt si ripetano le medesime condizioni sismotettoniche (es., il livello del carico tettonico, la distribuzione delle asperità sulle faglie sismogeniche, ecc.) verificatesi in uno specifico intervallo del passato Δt_j . In assenza di sufficienti informazioni riguardo al processo sismogenico responsabile della sismicità locale, la distribuzione di probabilità $s(\Delta t_j)$ può essere assunta uniforme, ovvero $s(\Delta t_j)=1/K_i$.

La (14) viene infine generalizzata per tenere conto della completezza del catalogo sismico di sito ($P_i^*(C)$ definita nella (11) per ognuno degli L possibili sotto-cataloghi) e la pericolosità sismica incondizionale è calcolata come

$$H(\Delta t, I_s) = \sum_{i=1}^L P_i^*(C) H(\Delta t, I_s | \Delta T_i) \quad (15)$$

A partire dai valori di pericolosità H così stimati per ciascun grado di intensità I_s (dal I al XII della scala MCS), viene calcolata una "intensità di riferimento" (I_{ref}) definita come la minima intensità che soddisfi la relazione

$$\int_{I_{ref}+1}^{12} H(\Delta t, I_s) dI_s < P_{exc} \quad (16)$$

dove P_{exc} rappresenta un valore stabilito di probabilità di eccedenza (es., 10%).

Per il medesimo valore di P_{exc} , viene inoltre stimato un valore di "PGA di riferimento" (PGA_{ref}), che corrisponde al massimo valore di PGA (in g) caratterizzato da una probabilità P_r di essere raggiunto o superato nell'intervallo di esposizione Δt maggiore o uguale alla soglia di P_{exc} fissata. A questo scopo, P_r viene calcolata a partire dai valori di pericolosità H stimati dalla (15), per i dodici gradi di I_s , come segue

$$P_r(\log PGA) = \sum_{I_s=1}^{12} h(\Delta t, I_s) P_r(\log PGA | I_s) \quad (17)$$

dove

$$h(\Delta t, I_s) = H(\Delta t, I_s) - H(\Delta t, I_s + 1) \quad (18)$$

e

$$P_r(\log PGA | I_s) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{\log PGA}^{+\infty} e^{-\frac{[x-\mu(I_s)]^2}{2\sigma^2}} dx \quad (19)$$

con $\mu(I_s)$ stimata attraverso una relazione empirica $\log(PGA)$ -intensità caratterizzata da una deviazione standard pari a σ .

In particolare, in questa versione del codice di calcolo è possibile scegliere tra due relazioni di conversione da intensità a *PGA* (in m/s^2) definite per il territorio italiano (per i dettagli, si veda Gómez Capera et al., 2007):

$$\mu(I_s) = \log(PGA) = -1.84 + 0.28I_s \quad (20)$$

($\sigma=0.26$) ottenuta da un'analisi di regressione ortogonale generalizzata condotta su una base dati costruita combinando i dati di Margottini et alii (1992) e di Faccioli e Cauzzi (2006) e:

$$\mu(I_s) = \log(PGA) = -1.33 + 0.20I_s \quad (21)$$

($\sigma=0.29$) ottenuta da un'analisi di regressione standard ai minimi quadrati condotta sui dati di Faccioli e Cauzzi (2006).

Appendice B – Formato dei file di input/output

File di input:

1) Lista delle località o dei nodi di una griglia geografica

E' il file nel quale sono riportate le località o i nodi della griglia geografica per i quali viene eseguito il calcolo della pericolosità.

Nel primo caso (es., "localities.txt"), per ogni località, devono essere riportati i seguenti 4 campi, nell'ordine:

- codice identificativo della località (es., Istat01)
- denominazione della località
- latitudine
- longitudine

Attenzione:

Per questo file è richiesto un formato specificato usando la codifica Fortran seguente: 1x, i9, 1x, a35, 2x, f8.5, 2x, f8.5 (nx indica la presenza di n spazi vuoti tra due campi successivi, i9 corrisponde a un campo numerico intero di 9 cifre, a35 a un campo testo di 35 caratteri e f8.5 a un campo numerico reale di 8 cifre di cui 5 decimali).

Nel caso invece del file con i nodi della griglia (es., "grid_nodes.txt"), per ogni nodo, devono essere riportati i seguenti 2 campi, nell'ordine:

- latitudine
- longitudine

In questo caso non è richiesto alcun formato specifico, purché i 2 campi siano separati (da tabulazione, spazio o virgola) e non ci siano campi vuoti.

Le coordinate delle località o dei nodi, così come tutti i campi "latitudine" e "longitudine" negli altri file, sono in gradi sessagesimali-decimali.

2) Catalogo epicentrale

E' il file nel quale sono riportati i terremoti (es., "cpti04_Ie.txt" o "cpti04_I0.txt") da considerare per costruire la storia di sito tramite una relazione di attenuazione empirica.

Il file non è quindi richiesto se la storia sismica viene costruita dalle sole osservazioni macrosismiche al sito.

Dopo la prima riga di intestazione (nomi dei campi a scelta o riga vuota), per ogni terremoto, devono essere riportati i seguenti 11 campi, nell'ordine:

- codice identificativo del terremoto (es., Ncpti04)
- anno
- mese
- giorno
- latitudine dell'epicentro
- longitudine dell'epicentro
- magnitudo (es., 5.5)
- zona sorgente
- intensità epicentrale I_0 o intensità attesa all'epicentro I_E (es., 9.5)
- deviazione standard σ associata a I_E
- codice per la selezione della legge di attenuazione: "0" se legge nazionale (eq. (4) in Appendice A o da file esterno); "1" se legge locale (parametri definiti dall'utente)

Il campo "deviazione standard σ associata a I_E " è considerato per il calcolo solo per i terremoti per i quali viene impiegata la relazione di attenuazione nazionale (eq. (4) in Appendice A) e consente di assegnare il valore di deviazione standard da utilizzare nella (3). Nel caso invece di terremoti per i quali si utilizza una legge di attenuazione locale, il contenuto del campo è irrilevante.

I campi "mese", "giorno", "magnitudo" e "zona sorgente" sono riportati soltanto a scopo riepilogativo ma non vengono utilizzati per il calcolo.

Come nel caso precedente, non è richiesto alcun formato specifico, purché i diversi campi siano separati (da tabulazione, spazio o virgola) e non ci siano campi vuoti.

3) Database delle osservazioni macrosismiche

E' il file nel quale sono riportate le osservazioni macrosismiche (es., "dbmi04.txt") da considerare per costruire la storia di sito utilizzando i risentimenti osservati.

Il file non è quindi richiesto se la storia sismica viene costruita dai soli risentimenti attenuati dai dati epicentrali.

Dopo la prima riga di intestazione (nomi dei campi a scelta o riga vuota), per ogni risentimento, devono essere riportati i seguenti 9 campi, nell'ordine:

- codice identificativo del terremoto (es., Ncpti04)
- anno
- mese
- giorno
- codice identificativo del risentimento (es., Ndbmi04)
- codice identificativo della località (es., Istat01)
- latitudine della località
- longitudine della località
- intensità risentita al sito I_{loc} (es., 4.5)

I campi "mese", "giorno" e "codice identificativo del risentimento" sono riportati soltanto a scopo riepilogativo ma non vengono utilizzati per il calcolo.

Anche in questo caso, non è richiesto alcun formato specifico, purché i diversi campi siano separati (da tabulazione, spazio o virgola) e non ci siano campi vuoti.

Attenzione:

Nel campo "intensità risentita al sito I_{loc} " devono essere riportati soltanto valori numerici di intensità. Pertanto, eventuali risentimenti non numerici presenti nel database devono essere convertiti. Ad esempio, nel file "dbmi04.txt", sono state eseguite le seguenti conversioni:

$$D=6.1, F=3.6, NF=1.2, RS=1.1, NC=-1.9, NR=-0.8, EE=-0.6, SW=-0.5$$

(in tal modo il codice di calcolo considera $D=VI$, $F=III-IV$, NF e $RS=I$; i risentimenti NC , NR , EE e SW , essendo convertiti in numeri negativi, vengono invece scartati).

L'attribuzione dei risentimenti al sito viene effettuata confrontando i campi "codice identificativo della località" (es., Istat01), "latitudine e longitudine della località" nel database macrosismico con i campi corrispondenti nell'elenco delle località. Pertanto è necessaria la corrispondenza tra questi campi nei 2 file.

Se la storia di sito viene costruita sostituendo i risentimenti attenuati con quelli osservati, la correzione viene effettuata confrontando il campo "codice identificativo del terremoto" (es., Ncpti04) nel database macrosismico con il campo corrispondente dei risentimenti attenuati e derivante dal catalogo epicentrale. Quindi, anche in questo caso, è necessaria la corrispondenza tra questi campi nei 2 file.

4) Tabella di probabilità di eccedenza per bin di intensità e distanza epicentrale

E' il file nel quale sono riportate le probabilità di eccedenza $P_i(I_s)$ per diversi valori di intensità epicentrale I_0 e diversi bin di distanza epicentrale (es., "table_prob.txt").

Il file non è quindi richiesto se la storia di sito viene costruita dai risentimenti macrosismici osservati o da quelli attenuati mediante una legge di attenuazione interna al codice di calcolo.

Nel file devono essere riportati i seguenti 15 campi, nell'ordine:

- intensità epicentrale (numero intero)
- soglia minima ($>$) del bin di distanza epicentrale
- soglia massima (\leq) del bin di distanza epicentrale
- 12 campi con i valori di $P_i(I_s)$ per i singoli gradi di intensità I_s

Anche in questo caso, non è richiesto alcun formato specifico, purché i diversi campi siano separati (da tabulazione, spazio o virgola) e non ci siano campi vuoti.

File di output:

E' il file nel quale sono riportati i valori di pericolosità calcolati (es., "output" allegato).

Nelle prime 14 righe sono elencate tutte le scelte eseguite per la stima della pericolosità. Seguono, per ogni località o nodo della griglia, i seguenti campi:

- "*Loc_Code*": codice identificativo della località (es., Istat01)
- "*Node*": numero progressivo del nodo della griglia
- "*Loc_Name*": denominazione della località (campo assente se il calcolo è effettuato sui nodi della griglia)
- "*Loc_Lat*" o "*Node_Lat*": latitudine della località o del nodo
- "*Loc_Lon*" o "*Node_Lon*": longitudine della località o del nodo
- "*H_1, H_2, ..., H_12*": valori di pericolosità durante Δt dal I al XII grado MCS (eq. (15) in Appendice A)
- "*I_ref*": intensità di riferimento (eq. (16) in Appendice A)
- "*PGA_ref*": PGA (g) di riferimento (eq. (17-21) in Appendice A)
- "*N_felt*": numero di risentimenti (con $I_{loc}>0$) al sito nel database delle osservazioni macrosismiche durante il periodo in esame
- "*I_max*": massima intensità risentita al sito nel database delle osservazioni macrosismiche durante il periodo in esame

Gli ultimi 2 campi sono assenti se la pericolosità è calcolata a partire dalla storia di sito costruita dai soli risentimenti attenuati.

Bibliografia

- Albarello D., V. Bosi, F. Bramerini, A. Lucantoni, G. Naso, L. Peruzza, A. Rebez, F. Sabetta e D. Slejko, 2001a. Carte di pericolosità sismica del territorio Nazionale. *Quaderni di Geofisica*, 12, 1-7.
- Albarello D., R. Camassi e A. Rebez, 2001b. Detection of space and time heterogeneity in the completeness of a seismic catalog by a statistical approach: an application to the Italian area, *Bull. Seism. Soc. Am.* 91, 1694-1703.
- Albarello D. e V. D'Amico, 2004. Attenuation relationship of macroseismic intensity in Italy for probabilistic seismic hazard assessment, *Boll. Geofis. Teor. ed Appl.* 45, 271-284.
- Albarello D. e V. D'Amico, 2005. Validation of intensity attenuation relationships, *Bull. Seism. Soc. Am.* 95, 719-724.
- Albarello 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>
- Albarello D. e M. Mucciarelli, 2002. Seismic hazard estimates using ill-defined macroseismic data at site, *Pure Appl. Geophys.* 159, 1289-1304.
- Faccioli E. e C. Cauzzi, 2006. Macroseismic intensities for seismic scenarios estimated from instrumentally based correlations, *Proc. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, paper number 569.
- Gómez Capera A.A., D. Albarello e P. Gasperini, 2007. Aggiornamento relazioni fra l'intensità macrosismica e PGA. Progetto DPC-INGV S1, <http://esse1.mi.ingv.it/d11.html>
- Gruppo di lavoro CPTI, 2004. Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2004 (CPTI04). INGV, Bologna. <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI04>
- Magri L., M. Mucciarelli e D. Albarello, 1994. Estimates of site seismicity rates using ill-defined macroseismic data, *Pure Appl. Geophys.* 143, 617-632.
- Margottini C., D. Molin e L. Serva, 1992. Intensity versus ground motion: A new approach using Italian data, *Engineering Geology*, 33, 1, 45-58.
- Pasolini C., D. Albarello, P. Gasperini, V. D'Amico e B. Lolli, 2007. The attenuation of seismic intensity in Italy part II: modeling and validation. *Bull. Seism. Soc. Am.*, sottomesso.
- Stucchi M., R. Camassi, A. Rovida, M. Locati, E. Ercolani, C. Meletti, P. Migliavacca, F. Bernardini, R. Azzaro, 2007. DBMI04, il database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI04. <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI04/>. *Quaderni di Geofisica*, INGV, 49, 1-38.

Allegato – Eseguibile di SASHA ed esempio dei file di input/output

Nel file compresso disponibile insieme a questo testo sono contenuti l'eseguibile di SASHA e i seguenti files:

- "localities.txt" o "grid_nodes.txt": elenco di località o di nodi di una griglia geografica per i quali viene stimata la pericolosità sismica
- "cpti04_Ie.txt" o "cpti04_I0.txt": catalogo epicentrale (da CPTI04: Gruppo di lavoro CPTI, 2004) rispettivamente con i valori di intensità attesa all'epicentro I_E o di intensità epicentrale I_0
- "dbmi04.txt": database delle osservazioni macrosismiche (da DBMI04: Stucchi et al., 2007)
- "table_prob.txt": probabilità di eccedenza $P_l(I_s)$ per bin di distanza e intensità epicentrale calcolate per il territorio italiano mediante la relazione di attenuazione in forma binomiale descritta in Albarello et alii (2007)
- "output": esempio del file di output con i valori di pericolosità calcolati