



Università degli Studi di Siena
Dipartimento di Scienze della Terra



Presidenza del Consiglio dei Ministri
Servizio Sismico Nazionale

Relazione Tecnico Scientifica
relativa alla convenzione sul tema

**Sviluppo di metodologie innovative
per il calcolo della pericolosità sismica
del territorio nazionale**

Relazione conclusiva
Dario Albarello e Vera D'Amico

Commissione di valutazione SSN

Antonio Lucontoni (presidente)
Fabrizio Bramerini
Giuseppe Naso

Roma, settembre 2001.



Riassunto

Vengono presentati e discussi i risultati relativi alle indagini condotte nell'ambito della convenzione fra il Servizio Sismico Nazionale e il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Siena. Scopo delle attività previste dalla convenzione era l'applicazione di metodologie innovative per la stima della pericolosità sismica nel territorio italiano e la valutazione comparata dei risultati forniti dalle diverse metodologie in rapporto alla sismicità osservata.

Nella prima parte del lavoro, a partire dall'applicazione di una nuova metodologia di calcolo, sono stati ottenuti i valori di pericolosità sismica relativi alle località capoluogo comunale del territorio italiano. Le principali differenze fra questa metodologia e quelle finora utilizzate nell'area italiana risiedono in un diverso utilizzo delle informazioni macrosismiche relative agli effetti di terremoti del passato nella località di volta in volta analizzata e in una gestione più accurata delle diverse incertezze implicate nella valutazione della pericolosità sismica. I risultati ottenuti seguendo questo nuovo approccio sono stati confrontati con analoghe stime di pericolosità ottenute attraverso una metodologia "standard". In particolare, per questa analisi sono stati presi in considerazione i risultati relativi a due regioni campione: il Molise e la Calabria. Da questa comparazione emergono differenze significative sia in termini di intensità attese che di probabilità di eccedenza relative ai diversi gradi di intensità macrosismica. In particolare, le stime ottenute mediante il nuovo approccio risultano generalmente più elevate di quelle precedentemente ottenute seguendo l'approccio "standard" e sono caratterizzate da un maggiore livello di eterogeneità spaziale.

Allo scopo di valutare il diverso livello di affidabilità delle stime di pericolosità fornite dai diversi approcci, è stata sviluppata, nella seconda parte, una specifica procedura di analisi. In particolare, è stato sviluppato un protocollo di tipo statistico volto alla valutazione delle diverse stime di pericolosità a partire dai dati di sismicità documentati durante un periodo di controllo. Lo scopo del protocollo è duplice. Innanzitutto è finalizzato alla selezione di quelle procedure per la stima della pericolosità che forniscono risultati compatibili con le osservazioni all'interno di un definito intervallo di confidenza ("procedure affidabili"). Ha poi lo scopo di attribuire a ciascuna procedura "affidabile" un valore di verosimiglianza da utilizzare per una stima combinata della pericolosità basata sui contributi delle diverse metodologie di calcolo. Questo protocollo è stato applicato allo studio della pericolosità delle località capoluogo nelle due regioni del Molise e della Calabria. I risultati ottenuti mostrano che per un tempo di esposizione di 20 anni, tutte le procedure analizzate forniscono stime di pericolosità incompatibili (ad un livello di confidenza del 95%) con la sismicità osservata nel periodo 1981-2000. Le stesse valutazioni effettuate su un periodo più lungo (50 anni) ed applicate in modo retrospettivo (utilizzando cioè i dati relativi all'intervallo 1931-1980 e 1871-1920) forniscono indicazioni analoghe. Considerando questi risultati, nessuna delle valutazioni di pericolosità ottenute è stata giudicata "affidabile" e pertanto non è stata tentata nessuna stima di pericolosità combinando le diverse metodologie.



Indice

PARTE PRIMA – Stima della pericolosità sismica del territorio italiano mediante l’approccio “di sito”

1	LA PERICOLOSITÀ SISMICA	5
1.1	Premessa	5
1.2	Informazioni per la stima della pericolosità	5
1.3	Il calcolo della pericolosità secondo l’approccio “standard”	6
1.4	Principali limitazioni dell’approccio “standard”	7
2	METODOLOGIA	8
2.1	Principali caratteristiche dell’approccio “di sito”	8
2.2	Procedura di calcolo	8
2.2.1	Passo 1: ricostruzione della storia sismica locale	8
2.2.2	Passo 2: stima della pericolosità sismica	9
2.2.3	Passo 3: effetto della completezza	10
2.3	Vantaggi della procedura “di sito” rispetto all’approccio “standard”	11
2.4	Limiti principali dell’approccio “di sito”	11

PARTE SECONDA – Validazione delle stime di pericolosità sismica

3	APPLICAZIONE	13
3.1	Stime di pericolosità sismica relative a due regioni campione	13
3.1.1	La pericolosità sismica del Molise	15
3.1.2	La pericolosità sismica della Calabria	21
3.2	Stime di pericolosità sismica per le località capoluogo comunale del territorio italiano	29
4	IL PROBLEMA DELLA VALIDAZIONE	31
5	METODOLOGIA	32
5.1	Impostazione del problema	32
5.2	Individuazione delle procedure “attendibili”	32
5.3	Definizione del livello di verosimiglianza delle procedure considerate “attendibili”	34
5.4	Principali limiti di applicabilità	35
6	APPLICAZIONE	36
6.1	Procedure per il calcolo della pericolosità sismica	36
6.2	Dati di riferimento per la validazione	36
6.3	Selezione delle procedure “attendibili”	37

DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

BIBLIOGRAFIA

APPENDICI

- A. Parametri utilizzati per la relazione di attenuazione probabilistica
- B. Calcolo della funzione di completezza
- C. Effetto dell’incertezza nell’attribuzione del grado di intensità sul tasso di sismicità
- D. Risultati delle analisi di pericolosità relative alle due regioni campione (Molise e Calabria)
- E. Risultati delle analisi di pericolosità relative alle località capoluogo comunale italiane
- F. Risultati delle analisi di validazione delle stime di pericolosità sismica relativamente ai capoluoghi comunali del Molise e della Calabria



Università degli Studi di Siena
Dipartimento di Scienze della Terra

Presidenza del Consiglio dei Ministri
Servizio Sismico Nazionale

SERVIZIO
SISMICO
NAZIONALE



PARTE PRIMA

Stima della pericolosità sismica del territorio italiano mediante l'approccio "di sito"



1. La pericolosità sismica

1.1 Premessa

La pericolosità sismica H può essere definita come il livello di confidenza associato ad una proposizione del tipo: “In un futuro intervallo di tempo Δt la località S verrà interessata da almeno un evento sismico caratterizzato da un livello di scuotimento al sito $\geq I_s$ ”. Questo livello di confidenza è generalmente codificato in termini di valori di probabilità. Più in generale, esisterà un vettore di probabilità $H(I)$ (o “curva di probabilità” nel caso in cui il parametro I sia di tipo continuo) i cui elementi rappresentano i valori di probabilità associati ai diversi gradi di scuotimento atteso nell’intervallo di esposizione Δt .

Di fatto, la pericolosità sismica esprime uno stato di incertezza sulla sismicità futura, incertezza dovuta alle incomplete conoscenze disponibili sul processo sismogenico presumibilmente responsabile dello scuotimento atteso. Questa caratteristica essenziale viene spesso oscurata dalle rappresentazioni di pericolosità ad uso ingegneristico quale, per esempio, quella relativa allo scuotimento atteso definito come il massimo valore di scuotimento caratterizzato da una probabilità di superamento non inferiore al 10%. In genere, questo tipo di rappresentazione tende a nascondere il carattere essenzialmente probabilistico della pericolosità suggerendo interpretazioni di tipo “fisico” della stessa.

In realtà, risulta metodologicamente essenziale avere chiaro il significato “epistemico” della pericolosità, ovvero il suo ruolo nel rappresentare non tanto il livello di scuotimento atteso quanto il diverso livello di confidenza associato alle diverse possibili ipotesi riguardo a quest’ultimo. E’ poi sulla base di questi giudizi che viene formulata la scelta “politica” circa il livello di protezione richiesto per i beni esposti al danno sismico.

Questo diverso livello di confidenza dipende dalla qualità e affidabilità delle conoscenze a nostra disposizione per la valutazione dello scuotimento atteso. Pertanto, la pericolosità deve risultare dalla combinazione delle informazioni effettivamente disponibili corredate da una caratterizzazione credibile del livello di incertezza ad esse associato.

Va infine sottolineato come, in questo contesto, non abbia senso parlare di un livello di incertezza associato alla stima di pericolosità (o addirittura di un intervallo di confidenza associato al valore di pericolosità), in quanto essa stessa è una rappresentazione di un livello di confidenza o di incertezza. Paradossalmente, sarebbe come dichiarare di essere incerti sulla propria incertezza riguardo ad una data proposizione. Ha invece senso parlare di valutazioni di pericolosità rappresentative o meno dell’effettivo livello di fiducia associato alle informazioni utilizzate per la stima.

1.2 Informazioni per la stima della pericolosità

In generale, la stima della pericolosità sismica richiede:

- la caratterizzazione delle sorgenti sismogeniche potenzialmente pericolose sia in termini di localizzazione spaziale che di dinamica temporale;
- la definizione delle modalità di trasmissione dell’energia dalla sorgente al sito di interesse;
- l’individuazione di possibili effetti locali capaci di modificare il livello di scuotimento atteso.

In presenza di una perfetta conoscenza di questi fattori, sarebbe in principio possibile una “previsione” dello scuotimento atteso I_s , nel senso di una definizione della curva di pericolosità “a gradino” con valori $H(I)=0$ per $I>I_s$ e $H(I)=1$ per $I\leq I_s$. In realtà, risulta largamente accettata l’incompletezza relativa alle informazioni effettivamente disponibili, che si riflette in valutazioni di curve di pericolosità di tipo più o meno “smussato”. Questa insufficiente base informativa rende inoltre necessario il ricorso a informazioni di tipo “indiretto” sul processo sismogenico, quali, per esempio, quelle relative alla storia sismica passata. Questo passaggio pone una serie di problemi metodologici legati principalmente alla difficoltà di combinare informazioni di tipo geologico/fisico (localizzazione delle faglie sismogeniche, meccanismi di sorgente, modalità di attenuazione dell’energia elastica, ecc.) con informazioni dedotte su base documentaria (dati macrosismici) riguardanti gli effetti di terremoti spesso molto distanti nel tempo.

Questo problema viene solitamente risolto “forzando” il dato macrosismico (essenzialmente ordinale e discreto) all’interno di una procedura formulata a partire da grandezze di tipo strumentale (magnitudo, ecc.) formalmente assai diverse (solitamente isomorfe al campo dei numeri razionali). Il primo effetto di questa “forzatura”, che solitamente viene effettuata mediante regole di conversione di tipo empirico



(relazioni intensità - magnitudo, ecc.), è l'introduzione di un fattore di incertezza difficilmente controllabile all'interno della procedura di volta in volta utilizzata per il calcolo della pericolosità. Gli effetti di questa "ibridazione" saranno tanto più importanti ai fini della valutazione finale di pericolosità quanto maggiore è il ruolo delle informazioni macrosismiche rispetto alle altre fonti di informazione. Questo ruolo risulta tanto maggiore quanto minore è il tasso di sismicità regionale nell'area di interesse e quanto più estesa nel tempo è la base documentaria disponibile riguardo agli effetti di terremoti passati. Il secondo effetto è quello di trascurare le incertezze che caratterizzano il dato macrosismico dedotto a partire dalla documentazione disponibile. Spesso, infatti, le informazioni a disposizione sono insufficienti per una univoca assegnazione del livello di scuotimento permettendo solo la definizione di un intervallo di valori plausibili (è per esempio il caso degli eventi classificati come "con danni" o "senza danni"). In questi casi, la pratica corrente "forza" il dato all'interno di un valore unico di intensità (genericamente scelto secondo criteri conservativi) rimuovendo l'informazione riguardante il relativo grado di incertezza. D'altro canto le informazioni relative alla storia sismica passata vengono solitamente sotto utilizzate per stime di pericolosità. Nella maggior parte dei codici di calcolo (p.es., SEISRISK III), il dato macrosismico viene utilizzato solo per la ricostruzione dell'epicentro del singolo terremoto e per stimare, per via indiretta, l'energia radiata (magnitudo macrosismica). Queste valutazioni contribuiscono poi all'identificazione delle sorgenti sismogeniche e a caratterizzarne in qualche modo la dinamica temporale. In realtà, il dato macrosismico è un dato "di sito", nel senso che è rappresentativo degli effetti osservati localmente in corrispondenza di un determinato evento del passato. In quanto tale, il dato macrosismico veicola (in modo quanto si vuole indiretto e impreciso) informazioni non solo sulla sorgente dell'evento ma soprattutto sul risultato finale degli effetti di propagazione e di sito potenzialmente responsabili del danno atteso in futuro. Risulterebbe quindi di indubbio interesse un più completo utilizzo di questo genere di informazione.

1.3 Il calcolo della pericolosità secondo l'approccio "standard"

Per la definizione stessa di pericolosità ricordata sopra, la stima finale risulta tanto più rappresentativa quanto più essa è una corretta (e condivisibile) parametrizzazione dell'insieme delle conoscenze disponibili e, soprattutto, delle relative incertezze. Sembra utile analizzare preliminarmente fino a che punto questa condizione viene soddisfatta dalla procedura di calcolo "standard" (Cornell, 1968; Bender e Perkins, 1987) utilizzata nella maggior parte dei Paesi (McGuire, 1993) e in particolare in Italia (Slejko et al., 1998).

La procedura, implementata nel codice di calcolo SEISRISK III, richiede:

- L'identificazione di aree sismogeniche omogenee (nel senso che la probabilità che un terremoto venga generato in qualsiasi elemento di ciascuna area è uniforme) e meccanicamente indipendenti le une dalle altre;
- La caratterizzazione della dinamica temporale di ciascuna sorgente in termini di un processo stocastico di natura poissoniana i cui parametri possono essere ricavati mediante una analisi statistica della distribuzione temporale delle scosse sismiche generate all'interno di ciascuna zona sismogenica a partire da un catalogo sismico assunto "completo" (ovvero rappresentativo della sismicità effettiva);
- La definizione delle modalità di attenuazione dell'energia sismica (espressa in termini di PGA o intensità macrosismica) attraverso opportune leggi di attenuazione empiriche più o meno variabili sul territorio analizzato.

Il carattere probabilistico del risultato finale ottenuto mediante questa procedura dipende essenzialmente dal carattere stocastico associato alla dinamica del processo sismogenico e, in talune versioni applicative, da un margine di incertezza associato alla esatta collocazione dei bordi delle zone sismogeniche. Tutte le altre parametrizzazioni richieste (zonazione sismotettonica, legge di scala per la distribuzione in magnitudo dei terremoti, intervallo di completezza, leggi di attenuazione) hanno un carattere deterministico che si presume non influenzi il livello di confidenza nelle diverse ipotesi riguardanti lo scuotimento atteso. E' risultato evidente ai più che quest'ultima posizione appare del tutto insoddisfacente visto il livello relativamente basso delle informazioni disponibili e comunque tale da non permettere una fiducia "deterministica" (probabilità 1) nelle informazioni utilizzate. Il risultato di questa constatazione è la diffusa "sfiducia" nella effettiva rappresentatività delle stime di pericolosità effettuate con la procedura "standard" e nella conseguente attribuzione (che appare paradossale alla luce di quanto detto nei paragrafi



precedenti) di un certo livello di “confidenza” più o meno elevato alle stime di pericolosità così ottenute. Infatti, analisi di stabilità delle stime di pericolosità dedotte mediante l’approccio “standard” (p.es. Musson, 2000; Romeo e Pugliese, 2000) hanno messo in evidenza la significativa sensibilità delle stime finali ad alcuni elementi conoscitivi (in particolare le leggi di attenuazione dello scuotimento) implementati in forma “deterministica” nella procedura di calcolo nonostante il loro carattere sostanzialmente empirico.

1.4 Principali limitazioni dell’approccio “standard”

Da quanto esposto in precedenza risultano chiare le principali limitazioni dell’approccio “standard” almeno nelle sue applicazioni tipiche.

La prima limitazione riguarda la sostanziale sottovalutazione o rimozione delle diverse incertezze implicate dalla base informativa utilizzata. In particolare, non vengono prese in considerazione le incertezze riguardanti i dati (intensità degli eventi sismici, distribuzione e geometria delle sorgenti sismogeniche, completezza del catalogo sismico) e le ipotesi di base (indipendenza delle sorgenti, carattere poissoniano della dinamica temporale delle varie sorgenti, leggi di attenuazione dello scuotimento). Dato che la stima finale di pericolosità risulta tanto più condivisibile quanto più essa è rappresentativa della qualità della base informativa utilizzata, questa limitazione risulta particolarmente grave.

La seconda limitazione consiste in un impiego inefficiente delle informazioni disponibili sugli effetti prodotti dai terremoti del passato. Ciò riguarda in particolare il sotto utilizzo dei dati macrosismici di sito. Questa caratteristica produce l’effetto paradossale di stime di pericolosità (che come si ricorda sono per definizione “al sito”) ottenute a partire da soli dati epicentrali (“ridotti” al sito mediante relazioni di attenuazione) e che ignorano del tutto quanto pure è noto sugli effetti di quegli stessi terremoti al sito in esame. Inoltre, la necessità di impiegare la sola parte ritenuta “completa” del catalogo fa sì che molte informazioni macrosismiche vengano di fatto ignorate in quanto relative a periodi storici ritenuti “incompleti”.

La terza limitazione riguarda il carattere sostanzialmente “strumentale” dei dati necessari per la stima di pericolosità (epicentri, magnitudo, accelerazione attesa, etc.). Questo implica la necessità di “ridurre” in forma “strumentale” informazioni irriducibilmente non strumentali (scenari di danno, ecc.). Questa forzatura ha il doppio effetto di “nascondere” le incertezze intrinsecamente legate a grandezze di tipo non strumentale e di introdurre nuovi e diversi elementi di incertezza indotti dall’utilizzo di regole di conversione calibrate empiricamente. Tali problemi risultano tanto più importanti per l’area italiana dove la base informativa disponibile relativa alla sismicità maggiore ha un carattere eminentemente non strumentale (macrosismico).

La possibilità di superare queste limitazioni passa attraverso un sostanziale ripensamento dell’intera metodologia utilizzata. Un tentativo in questa direzione viene delineato nel seguito di questa relazione.

2. Metodologia

2.1 Principali caratteristiche dell'approccio "di sito"

Nel tentativo di porre rimedio alle limitazioni dell'approccio "standard" delineate sopra, viene qui sperimentato un differente approccio di carattere fortemente fenomenologico sviluppato all'interno di una lettura "epistemica" della teoria della probabilità (p.es., Jeffreys, 1961; De Finetti, 1970; Scozzafava, 1997) ed eminentemente pensato per la stima della pericolosità sismica a partire da informazioni di tipo macrosismico.

Le principali caratteristiche di questa procedura possono essere sintetizzate come segue:

- La base informativa principale utilizzata per il calcolo della pericolosità è la storia sismica di sito, ovvero l'insieme degli effetti al sito di terremoti del passato espressi in termini di intensità macrosismica (da qui il nome di approccio "di sito"). In questo contesto, l'identificazione e la caratterizzazione delle sorgenti sismogeniche responsabili degli effetti osservati risulta irrilevante ai fini del calcolo di pericolosità;
- La descrizione della storia sismica è effettuata stimando per ciascun terremoto (ne sia nota o meno la sorgente) l'insieme dei possibili valori di intensità capaci di descrivere gli effetti documentati; ciascun possibile valore è corredato da un giudizio di verosimiglianza dedotto sulla base della documentazione disponibile. In questo modo è possibile tenere conto dell'incertezza associata al dato di base rispettando il carattere ordinale e discreto della grandezza utilizzata;
- In assenza di effetti documentati in corrispondenza di terremoti noti, risulta possibile associare a ciascun possibile valore dello scuotimento una probabilità condizionata funzione della distanza dal sito di massimo risentimento e dell'intensità di quest'ultimo. In questo modo, l'impiego di una "legge di attenuazione" di tipo "deterministico" (una distanza e una intensità epicentrale permettono la stima di un valore di risentimento) viene sostituito da una distribuzione di probabilità che esplicita il livello di incertezza implicato in questo genere di stima;
- La sequenza dei terremoti nel tempo al sito di interesse è considerata come un generico processo stocastico (non necessariamente poissoniano) le cui caratteristiche vengono definite a partire da un approccio completamente non-parametrico. In particolare, non risulta necessaria la preventiva rimozione delle scosse secondarie;
- Tutta l'informazione disponibile sulla storia sismica passata influenza la stima finale di pericolosità anche se con un diverso peso che dipende dal livello di "completezza" delle varie parti del catalogo;
- Il risultato finale della stima di pericolosità è espresso mediante un valore di scuotimento connotato in termini di intensità macrosismica.

La formalizzazione di queste caratteristiche all'interno di una procedura di calcolo viene illustrata nel paragrafo che segue.

2.2 Procedura di calcolo

La pericolosità sismica viene calcolata per ciascuna località separatamente seguendo una procedura costituita da tre passi principali. Nel primo, viene ricostruita la storia sismica al sito di interesse a partire dalle informazioni macrosismiche disponibili o, in mancanza di una documentazione diretta, da dati epicentrali. Il secondo passo prevede la valutazione della pericolosità sismica al sito sulla base di un approccio probabilistico "robusto" applicato alla storia sismica locale. Il terzo passo consiste nella valutazione degli effetti che il diverso livello di completezza della storia sismica disponibile produce sulla stima di pericolosità.

2.2.1 Passo 1: ricostruzione della storia sismica locale

La storia sismica locale è rappresentata da N eventi, ciascuno caratterizzato da una distribuzione di probabilità $P(I_s)$ definita per tutti i possibili valori I_s della scala macrosismica adottata (Magri et al., 1994). Queste probabilità sono assegnate sulla base della documentazione disponibile e ciascun valore rappresenta il grado di verosimiglianza associato all'ipotesi che gli effetti prodotti al sito dal terremoto considerato sono almeno pari al grado I_s .

Tuttavia, specie per i terremoti più antichi, informazioni dirette sugli effetti macrosismici sono disponibili solo per le località più colpite o per quelle più importanti dal punto di vista demografico, culturale, economico ecc. In questi casi, la probabilità che una data intensità sia stata risentita al sito di interesse a seguito del terremoto può essere valutata a partire dal dato epicentrale mediante relazioni di tipo empirico. In particolare, seguendo Magri et al. (1994), è possibile calcolare una probabilità $P(I_s)$ utilizzando la relazione:

$$P(I_s) = \sum_{I_e=I_{\min}}^{I_{\max}} p(I_e)R(I_s|D, I_e) \quad [1]$$

dove p è la probabilità che la massima intensità osservata in corrispondenza del terremoto sia uguale a I_e . I_{\min} e I_{\max} rappresentano rispettivamente il limite inferiore e superiore della scala macrosismica adottata. $R(I_s|D, I_e)$ è la probabilità condizionale che gli effetti al sito siano almeno pari a I_s , posto che l'intensità epicentrale sia I_e ed il sito disti D (km) dall'epicentro. Come suggerito da Magri et al. (1994), la distribuzione di probabilità R può essere rappresentata in forma logistica come

$$R(I_s|D, I_e) = \frac{e^{a+b \ln D}}{1 + e^{a+b \ln D}} \quad [2]$$

I parametri a e b sono coefficienti empirici che dipendono da I_e e I_s e devono essere determinati a partire dai dati di intensità disponibili mediante una opportuna analisi di regressione (p.es., Cox, 1970). Questa parametrizzazione è stata effettuata per l'intero territorio nazionale sulla base delle informazioni macrosismiche disponibili (D'Amico, 1999; D'Amico e Albarello, 2001). A questo scopo, sono stati presi in considerazione i dati epicentrali relativi a oltre 2400 eventi avvenuti in Italia dal 1000 al 1980 (Camassi e Stucchi, 1996) ed oltre 36000 valori di intensità per gli stessi terremoti relativi a oltre 11000 località italiane (Monachesi e Stucchi, 1997). Sono stati esaminati solo terremoti caratterizzati da intensità massima maggiore del V grado MCS. I valori risultanti dall'analisi di regressione sono riportati in Appendice A.

La funzione di probabilità $P_n(I_s)$, definita per ciascun n -mo terremoto, può essere utilizzata per il calcolo di alcune statistiche utili per valutazioni di pericolosità (p.es., Mucciarelli et al., 1992; Magri et al., 1994). In particolare, per ciascun intervallo temporale Δt_j del passato (della stessa lunghezza del tempo di esposizione) può essere calcolata la probabilità Q_j che almeno un terremoto abbia prodotto al sito effetti almeno di grado I_s . Essendo N_j il numero totale di eventi di cui si ha notizia in catalogo per l'intervallo Δt_j , si vede che

$$Q_j = Q(I_s|\Delta t_j) = 1 - \prod_{n=1}^{N_j} [1 - P_n(I_s)] \quad [3]$$

2.2.2 Passo 2: stima della pericolosità sismica

La pericolosità sismica dipende da una quantità di fattori poco conosciuti (p.es., il livello del carico tettonico, la distribuzione delle asperità sulle faglie sismogeniche, ecc.). Durante l'intervallo temporale Δt_j una specifica configurazione di questi fattori è stata responsabile dell'occorrenza di N_j terremoti. Come mostrato sopra, la probabilità che almeno uno di questi abbia prodotto al sito effetti pari almeno al grado I_s è Q_j , calcolata mediante l'equazione [3] a partire dalla storia sismica disponibile al sito. Sulla base delle nostre informazioni circa la situazione geodinamica passata e futura, è in linea di principio possibile definire una probabilità $s(\Delta t_j)$ relativa all'ipotesi che quella configurazione di fattori responsabili della sismicità osservata nell'intervallo Δt_j torni a manifestarsi nel futuro intervallo di esposizione Δt . Utilizzando $s(\Delta t_j)$, è possibile calcolare la probabilità $H(\Delta t, I_s)$ che durante il tempo di esposizione avvenga almeno un evento sismico con effetti al sito maggiori o uguali a I_s . Questa probabilità può essere calcolata come

$$H(\Delta t, I_s) = \sum_{j=1}^m s(\Delta t_j) Q(I_s | \Delta t_j) \quad [4]$$

dove la somma è estesa agli m possibili intervalli Δt_j della storia sismica (Mucciarelli et al., 1992). L'equazione [4] è valida nell'assunzione che, durante la storia sismica conosciuta si siano verificate tutte le condizioni dinamiche potenzialmente responsabili della pericolosità sismica al sito.

In assenza di informazioni valutabili circa lo stato presente e futuro di tali condizioni, la distribuzione di densità di probabilità $s(\Delta t_j)$ può essere considerata uniforme (Mucciarelli et al., 1992) e quindi

$$s(\Delta t_j) = \frac{1}{m} = \frac{1}{\Delta T - \Delta t + 1} \quad [5]$$

dove ΔT è l'estensione temporale della storia sismica complessivamente considerata.

2.2.3 Passo 3: effetto della completezza

Le stime di pericolosità ottenute mediante l'equazione [4] dipendono criticamente dalla storia sismica disponibile per l'intervallo ΔT considerato. Poiché sono possibili diverse scelte di questo intervallo (in funzione, per esempio, del livello di completezza delle informazioni disponibili), si verifica che

$$H(\Delta t, I_s) = H(\Delta t, I_s | \Delta T) \quad [6]$$

In generale, più è esteso nel tempo l'intervallo considerato, maggiore sarà la conoscenza della sismicità locale e meglio soddisfatte risultano le ipotesi che giustificano l'equazione [4]. Tuttavia, mano a mano che l'intervallo ΔT viene esteso all'indietro nel tempo, l'informazione disponibile peggiora divenendo (almeno a grandi linee) sempre meno chiara e affidabile. Questo problema è noto come problema della "completezza" ed è responsabile dell'apparente diminuzione del tasso di sismicità con l'estensione di ΔT all'indietro nel tempo. Come conseguenza di questo problema, stime di pericolosità effettuate sulla base di cataloghi "incompleti" possono risultare affette da errori sistematici.

Immaginando che esistano L possibili scelte di ΔT (p.es., estendendo progressivamente il catalogo all'indietro nel tempo), si vede che

$$H(\Delta t, I_s) = \sum_{i=1}^L r(\Delta T_i) H(\Delta t, I_s | \Delta T_i) \quad [7]$$

dove ΔT_i è l' i -ma possibile scelta di ΔT e $r(\Delta T_i)$ è il livello di fiducia attribuito a questa scelta. La probabilità $r(\Delta T_i)$ rappresenta quindi la "completezza" del catalogo considerato, ovvero il grado di fiducia attribuito all'ipotesi che quest'ultimo sia effettivamente rappresentativo della sismicità locale. Mediante la [7] possono essere effettuate stime di pericolosità sismica che tengono conto dell'intera storia sismica disponibile al sito e risultano dalla combinazione di stime di pericolosità ottenute per tutti gli L intervalli di tempo ΔT_i , "pesate" mediante il relativo livello di completezza $r(\Delta T_i)$.

Naturalmente l'approccio migliore alla stima della "completezza" sarebbe quello basato sulla valutazione diretta della qualità delle informazioni sismiche disponibili condotta a partire da un'analisi dettagliata del flusso informativo fra la fonte primaria dell'informazione sismologica (sia essa documentaria o strumentale) ed il dato finale riportato in catalogo. Sebbene esistano alcuni tentativi in proposito (p.es., Lee e Brillinger, 1979) questo tipo di analisi risulta attualmente fuori portata rispetto alle effettive disponibilità informative. Per superare il problema sono quindi largamente utilizzati approcci di tipo statistico dedicati alla valutazione preliminare del livello di completezza caratteristico di un dato catalogo sismico a partire dai dati contenuti nel catalogo stesso. Per superare l'apparente paradosso legato all'impiego di una base dati incompleta per la valutazione della sua stessa incompletezza, si ricorre ad assunzioni "a priori" sulle caratteristiche della sismicità. L'analisi si riduce quindi ad attribuire ad incompletezza la mancata aderenza della sismicità "apparente" riportata in catalogo al modello "teorico" ipotizzato. Nel corso degli anni sono stati proposti diversi metodi per condurre stime di questo tipo su cataloghi sismici (Stepp, 1971; Caputo e Postpischl, 1974; Bath, 1983; Tinti e Mulargia, 1985 a, b;



Mulargia e Tinti, 1985; Mulargia et al., 1987 a, b; Rotondi e Pagliano, 1993; Rotondi et al., 1994). In questo studio, per la stima della funzione di completezza $r(\Delta T_i)$ è stato utilizzato un approccio “robusto” (Martinelli e Albarello, 1997) che viene schematicamente illustrato in Appendice B e che rappresenta uno sviluppo in senso maggiormente quantitativo dell’approccio inizialmente proposto da Mulargia et al. (1987).

2.3 Vantaggi della procedura “di sito” rispetto all’approccio “standard”

I principali vantaggi della procedura proposta possono essere riassunti come segue:

viene effettuato un trattamento formalmente coerente ed estensivo delle varie incertezze coinvolte nella stima di pericolosità (dato di partenza, completezza, attenuazione); la stima finale di pericolosità risulta dalla convoluzione di queste incertezze;

il dato macrosismico viene utilizzato estensivamente soprattutto per quanto riguarda il suo bagaglio informativo sugli effetti al sito;

elementi informativi la cui incertezza è mal definita e comunque non formalizzabile (zone sismogeniche, identificazione delle sequenze foreshock -mainshock - aftershock) vengono trascurati nella procedura.

Una caratteristica assai importante della metodologia “di sito” è la possibilità che essa offre di valutare l’impatto delle diverse forme di incertezza sulla stima finale di pericolosità. Ad esempio, l’applicazione dell’approccio “di sito” a varie situazioni campione ha messo in evidenza come il livello di incertezza associato ai dati di intensità produca effetti sistematici sul tasso “apparente” di sismicità. In particolare, si vede come maggiore è l’incertezza sui dati di base, maggiore tende ad essere il tasso “apparente” di sismicità. Questo effetto sistematico trova una spiegazione nella tipica distribuzione in frequenza di occorrenza dei risentimenti in funzione del corrispondente livello di intensità (si veda l’Appendice C per una spiegazione formalizzata di tale effetto). Di fatto ciò produce stime di pericolosità tendenzialmente tanto più “conservative” tanto maggiore è il livello di incertezza associato alle storie sismiche disponibili. Dato che la massima incertezza è associata ai risentimenti “virtuali” (ovvero dedotti dai dati epicentrali mediante la relazione [1]) si vede come in presenza di storie sismiche “povere” di dati documentati, le stime di pericolosità tendano ad essere più elevate. In pratica, è come se, in presenza di dati incerti, intensità attese più elevate non possano essere escluse.

2.4 Limiti principali dell’approccio “di sito”

I principali svantaggi della metodologia descritta nel capitolo precedente risiedono:

- nel suo carattere essenzialmente fenomenologico: nessun elemento deterministico viene preso in considerazione nella procedura;
- nel fatto che il risultato finale è espresso in termini macrosismici non direttamente utilizzabili per scopi di progettazione.

Il primo punto rappresenta una indubbia limitazione della procedura che è però frutto di una scelta ritenuta necessaria. In generale, le conoscenze sul processo sismogenico sono assai scarse e questo è particolarmente vero per l’area italiana nel suo complesso. Sono infatti molte le aree della Penisola per le quali non esistono che vaghe indicazioni sulle possibili strutture effettivamente responsabili della sismicità osservata. Ma più grave ancora (anche perché è generalizzata) è la mancanza di ogni stima formalizzata o formalizzabile della qualità delle informazioni effettivamente disponibili. Dato che quest’ultima informazione gioca un ruolo essenziale nella stima della pericolosità, l’esclusione di questo genere di informazioni può “migliorare” (nel senso di rendere più condivisibili) le stime di pericolosità.

Riguardo al secondo punto, è comunque utile ricordare che, nonostante il dato macrosismico non possa direttamente essere trasformato in un parametro di progetto, un risultato di pericolosità espresso nella forma di “scenari” di danno atteso può comunque risultare di estremo interesse ai fini delle attività di protezione civile ed è direttamente spendibile sul territorio nei rapporti con le amministrazioni locali. Inoltre questo tipo di risultato è coerente con la base informativa utilizzata per le stime di pericolosità in Italia che, come ricordato precedentemente, ha un carattere essenzialmente macrosismico, sia riguardo alla caratterizzazione della sismicità sia alla stessa identificazione delle sorgenti sismogeniche (p.es., Scandone, 1997).



Università degli Studi di Siena
Dipartimento di Scienze della Terra

Presidenza del Consiglio dei Ministri
Servizio Sismico Nazionale



3. Applicazione

3.1 Stime di pericolosità sismica relative a due regioni campione

La metodologia descritta nel capitolo 2 è stata inizialmente applicata alla determinazione della pericolosità sismica dei capoluoghi comunali e di località minori (per le quali sono disponibili informazioni macrosismiche) del Molise e della Calabria.

Riguardo alla base informativa utilizzata per la stima di pericolosità per entrambe le Regioni, i dati epicentrali sono stati dedotti dal catalogo NT (nella versione 4.1), relativo ai terremoti italiani oltre la soglia di danno verificatisi nel periodo 1000 – 1980 (Camassi e Stucchi, 1996). Le informazioni macrosismiche di sito sono state invece dedotte dal catalogo dei risentimenti DOM 4.1 (Monachesi e Stucchi, 1997). Questa scelta è stata dettata dalle seguenti considerazioni:

il catalogo dei risentimenti DOM 4.1 risulta il più esteso (in termini di terremoti considerati) fra quelli disponibili;

il catalogo epicentrale NT 4.1 è stato scelto per mantenere un adeguato livello di coerenza fra il dato di sito (riportato sul DOM) e il dato epicentrale che da questa stessa base informativa ha origine.

I risentimenti macrosismici utilizzati sono tutti espressi in termini della scala MCS.

Le due Regioni si presentano assai differenti per quanto riguarda sia la loro situazione sismotettonica che la base informativa disponibile circa la sismicità passata. In particolare, sebbene entrambe le regioni siano state colpite in passato da eventi sismici di notevole dimensione, l'indagine storiografica rivolta alla ricerca di informazioni documentarie sulla storia sismica locale appare assai differente. Mentre, infatti, risulta assai ricco il patrimonio informativo relativo agli effetti di terremoti passati nella Regione calabra (pure con notevoli disomogeneità), assai più scarse sono le informazioni macrosismiche disponibili per l'area molisana.

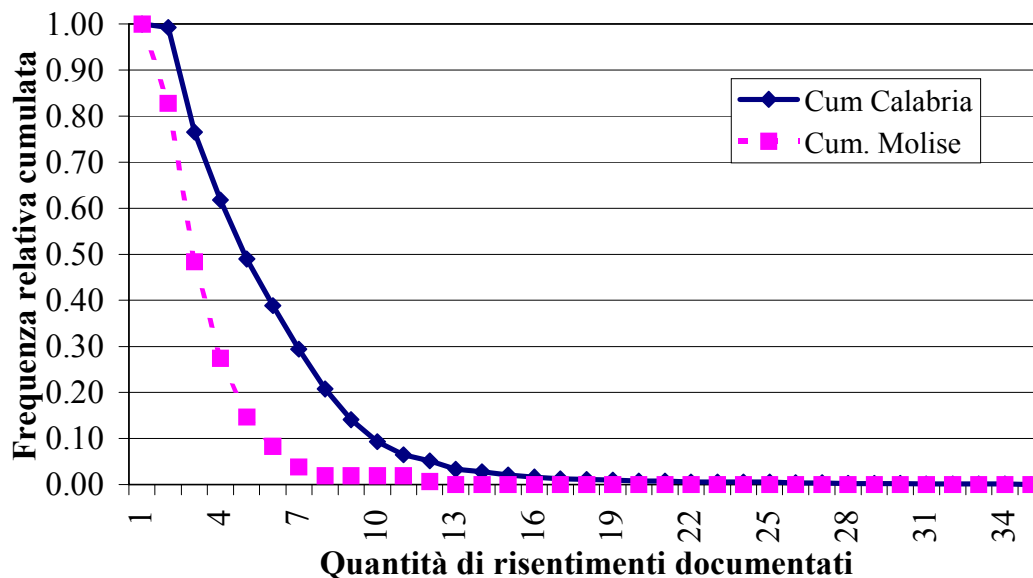


Figura 1. Distribuzione in frequenza delle località in funzione del numero di risentimenti documentati

Dalla figura 1 si vede, per esempio, che, mentre nella Regione Molise per meno del 20% delle oltre 150 località in esame sono disponibili almeno 5 risentimenti documentati, questa percentuale supera il 60% quando vengono prese in considerazione le oltre 800 località della Calabria. Questa differenza può solo parzialmente essere attribuita al diverso tasso di sismicità nelle due Regioni. Molto importante in questo senso sembra, infatti, anche il diverso livello di approfondimento della documentazione disponibile sulla sismicità passata.



E' quindi risultato interessante mettere alla prova la metodologia proposta in due situazioni così difformi e soprattutto valutare i suoi risultati in rapporto a quelli già ottenuti per le stesse zone utilizzando l'approccio "standard".

Come si è detto, le informazioni utilizzate per la ricostruzione delle storie sismiche di sito sono quelle riportate nel catalogo DOM 4.1. I dati disponibili nei cataloghi DOM 4.1 e NT 4.1 sono corredati da una stima assai grossolana dell'incertezza ad essi associata. In particolare sono presenti due tipi di dato: il dato "certo" (una sola indicazione di intensità I') ed il dato "incerto" (due possibili valori contigui di intensità $I'-I''$). Per la definizione del vettore di probabilità $P(I)$ associato a ciascun dato sono stati usati i seguenti criteri speditivi:

- dato "Certo": $P(I)=1$ per $I \leq I'$ e $P(I)=0$ per $I > I'$
- dato "Incerto": $P(I)=1$ per $I \leq I'$, $P(I)=0.5$ per $I = I''$, $P(I)=0$ per $I > I''$

(si noti che quest'ultima posizione equivale ad attribuire identica verosimiglianza alle ipotesi $I=I'$ e $I=I''$). Coerentemente con l'interpretazione "epistemica" della probabilità, i valori inferiori a 0.01 e superiori a 0.99 sono stati giudicati "psicologicamente" indistinguibili rispettivamente da 0 e da 1.

Per la stima della pericolosità sismica delle località capoluogo comunale delle due Regioni sono state utilizzate tre diverse possibili "storie sismiche" di sito. La prima è la storia sismica "virtuale" ricostruita a partire dai soli dati epicentrali utilizzando le relazioni [1] e [2]. La seconda usa i soli dati effettivamente documentati al sito per le località caratterizzate da almeno 5 risentimenti maggiori del V grado MCS. La terza utilizza la combinazione delle precedenti due ed in particolare usa il dato "virtuale" solo in assenza del dato documentato. La stima "migliore" (ovvero che sfrutta al meglio la base informativa disponibile) è quella ottenuta integrando le informazioni al sito con i risentimenti "virtuali" dedotti da dati epicentrali. La stima effettuata utilizzando i soli dati epicentrali è quella caratterizzata da dati di base affetti da maggiori incertezze, mentre quella ottenuta da soli dati di sito risulta la più penalizzata dalle lacune nella documentazione disponibile. Un'analisi integrata delle tre stime può fornire un'idea degli effetti delle diverse sorgenti di incertezza sulla stima finale di pericolosità.

Un ulteriore elemento di interesse connesso al confronto fra le stime di pericolosità effettuate a partire dalle storie sismiche "integrate" (H_i) e "virtuali" (H_v), viene dalla possibilità che questo offre di fornire indicazioni circa la possibile presenza di località per le quali effetti di sito dovuti alle condizioni geologico-topografiche locali possono influenzare significativamente il valore della pericolosità sismica. In generale, le stime di H_v sono condizionate dalla sola distribuzione delle sorgenti mentre quelle di H_i , dato che includono informazioni locali, sono potenzialmente in grado di evidenziare la possibile occorrenza di effetti di amplificazione locale. In generale, a causa della riduzione di incertezza sui dati di base connessa all'impiego di effetti documentati al sito (si veda l'Appendice C), si ha che $H_i < H_v$. Il caso opposto ($H_v < H_i$) potrebbe essere indicativo di significativi effetti di amplificazione. Questo approccio è stato finora sperimentato su due aree campione (Basilicata e Toscana settentrionale) ed ha fornito risultati interessanti (Gallipoli et al., 1998; D'Amico et al., 2000).

Per ciascuna possibile storia "di sito" sono state calcolate le probabilità di eccedenza relative ai gradi MCS dal VI all' XI per un tempo di esposizione di 50 anni. Sulla base di questi risultati sono state quindi valutate le intensità attese (ovvero i valori massimi di intensità caratterizzati da una probabilità di superamento in 50 anni non inferiore al 10%). I risultati dei calcoli di pericolosità sono riportati in allegato in forma digitale (Appendice D).

Si nota immediatamente come, a causa della scarsità di informazioni disponibili, la stima ottenuta dai soli dati osservati ha riguardato solo una minima percentuale delle località esaminate (13, ovvero meno del 15% del totale). A causa di questa limitazione, le stime condotte su questa base non verranno commentate nel seguito anche se i relativi risultati di dettaglio sono comunque riportati nelle tabelle allegate in forma digitale.

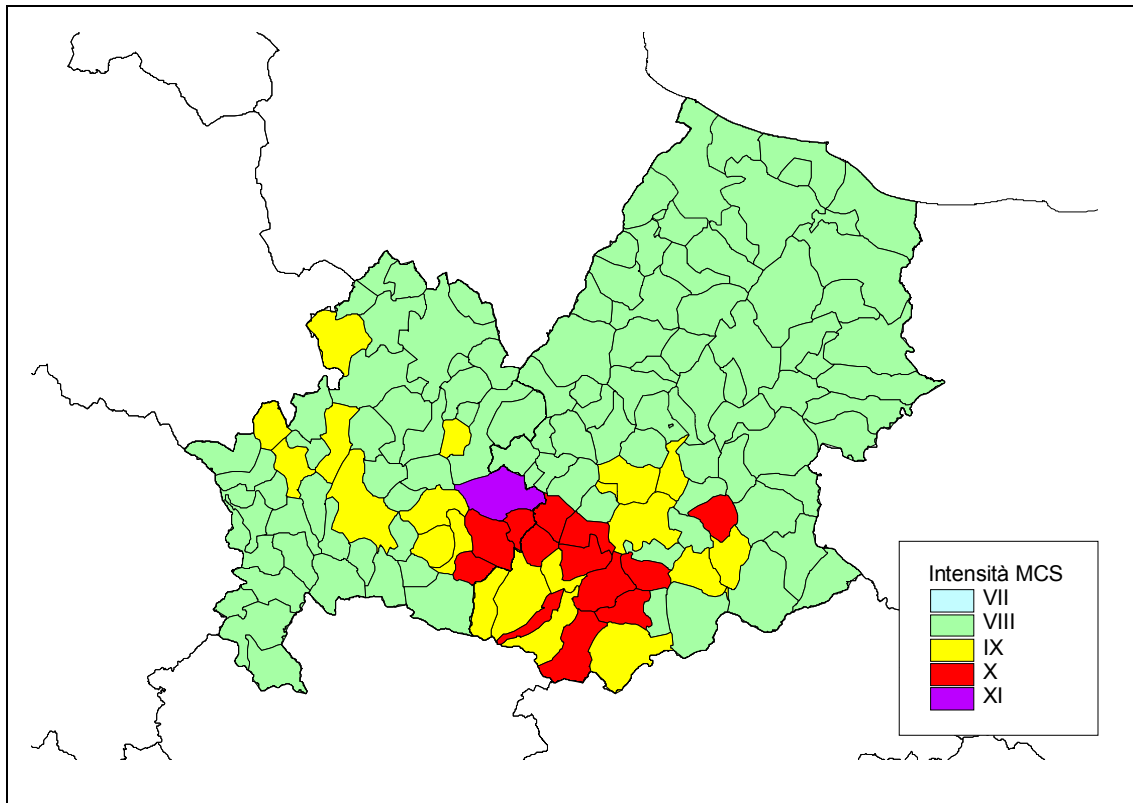


Figura 3. Mappa delle intensità attese nei comuni della Regione Molise sulla base delle storie sismiche ottenute integrando i risentimenti documentati con quelli “virtuali”

L’impiego di storie sismiche ottenute dalla combinazione di dati documentati e “virtuali” mostra che la maggioranza delle località risulta caratterizzata da valori di intensità attese pari al grado VIII della scala MCS con appena 16 località esposte a intensità di X grado. In generale si nota che le stime condotte sulla base dei soli risentimenti “virtuali” risultano tendenzialmente più elevate di quelle ottenute utilizzando anche i risentimenti documentati: le località con intensità attese pari a VIII MCS passano dal 54 % del totale nel primo caso al 74% nel secondo, mentre quelle con intensità attese pari a IX MCS passano dal 31 al 15%. Come accennato in precedenza, l’impiego di risentimenti “documentati” tende a diminuire l’incertezza sui dati di base riducendo il livello di conservatività delle stime finali.

L’aspetto più interessante riguarda però la distribuzione geografica delle intensità attese.

La mappa in figura 2 mostra la distribuzione geografica delle intensità attese ottenute, nei soli capoluoghi comunali, sulla base dei soli risentimenti “virtuali”. La figura 3 mostra invece le intensità attese dedotte integrando i dati documentati con i risentimenti “virtuali”.

Anche se a causa della citata scarsità di risentimenti documentati le differenze riguardano una minoranza dei comuni, un confronto fra le due mappe mostra come il ricorso ai risentimenti locali metta in evidenza un maggior livello di eterogeneità nella distribuzione della pericolosità sismica dell’area. Si vede anche che le differenze non hanno carattere sistematico ma dipendono dalla quantità e dalla qualità delle informazioni disponibili localmente.

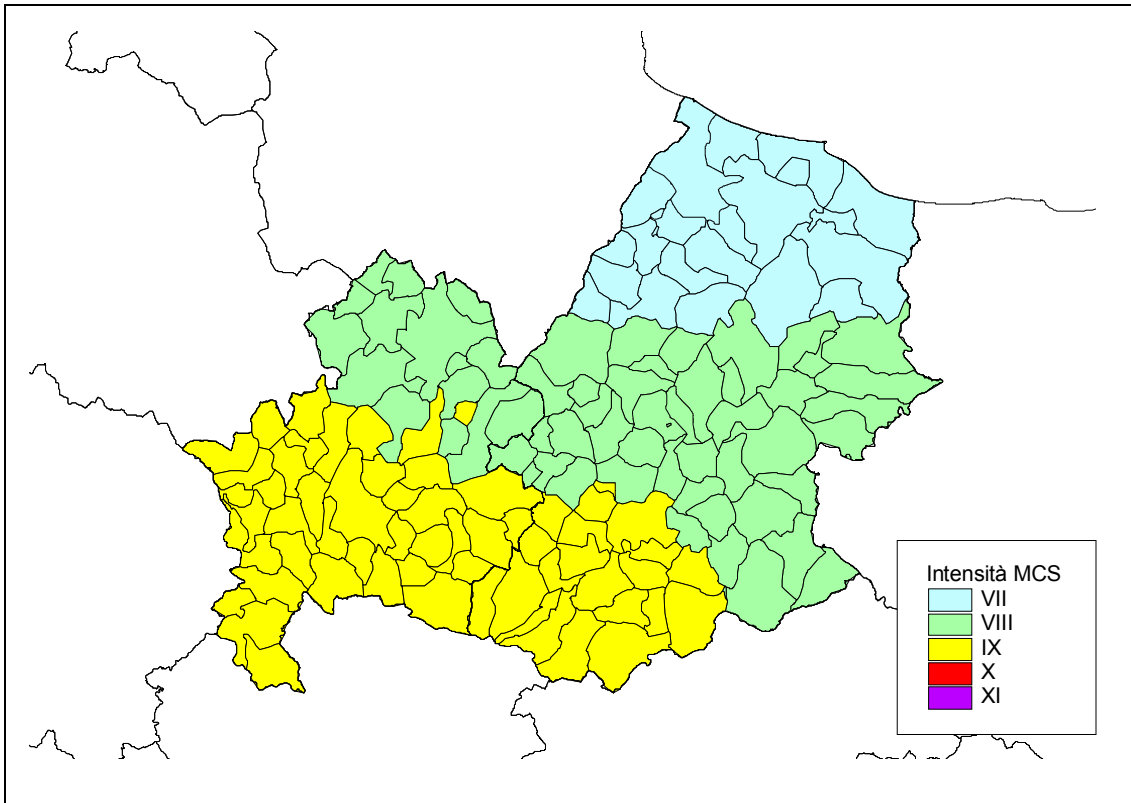


Figura 6. *Mappa delle intensità attese nelle località capoluogo della Regione Molise ottenute a partire dall'approccio "standard"*

I valori in tabella 2 mostrano come le stime ottenute utilizzando l'approccio "standard" risultino sistematicamente inferiori rispetto a quelle ottenute utilizzando l'approccio "di sito". Inoltre, dal confronto fra la mappa in figura 3 e quella in figura 6 si nota come l'approccio di sito metta in evidenza un significativo livello di eterogeneità laterale nei valori di intensità attesa. Queste differenze risultano ancora meglio evidenziate quando il confronto viene effettuato fra le probabilità di superamento ottenute per l'VIII grado mediante l'approccio "di sito" (Fig. 5) e quelle relative all'approccio "standard" (Fig. 7).

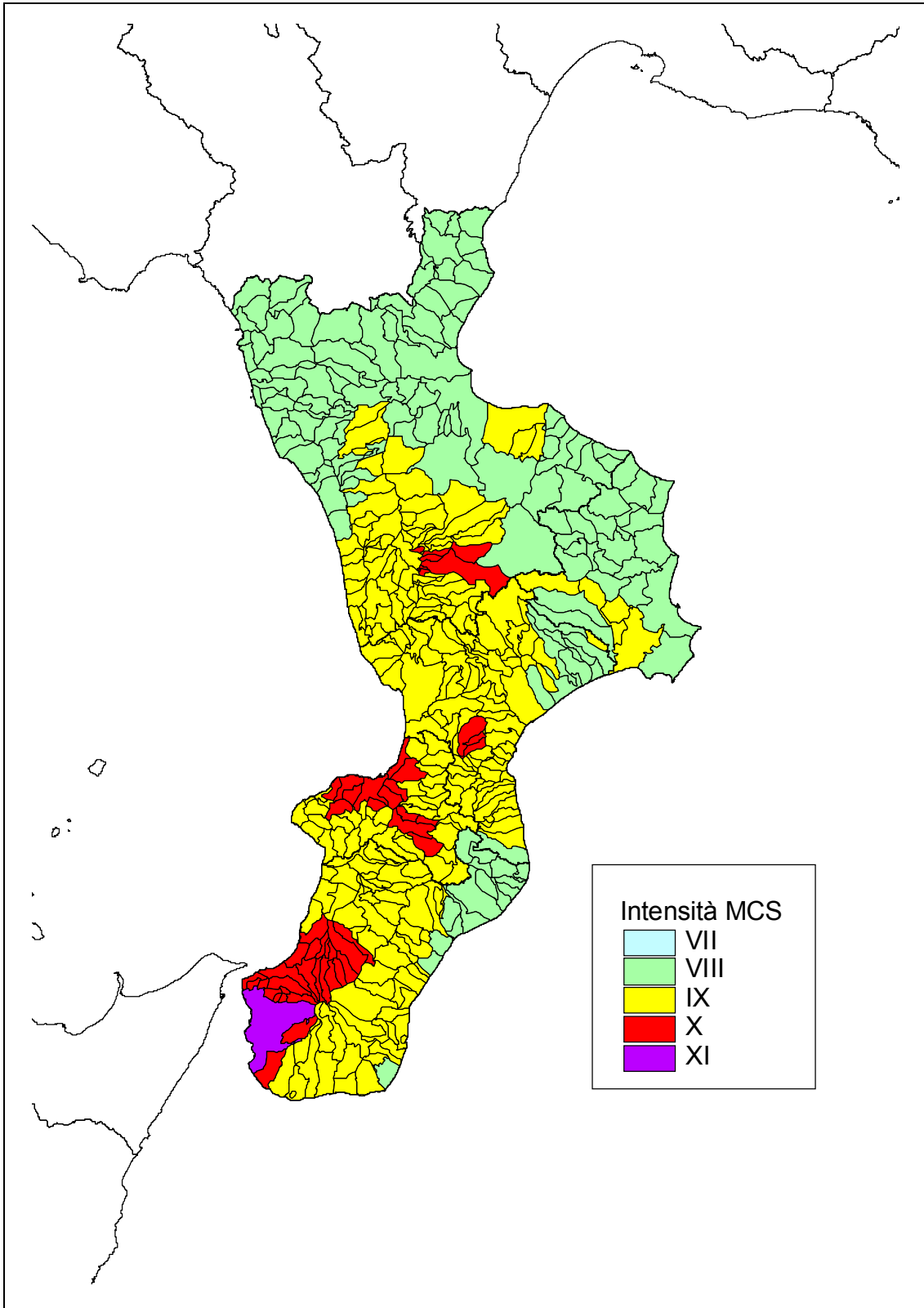


Figura 8. *Mappa delle intensità attese nei comuni della Regione Calabria sulla base dei soli risentimenti "virtuali"*

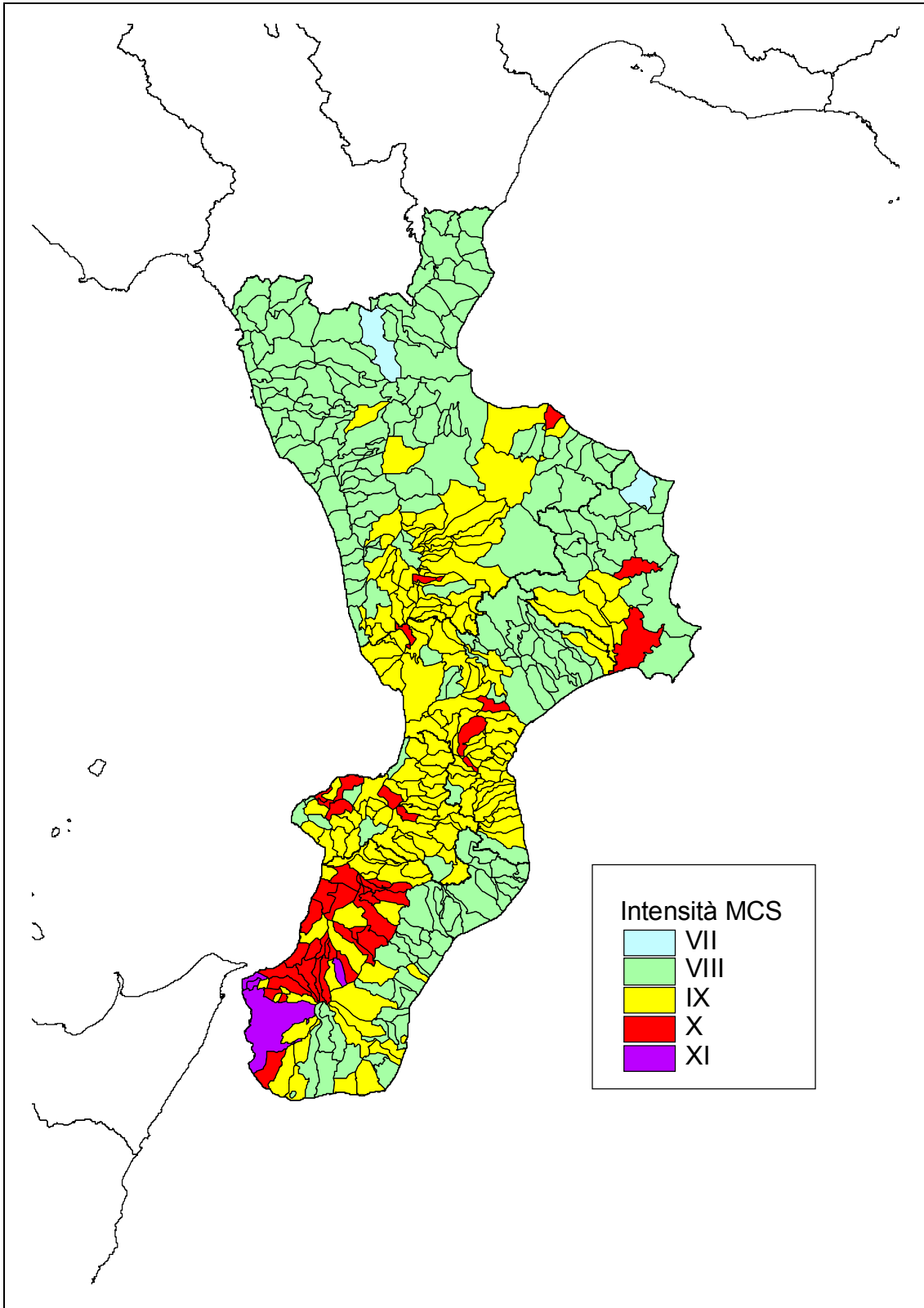


Figura 9. *Mappa delle intensità attese nei comuni della Regione Calabria sulla base delle storie sismiche ottenute integrando i risentimenti documentati con quelli “virtuali”*

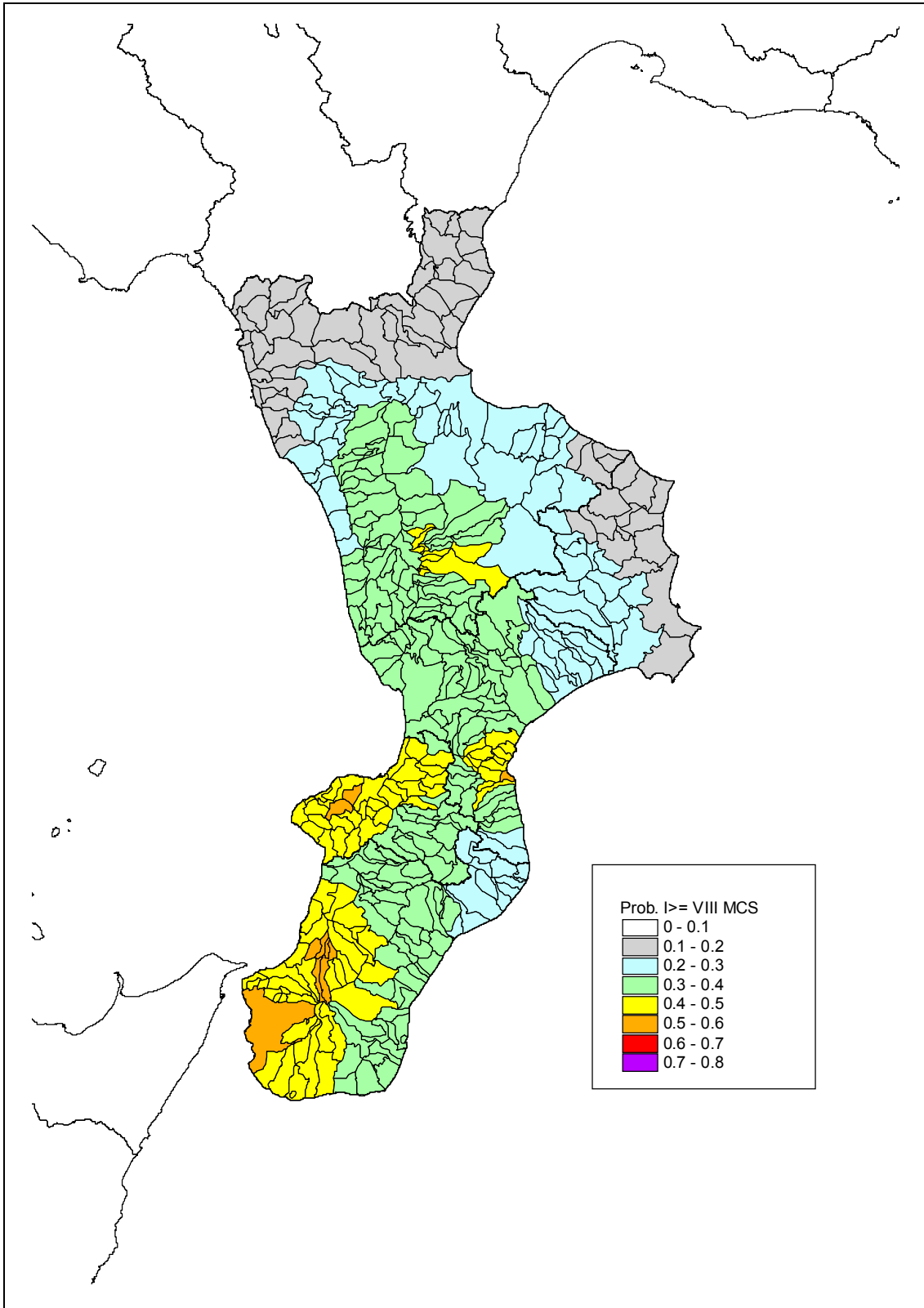


Figura 10. Mappa delle probabilità di superamento in 50 anni dell'intensità VIII MCS per le località capoluogo della Regione Calabria calcolate a partire dalle storie sismiche "virtuali"

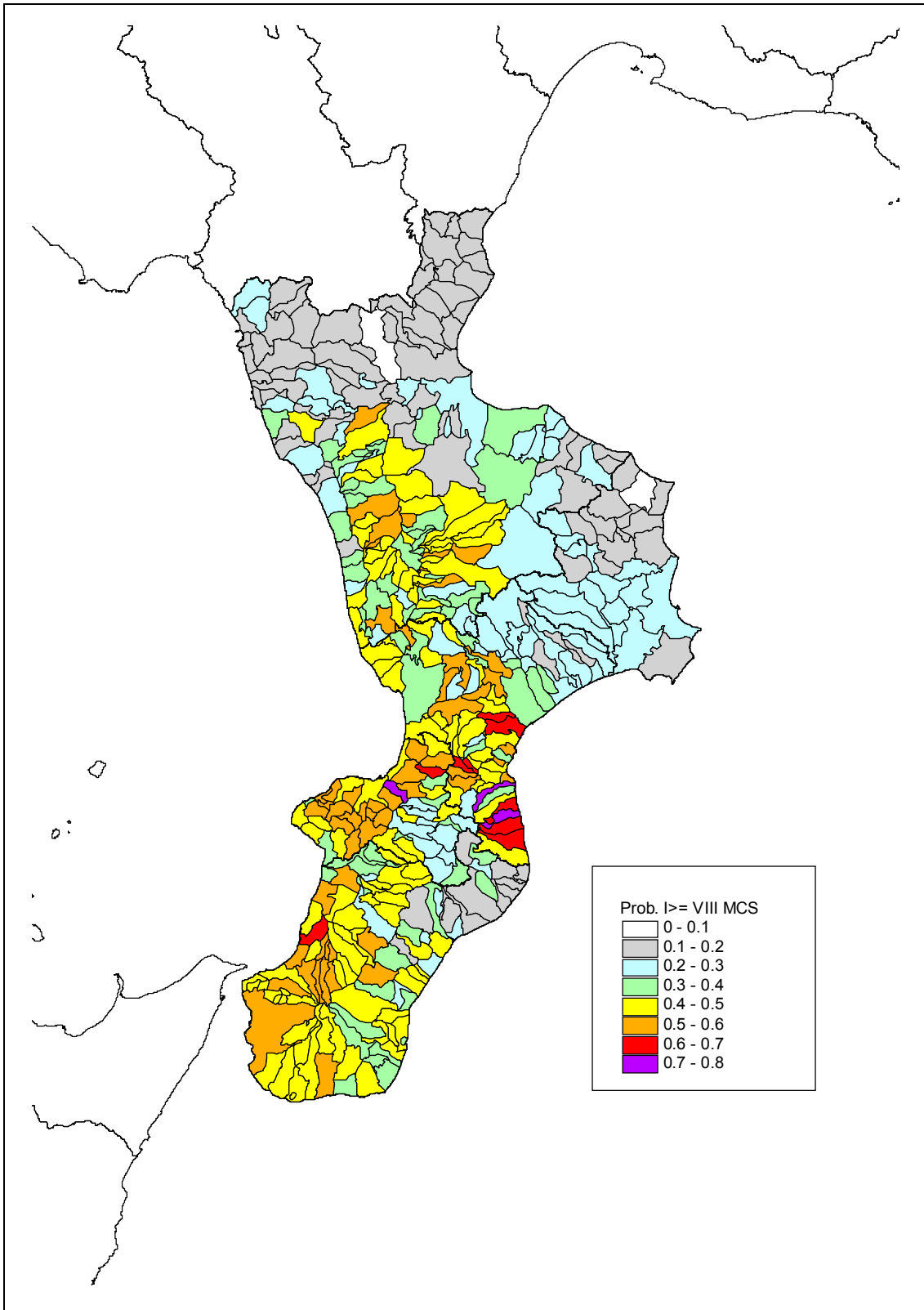


Figura 11. Mappa delle probabilità di superamento in 50 anni dell'intensità VIII MCS per le località capoluogo della Regione Calabria calcolate combinando effetti "virtuali" e documentati



3.1.2.2 Confronto con le stime fornite dall'approccio "standard"

Le stime di pericolosità ottenute mediante l'approccio "di sito" sono state confrontate con quelle ottenute utilizzando la metodologia "standard" a partire dalla stessa base informativa ed utilizzando una procedura di calcolo sviluppata in collaborazione dal Servizio Sismico Nazionale e dal Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (Albarelo et al., 2000).

La figura 12 mostra la distribuzione geografica delle intensità attese secondo l'approccio "standard". Nella tabella 4 viene mostrato il confronto sintetico fra le mappe delle figure 9 e 12. In particolare, è riportata la distribuzione in frequenza (ΔI) delle differenze fra le intensità attese nell'approccio "di sito" e quelle ottenute nell'approccio "standard".

ΔI	Frequenza
-3	0
-2	0
-1	18
0	185
1	187
2	17
3	2

Tabella 4. Confronto fra le stime di intensità attesa ottenute mediante l'approccio "di sito" (Fig. 9) e l'approccio "standard" (Fig 12)

Come nel caso del Molise, si nota una tendenza generale dell'approccio "di sito" a produrre stime di pericolosità più elevate rispetto al metodo "standard" e a mettere in evidenza significative eterogeneità laterali nella distribuzione geografica delle intensità attese. Analogamente al Molise, questo effetto risulta ancora più pronunciato quando vengono messe a confronto le mappe relative alle probabilità di eccedenza associate al grado VIII MCS (Figg. 11 e 13).

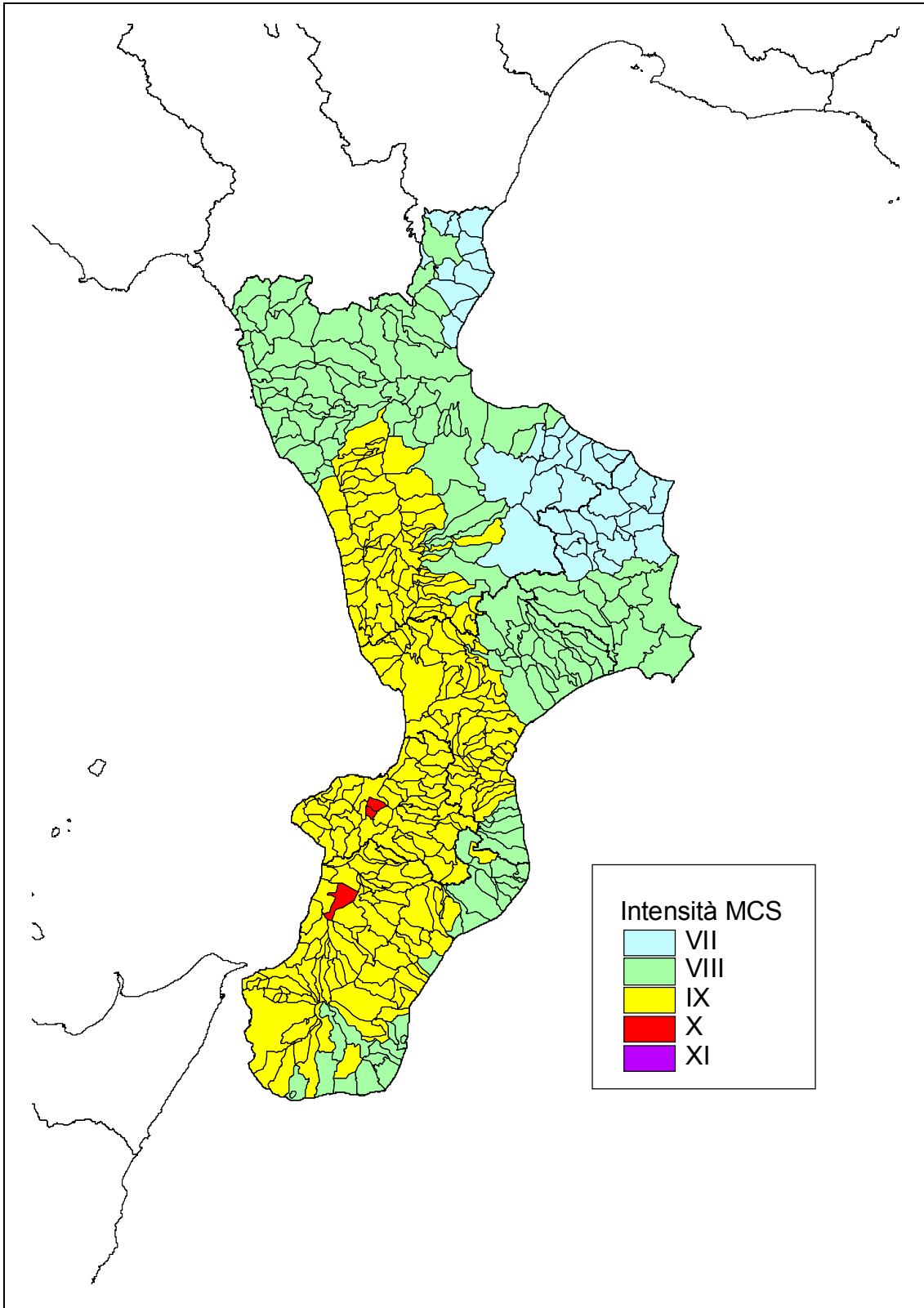


Figura 12. *Mappa delle intensità attese nelle località capoluogo della Regione Calabria ottenute a partire dall'approccio "standard"*

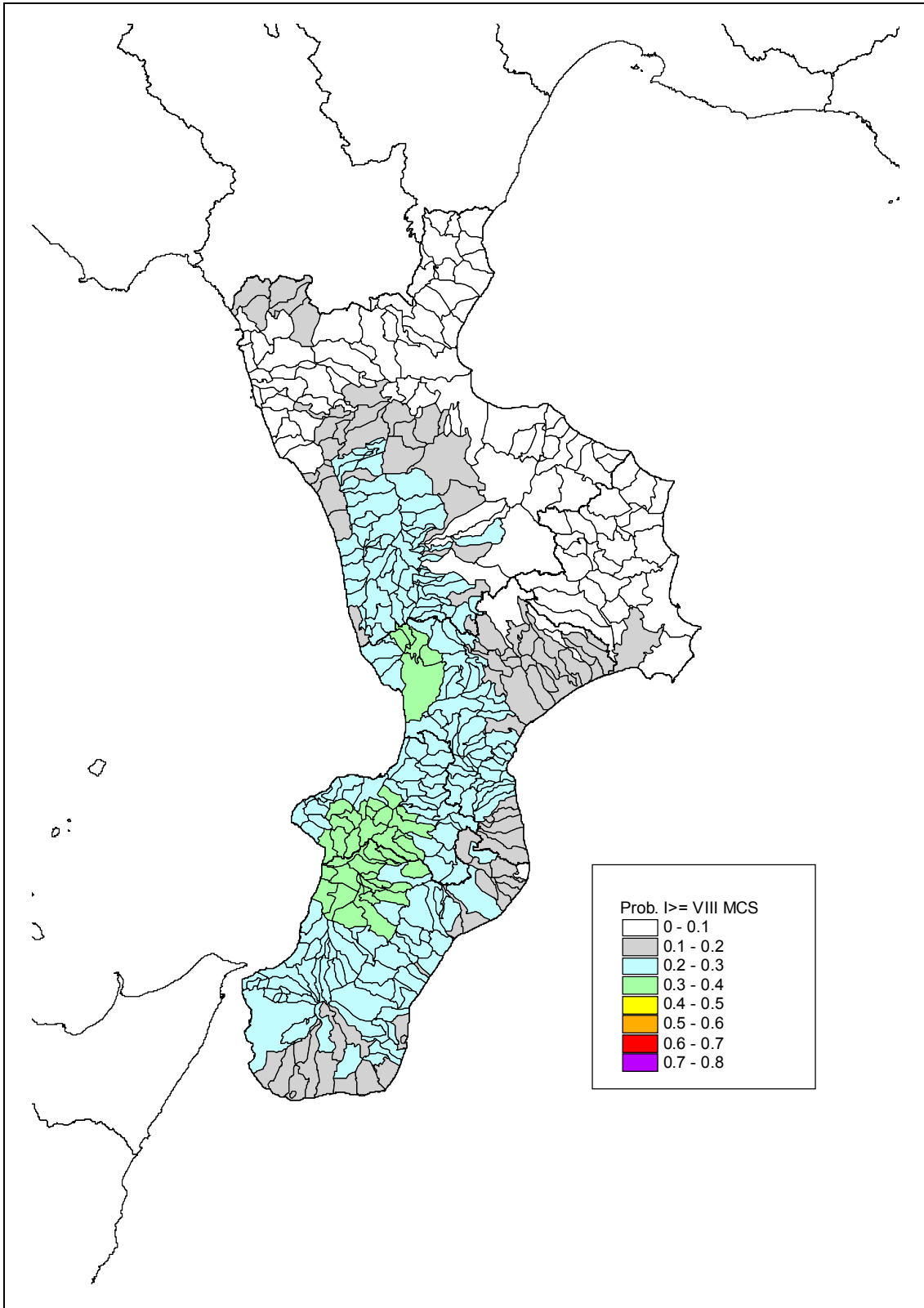


Figura 13. *Mapa delle probabilità di superamento in 50 anni dell'intensità VIII MCS per le località capoluogo della Regione Calabria calcolate seguendo l'approccio "standard"*



3.2 Stime di pericolosità sismica per le località capoluogo comunale del territorio italiano

Utilizzando l'approccio "di sito" sono state estese all'intero territorio nazionale le stime di pericolosità sismica effettuate inizialmente per le sole località capoluogo comunale delle regioni Calabria e Molise. Mentre nelle precedenti elaborazioni le stime erano state effettuate a partire dai dati sismici contenuti nei cataloghi forniti dal Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (catalogo parametrico NT e catalogo dei risentimenti DOM), le nuove stime sono state effettuate utilizzando il nuovo catalogo parametrico CPTI frutto degli sforzi congiunti del Gruppo Nazionale di Difesa dai Terremoti, dell'Istituto Nazionale di Geofisica e del Servizio Sismico Nazionale (WG CPTI, 1999). Per quanto riguarda il catalogo dei risentimenti si è fatto riferimento alle indicazioni contenute nello stesso catalogo CPTI riguardo agli studi macrosismici utilizzati per la parametrizzazione dei singoli terremoti e riportati nelle diverse compilazioni finora pubblicate (Database delle Osservazioni Macrosismiche, Catalogo dei Forti Terremoti Italiani, Bollettini Macrosismici dell'Istituto Nazionale di Geofisica). La nuova base dati copre l'intero territorio nazionale per un intervallo temporale che va dal 461 a.C al 1992 d.C. Il catalogo include le sole scosse principali con intensità epicentrale o massima almeno pari al V-VI grado MCS.

Seguendo la procedura descritta nel capitolo 2, utilizzando le informazioni disponibili sono state ricostruite le storie sismiche di sito relative alle località capoluogo comunale del territorio italiano per l'intervallo temporale compreso fra il 1000 d.C. e il 1992 d.C.. Per la definizione delle storie sismiche di sito è stata effettuata la scelta conservativa di attribuire alla località capoluogo la massima intensità documentata in corrispondenza del terremoto di volta in volta considerato in una qualunque località all'interno territorio comunale.

Su questa base, per ciascuna soglia di danno atteso I_s , è stata valutata la probabilità che entro un intervallo di 50 anni si verifichi al sito almeno un evento sismico capace di provocare effetti almeno pari all'intensità di soglia. E' stata quindi valutata l'intensità attesa come il massimo valore di intensità caratterizzato da una probabilità di occorrenza in 50 anni non inferiore al 10%.

I risultati dei calcoli di pericolosità effettuati utilizzando le tre diverse storie sismiche di sito (come discusso nei paragrafi precedenti), sono riportati in allegato in forma digitale (Appendice E).



PARTE SECONDA

Validazione delle stime di pericolosità sismica

include sia la modalità di calcolo che la base informativa utilizzata). In pratica, la stima di pericolosità può essere vista come un valore di probabilità assegnato ai valori della variabile binaria e_s definita sopra ignorando gli eventi sismici che avverranno durante Δt^* . In pratica si ha che

$$H_s = \text{prob}(e_s = 1) = H_s(e_s | G_n)$$

dove si è ulteriormente sottolineata la dipendenza della valutazione di pericolosità dalla procedura G_n . La distribuzione di probabilità che caratterizza la variabile casuale e_s può essere descritta dalla forma binomiale

$$p(e_s) = H_s^x (1 - H_s)^{1-x}$$

con x pari a 1 o 0 a seconda che l'evento sismico si è verificato o meno. L'attesa matematica sarà data da

$$\mu(e_s) = H_s \quad [10]$$

mentre la varianza risulterà pari a

$$\sigma^2(e_s) = H_s(1 - H_s) \quad [11]$$

A partire dalle [10] e dalla [11] è possibile quindi valutare l'attesa matematica e la varianza che caratterizzano la variabile casuale M . Per le note proprietà dell'attesa matematica e della varianza si ha infatti che

$$\mu(M) = \sum_{s=1}^S H_s \quad [12]$$

e

$$\sigma^2(M) = \sum_{s=1}^S H_s(1 - H_s) \quad [13]$$

Per il teorema di Chebychev (p.es. Gnedenko, 1976) si ha quindi che

$$\text{prob}(|M - \mu(M)| \geq k\sigma(M)) \leq k^{-2} \quad [14]$$

dove M è dato dalla [9], mentre i valori $\mu(M)$ e $\sigma(M)$ sono dati rispettivamente dalla [12] e dalla [13]. Limiti più stringenti (capaci quindi di definire un test più potente) possono essere attribuiti al possibile valore di M a partire dalla [12] e dalla [13] considerando il teorema del limite centrale nella forma di Lyapunov (p.es., Gnedenko, 1976) e valori di S relativamente grandi, per i quali si ricava che

$$\text{prob}(|M - \mu(M)| \geq 2\sigma(M)) \cong 0.05 \quad [15]$$

L'equazione [15] può essere usata per la formulazione di un test di verosimiglianza per le stime di pericolosità fornite dalla metodologia G_n

A questo scopo si può procedere come segue:

- 1 - si considerano le S località per le quali esistono stime di pericolosità H_s effettuate a partire dalla procedura G_n per un tempo di esposizione di lunghezza Δt ;
- 2 - si considera la sismicità osservata durante un intervallo di tempo Δt^* di durata pari a Δt e si definiscono i valori della variabile binaria e_s descritta sopra;

- 3 – si confronta il valore di M calcolato a partire da questi valori mediante la [9] con le stime di $\mu(M)$ e $\sigma(M)$ dedotte dalle stime di pericolosità H_s attraverso la [12] e la [13]
4 – Per la [15], se questi valori soddisfano la condizione

$$|M - \mu(M)| < 2\sigma(M) \quad [16]$$

si dirà che le stime di pericolosità sono compatibili con la sismicità osservata durante il periodo Δt^* e che quindi le metodologie di stima utilizzate possono essere considerate “attendibili”.

5.3 Definizione del livello di verosimiglianza delle procedure considerate “attendibili”

Una volta selezionate le N^* procedure (con $N^* \leq N$) che forniscono risultati compatibili con le osservazioni (ovvero soddisfano la condizione [16]), i dati di sismicità disponibili per il periodo Δt^* possono essere usati per valutare il diverso livello di attendibilità $p(G_n)$ (eq. [8]) associato a ciascuna procedura per il calcolo della pericolosità.

Si assume a questo scopo che

$$\sum_{n=1}^{N^*} p(G_n) = 1 \quad [17]$$

ovvero che gli N^* modelli considerati esauriscano l’universo delle procedure plausibili, che queste siano mutuamente esclusive (solo una procedura fornisce le stime “giuste” anche se non si sa quale) e che almeno una di queste fornisca risultati attendibili. In questa situazione, l’applicazione del teorema di Bayes implica che

$$\left\{ \begin{array}{l} p^s(G_n | e_s) = \frac{p^{s-1}(G_n | e_s) H(e_s | G_n)}{\sum_{n=1}^{N^*} p^{s-1}(G_n | e_s) H(e_s | G_n)} \quad \text{per } e_s = 1 \\ p^s(G_n | e_s) = \frac{p^{s-1}(G_n | e_s) (1 - H(e_s | G_n))}{\sum_{n=1}^{N^*} p^{s-1}(G_n | e_s) (1 - H(e_s | G_n))} \quad \text{per } e_s = 0 \end{array} \right. \quad [18]$$

La probabilità $H(e_s | G_n)$ è la pericolosità sismica al sito s -mo calcolata seguendo l’approccio G_n mentre la probabilità $p^s(G_n | e_s)$ rappresenta il livello di verosimiglianza attribuito alla stessa procedura una volta noto il valore assunto da e_s al sito considerato (in pratica l’occorrenza o meno di un risentimento almeno pari a I_s).

La formula [18] è applicata in modo ricorsivo per tutte le S località, a partire da una valutazione iniziale $p^0(G_n)$ che rappresenta l’affidabilità attribuita “a priori” a ciascuna delle N^* diverse procedure. Negli esempi applicativi finora considerati (Albarellò e D’Amico, 2000) si è utilizzata la condizione

$$p^0(G_n) = \frac{1}{N^*} \quad \forall n \quad [19]$$

macrosismici nel periodo 1981-2000. Per il periodo 1981-1994, queste informazioni sono state dedotte dai Bollettini macrosismici dell'Istituto Nazionale di Geofisica mentre per il periodo successivo i dati sono stati gentilmente forniti da ricercatori ING (A.Tertulliani), GNDT (R.Camassi) e SSN (D.Molin).

6.3 Selezione delle procedure “attendibili”

Il primo passo del protocollo di validazione è quello relativo alla definizione del valore “osservato” della variabile M (eq. [9]) che rappresenta il numero di risentimenti osservati sul totale delle S località considerate durante il periodo di controllo. A questo scopo sono stati presi in considerazione i risentimenti macrosismici documentati relativi ai gradi non inferiori al VII e all’VIII MCS (i risentimenti incerti del tipo VI-VII e VII-VIII MCS sono stati rispettivamente attribuiti i gradi VII e VIII MCS) durante il periodo “di controllo” 1981-2000.

Dai dati a disposizione risulta che, fra le 545 località esaminate in Molise e Calabria, solo 52 hanno sperimentato almeno un terremoto caratterizzato da effetti di grado almeno pari a VII MCS (si veda la tabella A allegata descritta nell’Appendice F). Sullo stesso campione risultano invece solo 5 le località che nel medesimo intervallo hanno sperimentato effetti sismici pari almeno al grado VIII MCS (si veda la tabella B allegata, descritte nell’Appendice F).

Questi valori documentati di M devono essere confrontati con quelli attesi sulla base delle diverse procedure per il calcolo della pericolosità sismica relativa ad un intervallo di esposizione di 20 anni (analogo a quello compreso fra il 1981 e il 2000) per una intensità I_0 almeno pari al VII ed all’VIII grado MCS.

Sono state innanzitutto utilizzate le stime di pericolosità ottenute seguendo i diversi approcci (AC, SI, SV ed SS) per le 545 località capoluogo comunale del Molise e della Calabria e relative ad un livello di scuotimento atteso in 20 anni non inferiore al grado VII MCS. I valori di pericolosità ottenuti sono riportati per ciascuna località nella tabella A allegata, descritta nell’Appendice F.

A partire da questi valori di pericolosità ed utilizzando le formule [12] e [13], sono state ottenute diverse valutazioni del numero “atteso” $\mu(M)$ di località interessate da almeno un evento sismico con intensità al sito non inferiore al grado VII MCS in 20 anni. La tabella 5 mostra i valori ottenuti utilizzando le diverse metodologie assieme al valore della deviazione standard $\sigma(M)$ ad essi associato.

Metodo di stima	$\mu(M)$	$\sigma(M)$
Alla Cornell (AC)	99	9
Di sito Integrato (SI)	226	11
Di Sito Virtuale (SV)	220	11
Di Sito in Senso Stretto (SS)	68	7

Tabella 5. Valori attesi ($\mu(M)$) e deviazioni standard ($\sigma(M)$) del numero M dei comuni del Molise e della Calabria caratterizzati da almeno un risentimento non inferiore al grado VII MCS in 20 anni ottenuti utilizzando le diverse metodologie di stima della pericolosità

Dai dati in tabella 5 si nota come tutte le metodologie forniscano valori attesi di M assai superiori al valore osservato del numero delle località che nel periodo 1981-2000 hanno effettivamente sperimentato almeno un risentimento pari o superiore al grado VII MCS ($M=52$). Nella figura 14 sono riportati gli intervalli di confidenza al 95% del valore atteso di M (eq. [15]) ottenuti con le diverse metodologie assieme al valore osservato.

Come si vede dalla figura 14 e dalla tabella 5, nessuna metodologia soddisfa la condizione [16]. Pertanto nessuna metodologia fornisce risultati compatibili con le osservazioni. C’è da osservare che la metodologia che produce risultati meno “inesatti” è quella basata sull’approccio “di sito” applicato utilizzando i soli risentimenti documentati.

Risultati analoghi ai precedenti sono stati ottenuti considerando una intensità di soglia pari al grado VIII MCS. Anche in questo caso sono state effettuate le stime di pericolosità utilizzando le quattro metodologie considerate (AC, SI, SV, SS) ottenendo i risultati riportati in forma analitica nella tabella B allegata, descritta nell'Appendice F.

A partire da queste stime di pericolosità, sono stati ottenuti i valori del numero di risentimenti attesi e della relativa deviazione standard. I risultati ottenuti sono mostrati nella tabella 6.

Metodo di stima	$\mu(M)$	$\sigma(M)$
Alla Cornell (AC)	41	6
Di sito Integrato (SI)	70	8
Di Sito Virtuale (SV)	68	8
Di Sito in Senso Stretto (SS)	33	5

Tabella 6. Valori attesi ($\mu(M)$) e deviazioni standard ($\sigma(M)$) del numero M dei comuni del Molise e della Calabria caratterizzati da almeno un risentimento non inferiore al grado VIII MCS in 20 anni ottenuti utilizzando le diverse metodologie di stima della pericolosità

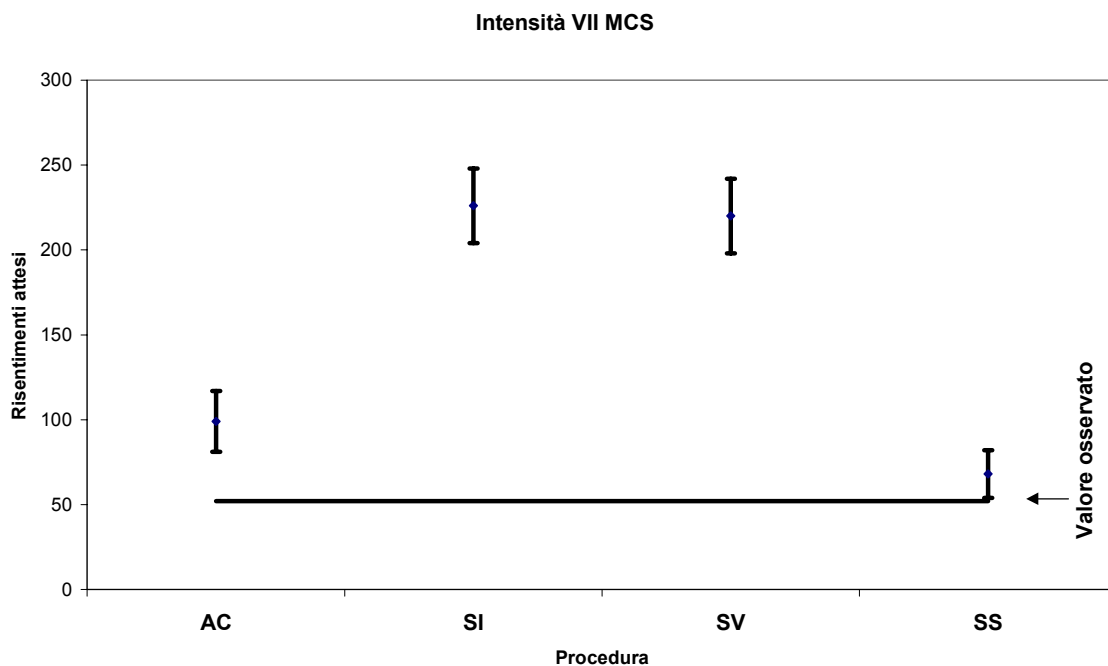


Figura 14. Valori attesi di M per le varie procedure e relativi intervalli di confidenza al 95%. La linea continua indica il valore di M osservato e relativo al periodo 1981-2000 e alla intensità VII

Come si vede dai risultati in tabella 6, anche in questo caso i valori attesi sovrastimano largamente il valore effettivamente osservato ($M=5$) con uno scarto ancora maggiore di quello ottenuto per l'intensità VII MCS. La figura 15 mostra gli intervalli di confidenza relativi alle diverse stime.

Nuovamente, nessuna delle metodologie utilizzate soddisfa la condizione [16] e pertanto nessuna di loro sembra fornire risultati compatibili con quelli osservati. Anche in questo caso, la procedura che fornisce i risultati meno "inesatti" (pur nella grande lontananza dai valori osservati) è quella rappresentata dall'approccio "di sito" applicato ai soli dati di risentimenti documentati.

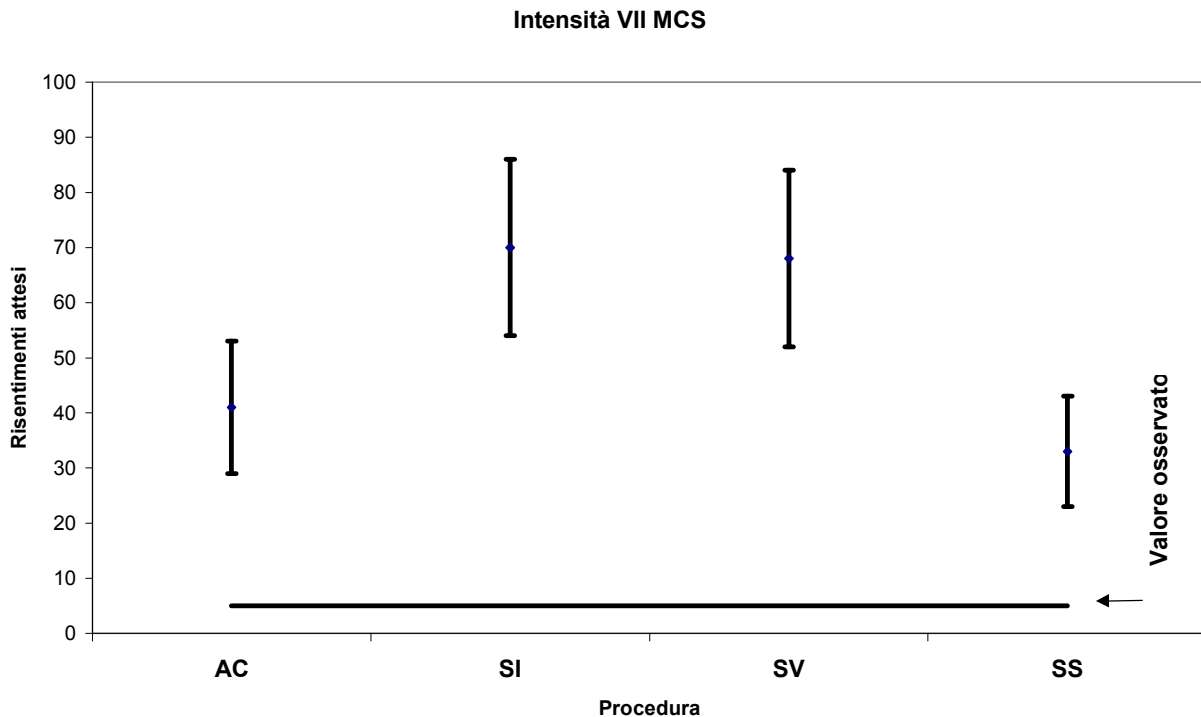


Figura 15 – Valori attesi di M per le varie procedure e relativi intervalli di confidenza al 95%. La linea continua indica il valore di M osservato e relativo al periodo 1981-2000 e alla intensità VIII

Per mettere in evidenza come per un intervallo più esteso temporalmente i risultati del test non cambino, si è utilizzato il test in modo “restrospettivo” considerando stime di pericolosità relative alle 546 località capoluogo del Molise e della Calabria per un intervallo di esposizione di 50 anni ed utilizzando per la validazione i risentimenti documentati durante il periodo 1931-1980.

<i>Metodo di stima</i>	$\mu(M)$	$\sigma(M)$
Alla Cornell (AC)	210	11
Di sito Integrato (SI)	419	10
Di Sito Virtuale (SV)	410	10
Di Sito in Senso Stretto (SS)	167	10

Tabella 7. Valori attesi ($\mu(M)$) e deviazioni standard ($\sigma(M)$) del numero M dei comuni del Molise e della Calabria caratterizzati da almeno un risentimento non inferiore al grado VII MCS in 50 anni ottenuti utilizzando le diverse metodologie di stima della pericolosità

I valori di pericolosità relativi alle singole località per le intensità di soglia VII e VIII sono riportati rispettivamente nelle tabelle C e D allegate, descritte nell’Appendice F. Le tabelle 7 e 8 mostrano i valori del numero di risentimenti attesi e relativa deviazione standard per le soglie di intensità VII e VIII MCS rispettivamente.

A fronte di questi valori, i dati disponibili (dedotti da Monachesi e Stucchi, 1997) indicano valori di M osservati assai inferiori: rispettivamente 108 e 22 per le intensità di soglia VII e VIII MCS. Come si vede anche in questo caso, le metodologie analizzate forniscono risultati non compatibili con le osservazioni sovrastimando sistematicamente il numero di siti interessati dai livelli di scuotimento considerati. Questi

risultati risultano ancora più sorprendenti di quelli ottenuti per il ventennio 1981-2000 dato che in questo caso i dati relativi al periodo di controllo sono gli stessi utilizzati per la parametrizzazione delle procedure esaminate.

<i>Metodo di stima</i>	$\mu(M)$	$\sigma(M)$
Alla Cornell (AC)	95	9
Di sito Integrato (SI)	176	10
Di Sito Virtuale (SV)	170	11
Di Sito in Senso Stretto (SS)	88	8

Tabella 8. Valori attesi ($\mu(M)$) e deviazioni standard ($\sigma(M)$) del numero M dei comuni del Molise e della Calabria caratterizzati da almeno un risentimento non inferiore al grado VIII MCS in 50 anni ottenuti utilizzando le diverse metodologie di stima della pericolosità

Per valutare la possibile presenza di non-stazionarietà nel livello di pericolosità sismica, l'analisi "retrospettiva" relativa al periodo di esposizione pari a 50 anni è stata ripetuta prendendo in esame il numero di località capoluogo comunale della Calabria effettivamente interessate da eventi dannosi durante il periodo di controllo 1871-1920: uno dei periodi sismici più attivi della recente storia sismica dell'area italiana.

A partire dai dati di risentimento contenuti nel catalogo DOM, il numero di località capoluogo della Calabria che nel cinquantennio considerato ha effettivamente risentito almeno una scossa con intensità pari almeno al grado VII MCS è stato pari a 347. Nello stesso periodo, le località capoluogo che hanno sperimentato almeno un evento sismico con intensità non inferiore a VIII sono state 216. Come si può dedurre dalle tabelle 9 e 10, in entrambi i casi il numero atteso di località risulta significativamente inferiore a quello effettivamente osservato.

Questo risultato contrasta nettamente con quanto ottenuto in precedenza nel confronto fra i dati di sismicità osservata nei periodi 1931-1980 e 1981-2000 e quanto previsto dalle valutazioni di pericolosità. In particolare, si ricorderà come in questi ultimi casi venisse riscontrata una costante sopravvalutazione del numero di località effettivamente interessate da eventi sismici.

<i>Metodo di stima</i>	$\mu(M)$	$\sigma(M)$
Alla Cornell (AC)	167	10
Di sito Integrato (SI)	31	8
Di Sito Virtuale (SV)	300	9
Di Sito in Senso Stretto (SS)	149	9

Tabella 9. Valori attesi ($\mu(M)$) e deviazioni standard ($\sigma(M)$) del numero M dei comuni del Molise e della Calabria caratterizzati da almeno un risentimento non inferiore al grado VII MCS in 50 anni ottenuti utilizzando le diverse metodologie di stima della pericolosità

<i>Metodo di stima</i>	$\mu(M)$	$\sigma(M)$
Alla Cornell (AC)	78	8
Di sito Integrato (SI)	142	9
Di Sito Virtuale (SV)	134	9
Di Sito in Senso Stretto (SS)	78	7

Tabella 10. Valori attesi ($\mu(M)$) e deviazioni standard ($\sigma(M)$) del numero M dei comuni del Molise e della Calabria caratterizzati da almeno un risentimento non inferiore al grado VIII MCS in 50 anni ottenuti utilizzando le diverse metodologie di stima della pericolosità



Università degli Studi di Siena
Dipartimento di Scienze della Terra

Presidenza del Consiglio dei Ministri
Servizio Sismico Nazionale

SERVIZIO
SISMICO
NAZIONALE



Discussione e conclusioni



E' stata proposta una nuova metodologia (approccio "di sito") per il calcolo della pericolosità sismica a partire da dati documentari. Le principali differenze tra questa nuova metodologia e quella "standard" risiedono nelle diverse modalità di trattamento delle incertezze sulle informazioni di base (dati di intensità, leggi di attenuazione) nel carattere non parametrico del modello di ricorrenza adottato e nel largo impiego di dati sugli effetti al sito di terremoti del passato. La metodologia proposta si è dimostrata effettivamente applicabile all'intero territorio nazionale. Sono state quindi formulate nuove stime di pericolosità per tutte località capoluogo comunale del territorio italiano. A partire dal nuovo approccio, sono possibili tre diverse stime di pericolosità ciascuna relativa ad un diverso utilizzo della banca dati disponibile. La prima è basata sul solo impiego delle storie sismiche documentate al sito, la seconda sul solo impiego dei dati epicentrali mentre la terza rappresenta un tentativo di integrazione tra le due basi dati.

In generale, le stime frutto dei soli effetti documentati sono quelle meglio vincolate alla base informativa effettivamente disponibile. Il limite principale di queste valutazioni è legato all'assunzione implicita che la mancanza di documentazione sugli effetti al sito di un dato terremoto sia equivalente alla effettiva mancanza di effetti sismici rilevanti. Data l'estrema eterogeneità e incompletezza del patrimonio documentario disponibile, questa assunzione è difficilmente sostenibile per la maggioranza delle località capoluogo comunale italiane. Il rischio principale di questo tipo di elaborazione sarebbe quello di fornire valori di pericolosità che in taluni casi possono rappresentare delle gravi sottovalutazioni.

All'estremo opposto stanno le stime effettuate a partire dalle sole storie sismiche "virtuali" definite a partire dai dati epicentrali mediante opportune leggi di attenuazione. Le stime di pericolosità fornite su questa base sono sostanzialmente rappresentative degli effetti della sorgente sismica. Le storie sismiche "virtuali", proprio perché frutto di valutazioni "indirette" dell'intensità del risentimento, sono caratterizzate da un elevato livello di incertezza. A causa delle specifiche proprietà statistiche della sismicità, queste incertezze tendono a produrre una tendenziale sopravvalutazione della pericolosità sismica, il che rappresenta il principale limite di queste stime. Naturalmente, per loro natura, un ulteriore importante limite di queste stime è legato alla totale insensibilità alla possibile presenza di effetti di amplificazione locale del moto del terreno (effetti di sito). In questo contesto, le valutazioni di pericolosità sismica dedotte dalle storie sismiche "integrate" (ottenute utilizzando dove possibile dati documentati e, in mancanza di questi, risentimenti "virtuali") possono rappresentare un utile compromesso.

Le stime effettuate sono del tutto equivalenti a quelle ottenute seguendo l'approccio "standard" e, sebbene provengano da analisi effettuate a partire dalla stessa base di dati, sono da considerarsi "alternative" a queste ultime.

Le valutazioni di pericolosità ottenute dall'approccio "di sito" si riferiscono a valori di scuotimento atteso espresso in termini di intensità. Questa può apparire una limitazione rispetto alle stime di tipo para-strumentale prodotte dall'approccio "standard". In realtà, le stime "di sito" appaiono più rappresentative della base informativa effettivamente disponibile che, anche per quanto riguarda le parametrizzazioni epicentrali, ha un carattere sostanzialmente macrosismico.

Per avere un'idea più precisa delle differenze fra le stime ottenute con la nuova metodologia "di sito" e quelle dedotte dall'approccio "standard" e chiarire le ragioni delle differenze osservate sono stati quindi analizzati nel dettaglio i risultati relativi a due situazioni regionali: quella del Molise e quella della Calabria. Dal confronto fra le stime condotte a partire dalla stessa base dati, sono emerse significative differenze che sembrano essenzialmente legate alle diverse modalità di trattamento delle incertezze relative alle informazioni disponibili e al diverso utilizzo delle informazioni macrosismiche al sito. In particolare, emergono due caratteristiche salienti:

le stime di pericolosità dedotte utilizzando l'approccio "di sito" risultano mediamente più elevate rispetto a quelle ottenute mediante l'approccio "standard";



rispetto all'approccio "standard", l'approccio "di sito" suggerisce la presenza di un maggior livello di eterogeneità laterale nella distribuzione geografica dei valori di pericolosità sismica.

Le prove effettuate utilizzando in modo differente la base informativa disponibile, suggeriscono che il primo effetto potrebbe essere attribuito alla diversa gestione delle incertezze riguardanti i dati di base. In particolare, queste ultime vengono del tutto ignorate nell'approccio "standard" mentre costituiscono un elemento di rilievo nell'approccio "di sito". Di fatto, la considerazione delle incertezze sui dati di base produce stime di pericolosità relativamente più conservative, come se la coscienza dei limiti della base informativa non consentisse di "escludere" la possibilità di danni maggiori di quelli prevedibili nel caso in cui questi limiti non esistessero.

La seconda caratteristica sembra invece attribuibile al diverso ruolo giocato nei due approcci dalle informazioni macrosismiche al sito. In effetti, nell'approccio "standard" i dati locali sono semplicemente ignorati e tutta la pericolosità viene attribuita alle modalità di rilascio di energia da parte delle sorgenti sismogeniche. Nell'approccio "di sito", invece, sono le informazioni disponibili localmente a costituire l'elemento informativo di base che include sia fattori legati alla sorgente che condizioni locali capaci di modificare significativamente il livello di pericolosità sismica.

A fronte delle differenze osservate fra i risultati ottenuti seguendo le diverse procedure o utilizzando diversamente la stessa banca dati, si è posto quindi il problema di individuare la stima di pericolosità ritenuta "più attendibile" o, perlomeno, di fornire una valutazione relativa dell'attendibilità delle diverse stime finalizzata alla definizione di una stima di pericolosità combinata nell'ambito di una procedura di tipo Bayesiano. A questo scopo è stata definita una procedura formalizzata per la valutazione su base statistica della validità delle stime di pericolosità fornite dalle diverse metodologie, a partire dal confronto fra i valori ottenuti e la sismicità effettivamente osservata in un periodo di controllo.

Le analisi effettuate utilizzando questa procedura hanno mostrato come le valutazioni fornite da tutte le metodologie considerate a partire dai dati di catalogo del periodo 1000-1980 appaiano sovrastimare la sismicità osservata nell'ultimo periodo (almeno dal 1931 al 2000). Questo vale sia nell'applicazione "retrospettiva" (ovvero considerando come periodo di controllo il cinquantennio 1931-1980), che nell'applicazione "predittiva" (ovvero considerando come periodo di controllo il ventennio 1981-2000). D'altro canto, si vede come le valutazioni ottenute sottostimino sistematicamente la sismicità osservata tra la fine dell'Ottocento e i primi venti anni del Novecento (1871-1920). Ciò vale sia per la soglia di intensità attesa pari a VII MCS che per quella relativa all'VIII grado MCS. Questo risultato implica la sostanziale inadeguatezza delle metodologie disponibili sia per quanto riguarda i periodi di "bassa" sismicità come quello più recente, sia quelli di "alta" sismicità quale quello attorno all'inizio del XX secolo.

Inoltre si vede come la quantità di informazioni implementate nella procedura non influenza la correttezza dei risultati. Infatti, almeno per quanto riguarda il confronto con la sismicità più recente, le stime più vicine a quanto osservato non sono quelle ottenute utilizzando l'approccio "alla Cornell", che è quello caratterizzato da un maggior contenuto informativo (zone sismogeniche, leggi di attenuazione differenziate, ecc.), ma piuttosto quelle ottenute utilizzando il dato più "povero" ovvero i soli risentimenti al sito.

Naturalmente, l'importanza di questo risultato, che getta un'ombra su tutti gli sforzi effettuati finora per la definizione della pericolosità sismica, richiede una discussione approfondita del protocollo di validazione proposto. Una prima obiezione a quest'ultimo, potrebbe essere basata sul fatto che le "previsioni" fornite da una procedura di calcolo "time-independent" (come per esempio quella implementata dal codice di calcolo SEISRISK III) non si riferiscono a nessuno specifico intervallo di esposizione e quindi non possono essere applicate ad uno specifico intervallo di esposizione Δt^* (per esempio il periodo 1981-2000) utilizzato per la validazione



della procedura. In realtà, l'indipendenza dalla specifica scelta dell'intervallo di previsione giustifica la scelta di un qualunque intervallo di lunghezza Δt per la validazione: infatti se la previsione vale per tutti gli intervalli, a maggior ragione vale per ciascuno di essi e quindi anche per quello prescelto. Il vero punto critico sta nella scelta "casuale" di quest'ultimo ovvero in una scelta non condizionata dalla sismicità contenuta in Δt^* .

Un'altra obiezione potrebbe riguardare la possibilità di utilizzare intervalli di controllo Δt^* dell'ordine di qualche decina di anni per la validazione di una procedura di calcolo (quale quella implementata in SEISRISK III) che stima delle intensità attese relative a periodi di ritorno dell'ordine delle centinaia di anni (tipicamente 475 anni). In realtà queste ultime equivalgono (e solo per questo hanno validità pratica) a stime di probabilità di non eccedenza per periodi assai più corti (dell'ordine delle decine di anni) e come tali possono (anzi devono) essere confrontate con quanto avviene nel breve periodo.

L'analisi effettuata riguarda solo due aree campione (Molise e Calabria) che, per quanto importanti, non rappresentano l'intero territorio nazionale. Si potrebbe quindi avanzare il dubbio che le difficoltà mostrate dai metodi di stima della pericolosità nel riprodurre la sismicità osservata riguardino queste due sole regioni. Si deve tuttavia osservare che analoghi risultati sono stati ottenuti considerando tutte le località capoluogo provinciale italiane (Albarello e D'Amico, 2000), ovvero un campione meno numeroso ma esteso a tutto il territorio nazionale. Sembra dunque possibile aspettarsi che una analisi quale quella qui proposta ed estesa a tutto il territorio nazionale non conduca a risultati significativamente differenti da quelli ottenuti in questa sede. Inoltre, i risultati ottenuti, per quanto sorprendenti, appaiono comunque in linea con quanto va emergendo con sempre maggiore insistenza nella letteratura nazionale e internazionale. In particolare diversi lavori mettono in evidenza discrepanze sempre più marcate fra i tassi di sismicità documentati su base storica e quelli dedotti dalle diverse procedure più o meno avanzate per la stima della pericolosità (p.es. Mucciarelli et al., 2000; Petersen et al., 2000; Stucchi e Rebez, 2000).

Sulla base di quanto ottenuto non risulta comunque semplice tentare una diagnosi circa la possibile causa della discrepanza osservata fra la sismicità attesa e quella osservata. Un indizio utile potrebbe venire dal fatto che le stime "meno errate", almeno per quanto riguarda l'approccio "predittivo", sono quelle fornite utilizzando l'approccio "di sito" a partire dai soli dati di risentimento documentato. Questo risultato sembra paradossale visti i molti limiti di questo approccio (per esempio l'assunzione che l'assenza di informazioni implichi l'assenza di effetti). Il fatto che questo approccio fornisca stime migliori di quelle ottenute utilizzando per le stime anche i valori epicentrali induce a dubitare della qualità delle relazioni di attenuazione utilizzate, sia quelle in forma probabilistica (approcci "di sito integrato" e "di sito virtuale") che quelle in forma semi-deterministica (approccio "alla Cornell").

Un altro elemento utile potrebbe venire dalla considerazione che tutte le metodologie esaminate partono dall'ipotesi che il processo sismogenico possa essere considerato un fenomeno stazionario alla scala dei tempi analizzata (100-1000 anni). In realtà questa assunzione è ben lungi dall'essere indiscutibile. Per esempio, alcuni risultati ottenuti su scala mondiale (p.es., Kagan e Jackson, 1991) hanno messo in evidenza una tendenza alla concentrazione degli eventi sismici principali in periodi attivi separati da quiescenze relativamente lunghe. Queste variazioni "a lungo termine" del tasso di sismicità potrebbero trovare una spiegazione fisicamente plausibile nel carattere "critico" del processo sismogenico. La presenza di una simile tendenza anche per eventi di magnitudo medio-bassa quali quelli che caratterizzano il territorio italiano potrebbe spiegare l'insuccesso delle procedure di stima della pericolosità attualmente disponibili.



Università degli Studi di Siena
Dipartimento di Scienze della Terra

Presidenza del Consiglio dei Ministri
Servizio Sismico Nazionale

SERVIZIO
SISMICO
NAZIONALE



Bibliografia



- Romeo R. e Pugliese A., 2000. Seismicity, seismotectonics and seismic hazard of Italy, *Eng. Geol.*, 55, 4, 241-266.
- Rotondi R. e Pagliano P., 1993. The problem of completeness of a seismic catalog: a change-point problem. *Proc. 2nd workshop of Statistical Models and Methods: Application on the prevention and Forecasting of earthquakes. Cephalonia, Greece*, 170-182
- Rotondi R., Meroni F. e Zonno G. , 1994. A different Intensity recording for reducing the uncertainty in its assessment: an application to the completeness analysis of earthquake catalogs. *Nat. Haz.*, 10, 45-58
- Scandone P., 1997. Linea di Ricerca 2 "Sismotettonica" in L'attività del GNDT nel Triennio 1993-1995, edito da A. Corsanego, E. Faccioli, C. Gavarini, P. Scandone, D. Slejko and M. Stucchi (CNR-GNDT, Roma), 67-96.
- Scozzafava R., 1997. Probabilità soggettiva. *Masson ed.*, Milano, 219 pp.
- Slejko D., Peruzza L. e Rebez A., 1998. Seismic hazard maps of Italy. *Ann.Geofis.*, 41, 2, 183-214
- Stepp, J.C., 1971. An investigation of earthquake risk in the Puget Sound area by the use of the type I distribution of largest extreme, *Ph.D. Thesis, Pennsylvania State University*, pp. 131.
- Stucchi M. e Rebez A., 2000. Il ruolo delle stime di completezza nella valutazione della pericolosità sismica. *XIX Convegno Nazionale GNGTS, Roma, Novembre 2000*
- Tinti, S. e Mulargia, F., 1985a. Completeness analysis of a seismic catalogue, *Ann. Geophys.*, 3, 407-414.
- Tinti, S. e Mulargia, F., 1985b. An improved method for the analysis of the completeness of a seismic catalogue, *Lett. Nuovo Cimento*, 42, 21-27.
- Working Group Parametric Catalog of Italian Earthquakes, 1999. *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, ING, GNDT, SGA, SSN, Bologna, 92 pp. InterNet: <http://emidius.itim.mi.cnr.it/CPTI/home.html>*



Università degli Studi di Siena
Dipartimento di Scienze della Terra

Presidenza del Consiglio dei Ministri
Servizio Sismico Nazionale



APPENDICI

Appendice A

Parametri utilizzati per la relazione di attenuazione probabilistica

Stima dei valori relativi ai parametri della funzione probabilistica R (eq.[2]). I_s è la minima intensità attesa al sito in corrispondenza delle diverse classi di intensità epicentrale I_e . Sono stati presi in considerazione solo terremoti con intensità epicentrale $>V$ MCS. Per ciascun valore di I_e e I_s , sono riportati i valori dei parametri a e b assieme al relativo intervallo di confidenza al 95% (fra parentesi); n è il numero di dati considerati per l'analisi di regressione corrispondente.

	$I_s \geq XI$	$I_s \geq X$	$I_s \geq IX$	$I_s \geq VIII$	$I_s \geq VII$	$I_s \geq VI$	
$I_e = XI$	a	2.2 (0.2)	5.4 (0.3)	7.5 (0.4)	9.6 (0.4)	12.8 (0.6)	13.4 (0.7)
	b	-1.9 (0.1)	-2.2 (0.1)	-2.5 (0.1)	-2.6 (0.1)	-2.9 (0.1)	-2.7 (0.1)
	n	77	334	690	1462	2406	2852
$I_e = X$	a	0.5 (0.2)	2.5 (0.2)	5.0 (0.2)	8.4 (0.4)	11.5 (0.5)	
	b	-1.3 (0.1)	-1.4 (0.1)	-1.8 (0.1)	-2.3 (0.1)	-2.6 (0.1)	
	n	128	437	898	1624	2731	
$I_e = IX$	a	1.1 (0.2)	3.3 (0.2)	5.4 (0.3)	8.1 (0.4)		
	b	-1.7 (0.1)	-1.7 (0.1)	-1.7 (0.1)	-2.1 (0.1)		
	n	123	500	1323	1962		
$I_e = VIII$	a	1.2 (0.2)	3.1 (0.2)	5.6 (0.3)			
	b	-1.3 (0.1)	-1.3 (0.1)	-1.7 (0.1)			
	n	243	826	1418			
$I_e = VII$	a	2.0 (0.2)	3.8 (0.2)				
	b	-1.6 (0.1)	-1.6 (0.1)				
	n	348	862				
$I_e = VI$	a	2.2 (0.2)					
	b	-1.5 (0.1)					
	n	251					

Appendice B

Calcolo della funzione di completezza

La stima di completezza è effettuata assumendo che: *i)* il processo sismogenico è stazionario; *ii)* attualmente (T_f) il catalogo disponibile è completo; *iii)* il livello di incompletezza cresce monotonamente all'indietro nel tempo. Per ciascuna possibile data di inizio del catalogo (T_s) viene calcolata la probabilità che il catalogo sia completo nell'intervallo temporale $\Delta T_i = [T_s, T_f]$ (cioè che il tasso di sismicità sia effettivamente stazionario nell'intervallo di tempo considerato). A questo scopo, questo intervallo è diviso in M sotto intervalli non sovrapposti di uguale lunghezza δt ; a partire dalle informazioni disponibili sulla storia sismica locale, per ciascuno di questi intervalli viene calcolato il numero atteso n_j di eventi risentiti al sito con intensità almeno pari a I_s utilizzando l'equazione

$$n_j = \sum_{i=1}^{H_j} P_n(I_s) \quad [B1]$$

(Magri et al., 1994), dove H_j è il numero totale di eventi avvenuti nell'intervallo δt_j e $P_n(I_s)$ è la probabilità che l' n -mo evento sia stato effettivamente risentito con intensità almeno pari a I_s .

Il catalogo viene diviso in due parti di lunghezza uguale, ciascuno contenente $M/2$ sotto intervalli. Si definisce quindi una variabile casuale k_j tale per cui $k_j=1$ se $n_j > n_{j+M/2}$ e $k_j=0$ negli altri casi; se $M=(T_f - T_s)/\delta t$, ci saranno $M/2$ valori della variabile nell'intervallo considerato. Sia K il numero di risultati tali per cui sperimentalmente si ha $k_j=1$. In linea di principio, in caso di stazionarietà del processo sismogenico, le probabilità di avere in ciascun caso $k_j=1$ o $k_j=0$ dovrebbero essere uguali e pari a 0.5. Utilizzando la distribuzione binomiale è possibile calcolare la probabilità $q(\Delta T_i)$ che, nell'ipotesi di stazionarietà relativa all'intervallo ΔT_i , risultino almeno K valori per i quali $k_j=1$. Sulla base dei valori $q(\Delta T_i)$ ottenuti per gli L possibili intervalli temporali ΔT_i (ciascuno corrispondente a una diversa scelta di T_s), è possibile calcolare una funzione di completezza $r(\Delta T_i)$ (cioè una funzione che rappresenti la probabilità che uno specifico intervallo ΔT_i sia completo) nella forma

$$r(\Delta T_i) = \frac{q(\Delta T_i)}{\sum_{i=1}^L q(\Delta T_i)} \quad [B2]$$



Appendice C

Effetto dell'incertezza nell'attribuzione del grado di intensità sul tasso di sismicità

Per mostrare come l'incertezza relativa all'attribuzione del grado di intensità possa produrre un aumento del tasso di sismicità apparente può essere considerato il semplice caso in cui esistano solo tre classi contigue di intensità: I , $I-1$, $I+1$. n_I , n_{I-1} , n_{I+1} rappresentano rispettivamente il numero di eventi in ciascuna classe nel caso in cui non esistano incertezze nell'attribuzione dell'intensità a ciascun evento. In generale è realistico assumere che

$$\begin{cases} n_I \cong 10^{-b} n_{I-1} \\ n_I \cong 10^b n_{I+1} \end{cases} \quad [C1]$$

(ovvero valga una sorte di distribuzione Gutenberg-Richter per la distribuzione in frequenza dei terremoti in funzione della relativa intensità) con $b \cong 1$.

In caso di incertezza nell'attribuzione del livello di intensità, esisterà una probabilità p_1 che l'intensità "apparente" I^* sia effettivamente uguale all'intensità "vera" I . Inoltre esisterà anche una probabilità p_2 che $I^*=I-1$ ed una probabilità p_3 che $I^*=I+1$. In questo caso, il numero "apparente" n_I di eventi in classe I sarà dato dall'attesa matematica $\langle n_I \rangle$ che risulta

$$\langle n_I \rangle = p_1 n_I + p_2 n_{I-1} + p_3 n_{I+1} \quad [C2]$$

Tuttavia, a causa della [C1], si ha che

$$\langle n_I \rangle \cong p_1 n_I + p_2 10 n_I + p_3 10^{-1} n_I \cong 10 p_2 n_I \quad [C3]$$

Pertanto, nel caso in cui $p_2 \geq 0.1$, l'effetto dell'incertezza è quello di incrementare il tasso di sismicità apparente $\langle n_I \rangle$ rispetto a quello che risulterebbe nel caso in cui non esistessero incertezze nell'attribuzione del grado di intensità.



Appendice D

Risultati delle analisi di pericolosità relative alle due regioni campione (Molise e Calabria)

Si allega, in forma digitale (Allegato_D), un file in formato Excel contenente le stime di pericolosità ottenute per le località capoluogo comunale e per alcune località minori del Molise e della Calabria. Il file contiene due tabelle (“MOLISE” e “CALABRIA”), rispettivamente relative ai risultati ottenuti per il Molise e per la Calabria.

Ciascuna tabella riporta, nei primi 4 campi, il codice della località (presente nell’archivio macrosismico DOM4.1 e qui posto uguale a zero nel caso di capoluoghi comunali privi di risentimenti documentati), la sua denominazione e le sue coordinate (Latitudine Nord e Longitudine Est). I campi seguenti contengono le stime di pericolosità ottenute mediante l’approccio “di sito”, rispettivamente a partire dai soli risentimenti “virtuali”, dai soli risentimenti documentati (soltanto per le località con almeno 5 risentimenti maggiori del V grado MCS) e dall’integrazione dei due, e mediante l’approccio “standard” (soltanto per le località capoluogo comunale). Per ciascuna procedura di calcolo sono riportate le probabilità di occorrenza di almeno una scossa in 50 anni con intensità al sito rispettivamente non inferiore al grado VI, VII, VIII, IX, X e XI della scala MCS (per le stime ottenute mediante l’approccio “standard”, sono disponibili soltanto le stime dal VII al IX grado MCS) e l’intensità attesa.



Appendice E

Risultati delle analisi di pericolosità relative alle località capoluogo comunale italiane

Si allega, in forma digitale, (Allegato_E) un file in formato Excel contenente le stime di pericolosità effettuate per tutte le località capoluogo comunale del territorio italiano. Il file contiene tre tabelle, ciascuna relativa ad una diversa modalità per la ricostruzione della storia sismica di sito. In particolare, la tabella “HAZ_ATT” si riferisce alle stime di pericolosità ottenute a partire dalle sole storie sismiche “virtuali”, la tabella “HAZ_RIS” alle stime effettuate a partire dai soli dati documentati (hanno pericolosità nulla tutte le località per le quali non si ha notizia di effetti sismici superiori al V grado MCS) e la tabella “HAZ_COMB” alle stime ottenute a partire da storie sismiche risultanti da una combinazione di risentimenti documentati e “virtuali”.

Ciascun record delle tre tabelle riporta le stime di pericolosità relative a una località capoluogo comunale (disposte in ordine alfabetico) e contiene 11 campi. I primi 4 campi contengono rispettivamente il codice ISTAT della località, la sua denominazione e le sue coordinate (Latitudine Nord e Longitudine Est in gradi e decimillesimi di grado). I seguenti sei campi contengono le probabilità di occorrenza di almeno una scossa in 50 anni con intensità al sito rispettivamente non inferiore al grado VI, VII, VIII, IX, X e XI della scala MCS. L'ultimo campo si riferisce all'intensità attesa MCS. Nelle tabelle “HAZ_RIS” e “HAZ_COMB” è stato inoltre aggiunto un campo con il numero di risentimenti (rispettivamente >V MCS e complessivo) relativi al comune considerato.



Appendice F

Risultati delle analisi di validazione delle stime di pericolosità sismica relativamente ai capoluoghi comunali del Molise e della Calabria

Si allega, in forma digitale (Allegato_F), un file in formato Excel contenente i dati di pericolosità relativi alle località capoluogo comunale del Molise e della Calabria ottenuti utilizzando le diverse metodologie di calcolo descritte nel testo. Il file contiene quattro tabelle.

Ciascuna tabella riporta per ogni località capoluogo comunale del Molise e della Calabria (elencate in ordine alfabetico per ciascuna Regione): le coordinate (Latitudine Nord e Longitudine Est in gradi e decimillesimi di grado) e i valori di pericolosità (probabilità di occorrenza di almeno un evento durante il periodo di esposizione con intensità al sito non inferiore all'intensità di soglia) ottenuti mediante l'approccio "di sito", rispettivamente a partire dai soli dati epicentrali (SV), dai dati di risentimento locale integrati da dati epicentrali (SI) e dai soli dati documentati al sito (SS), e mediante l'approccio "alla Cornell" (AC). L'ultima colonna riporta la presenza ("SI") o assenza ("NO") nella località considerata di almeno un risentimento non inferiore all'intensità di soglia durante il periodo di controllo.

La "TABELLA A" riporta le stime di pericolosità ottenute per un periodo di esposizione di 20 anni ed una intensità di soglia pari al grado VII MCS. L'ultima colonna riporta indicazioni circa la presenza nella località considerata di almeno un risentimento non inferiore al grado VII MCS nel periodo di controllo 1981-2000.

La "TABELLA B" riporta le stime di pericolosità ottenute per un periodo di esposizione di 20 anni ed una intensità di soglia pari al grado VIII MCS. L'ultima colonna riporta indicazioni circa la presenza nella località considerata di almeno un risentimento non inferiore al grado VIII MCS nel periodo di controllo 1981-2000.

La "TABELLA C" riporta le stime di pericolosità ottenute per un periodo di esposizione di 50 anni ed una intensità di soglia pari al grado VII MCS. L'ultima colonna riporta indicazioni circa la presenza nella località considerata di almeno un risentimento non inferiore al grado VII MCS nel periodo di controllo 1931-1980.

La "TABELLA D" riporta le stime di pericolosità ottenute per un periodo di esposizione di 50 anni ed una intensità di soglia pari al grado VIII MCS. L'ultima colonna riporta indicazioni circa la presenza nella località considerata di almeno un risentimento non inferiore al grado VIII MCS nel periodo di controllo 1931-1980.