

Prot. n. 26.U. del 06/10/2015



Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare  
Direzione generale per le valutazioni ambientali  
Divisione II - Sistemi di Valutazione Ambientale

Via Cristoforo Colombo, 44

00147 Roma

Fax 06/57225994

[dgsalvanguardia.ambientale@pec.miniambiente.it](mailto:dgsalvanguardia.ambientale@pec.miniambiente.it)

Spett.le

Spett.le ARPA Umbria

Via Pievaiole 207/B-3

06132 – Perugia

[protocollo@cert.arpa.umbria.it](mailto:protocollo@cert.arpa.umbria.it)

Spett.le ARPA Lazio

Via Boncompagni, 101

00187 – Roma

[direzione.gen.rm@arpalazio.it](mailto:direzione.gen.rm@arpalazio.it)

**OGGETTO: Istanza per l'avvio della procedura di verifica di ottemperanza alle prescrizioni A.1 c), A.1 d), A.1 e)**

**contenute nel provvedimento di VIA n. 0000059 del 3 aprile 2015, ai sensi dell'art.28 del D.Lgs.152/2006 e s.m.i., relativa al progetto geotermico pilota Castel Giorgio**

Il sottoscritto

*Giorgio Garrone*

in qualità di legale rappresentante dell'Ente/Società

*ITW&LKW Geotermia Italia spa*

con sede legale in:

*TORINO, P.zza Statuto, 16 - telefono 06.42020461, fax 06.48905185,  
indirizzo di posta elettronica certificata: [itwgeotermiaitalia@legalmail.it](mailto:itwgeotermiaitalia@legalmail.it)*

richiede l'avvio della procedura in oggetto relativamente alle seguenti prescrizioni contenute nel provvedimento di VIA n.0000059 del 3 aprile 2015, la cui verifica è posta a carico di codesta Amministrazione:

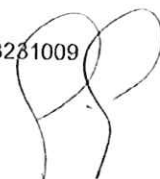
| Prescrizione n. | Testo integrale della prescrizione come riportato nel provvedimento di VIA  |
|-----------------|---|
| A.1 c)          | Realizzare la rete di monitoraggio microsismico, in grado di determinare la massima accelerazione del suolo provocata da un sisma di Magnitudo inferiore ad almeno 0.5 in un raggio di almeno 5 km dall'impianto. Per raggiungere questa sensibilità il proponente dovrà ricorrere, se necessario, a stazioni sismiche poste in pozzi geognostici profondi. A tale rete dovrà essere associato un sistema di riconoscimento dell'ipocentro degli eventi, anche tramite "forme d'onda", che dovrà consentire, quando l'impianto dovesse entrare in esercizio, una valutazione in tempo breve degli ipocentri e valutare se l'eventuale sismicità rilevata sia riconducibile oppure no alle attività dell'impianto. La validazione delle rete dovrà essere fatta da ARPA Umbria ed inviata al Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. |
| A.1 d)          | Con la rete microsismica descritta si dovrà eseguire un monitoraggio sismico della durata di almeno 1 anno consecutivo, prima dell'avvio delle attività, al fine di determinare la condizione di micro sismicità ante-operam. I risultati del monitoraggio dovranno essere presentati ARPA Umbria, ARPA Lazio ed inviata al Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare.   |
| A.1 e)          | Si dovrà concordare con ARPA Umbria un piano in cui si definisce:<br>- una soglia di sismicità anomala relativa ai parametri di frequenza degli eventi, magnitudo, profondità e coordinate epicentrali, misurati dalla rete realizzata dal Proponente.<br>- un programma di riduzione ed eventualmente di sospensione dell'attività sino all'esaurimento della crisi microsismica rilevata.   |

Si trasmettono in allegato alla presente:

- 1) Risposta A.1c), d), e), 23.09.15;
- 2) All. 1\_Linee Guida\_MISE;
- 3) All. 2\_Sismicità indotta;
- 4) All. 3\_Sismicità Storica recente.

La documentazione trasmessa è composta di 3 copie in formato digitale predisposte conformemente alle "Specifiche tecniche per la predisposizione e la trasmissione della documentazione in formato digitale per le procedure di VAS e VIA ai sensi del D.Lgs 152/2006 e s.m.i." del Ministero dell'Ambiente e della tutela del territorio e del mare per un totale di n. 3 supporto/i informatico/i e di 1 copia in formato cartaceo.

ITW LKW GEOTERMIA ITALIA s.p.a. Sede Legale Piazza Statuto, 16 - 10122 Torino P.IVA 11173231009  
Capitale Sociale EURO 1.000.000,00 I.v. Numero REA: TO- 1144269  
Sede amministrativa - Via di Porta Pinciana n. 4 00187 Roma -  
Tel +39 06 42020461 Fax +39 06 48905185 E-mail - info@itwkwgeotermia.it



Il sottoscritto è consapevole che il Ministero dell'Ambiente e della tutela del territorio e del mare pubblicherà sul portale delle Valutazioni ambientali VAS-VIA ([www.va.minambiente.it](http://www.va.minambiente.it)) la documentazione trasmessa con la presente.

**ITW & LKW**  
**Geotermia Italia S.p.A.**  
Il Presidente  
Dot. Giorgio GARRONE



*Riferimenti per contatti:*

Nome e Cognome: Dr. Diego Righini

Telefono: 3927035794 – 06.42020461 Fax 06.48905185

E-mail: [righini@itwlkwgeotermia.it](mailto:righini@itwlkwgeotermia.it)



Allegato all'istanza  
di verifica ottemperanza A.1) c-d-e



## IMPIANTO PILOTA GEOTERMICO CASTEL GIORGIO

**Prescrizioni VIA A.1 lettere A.1. c), A.1. d), A.1. e)**

### **Rete di monitoraggio microsismico**

Con provvedimento del Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM), di concerto con il Ministro dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo, registrazione 59 del 3 aprile 2015, è stato approvato, con prescrizioni, il decreto di compatibilità ambientale relativo all'impianto geotermico in oggetto.

Una delle prescrizioni (A.1. c) prevede la realizzazione di una rete di monitoraggio microsismico e stabilisce che la validazione della rete dovrà essere fatta da ARPA Umbria. Un'altra prescrizione (A.1. d) stabilisce che con la rete microsismica si dovrà eseguire un monitoraggio della durata di almeno 1 anno consecutivo prima dell'avvio delle attività, i cui risultati dovranno essere presentati a ARPA-Umbria e ARPA-Lazio. Infine, una terza prescrizione (A.1. e) stabilisce che si dovrà concordare con l'ARPA-Umbria, che dovrà validarlo, un piano in cui si definisce una soglia di sismicità anomala e un programma di riduzione e eventualmente di sospensione dell'attività.

Le suddette prescrizioni sono state formulate dalla Commissione Tecnica di Verifica dell'Impatto Ambientale – VIA e VAS del MATTM, nel parere n° 1641 del 31/10/2014, allegato al suddetto decreto. Successivamente alla formulazione di questo parere, il Ministero dello Sviluppo Economico (MISE) ha pubblicato nel proprio sito web un documento intitolato “Indirizzi e Linee Guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche”, che è riprodotto nell'allegato 1, così come estratto dal sito web del MISE il 24 novembre 2014. Questi indirizzi e linee guida

ITW LKW GEOTERMIA ITALIA s.p.a. Sede Legale Piazza Statuto, 16 -10122 Torino P.IVA 11173231009 1  
Capitale Sociale EURO 1.000.000,00 I.v. Numero REA: TO- 1144269  
Sede amministrativa - Via di Porta Pinciana n. 4 00187 Roma -  
Tel +39 06 42020461 Fax +39 06 48905185 E-mail – info@itwkwgeotermia.it

si riferiscono soprattutto al monitoraggio delle attività di estrazione, reiniezione e stoccaggio di idrocarburi, ma sono applicabili anche alla produzione di energia geotermica e relative attività minerarie.

Considerato che il MISE è l'autorità competente sia al rilascio di permessi, concessioni e autorizzazioni, sia alla vigilanza in materia di ricerca, produzione e reiniezione di fluidi geotermici, considerato altresì che il citato documento MISE del novembre 2014 (al quale si farà riferimento nel seguito come "Linee Guida MISE") ricomprende totalmente le prescrizioni della Commissione VIA, con indirizzi più specifici e precisi e contiene anche la risposta A.I. e) sopra indicata, relativa alla soglia di sismicità anomala e alla relativa riduzione/sospensione dell'attività mineraria, si ritiene che la realizzazione e gestione della rete di monitoraggio microsismico dell'impianto pilota geotermico Castel Giorgio debba essere conforme alle Linee Guida MISE.

Ciò premesso, si informa che il problema dell'eventuale microsismicità indotta o innescata dallo sfruttamento del campo geotermico di Torre Alfina, di cui il progetto Castel Giorgio rappresenta la parte posta nella regione Umbria, è stato da tempo affrontato dalla scrivente Società proponente il progetto.

In particolare è stato prodotto e consegnato al MATTM il rapporto tecnico intitolato "Sismicità indotta o innescata", riprodotto nell'allegato 2. In questo rapporto vengono fornite informazioni relative:

- alla fisica del processo e relative equazioni matematiche
- alla sismicità indotta nei campi geotermici toscani, gli unici in esercizio in Italia
- alla sismicità indotta nei campi geotermici di Latera e Torre Alfina dalle operazioni di estrazione e reiniezione dei fluidi eseguite da Enel negli anni '70 e '80
- al problema della sismicità indotta da iniezione di fluidi in campi geotermici a livello mondiale.

Un altro rapporto, prodotto per conto della scrivente società da INGV – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, tratta della "Sismicità storica e recente dell'area geotermica di Torre Alfina" (vedi allegato 3) e riporta tutte le informazioni scientifiche note sulla sismicità dell'area.

Infine, ben prima della pubblicazione delle prescrizioni VIA e delle Linee Guida MISE, si è provveduto alla messa in opera di una prima rete di monitoraggio microsismico, come di seguito descritto.

## **Monitoraggio sismico**

Lo scopo principale del monitoraggio sismico da realizzare nell'area dove sorgeranno gli impianti geotermici pilota di Castel Giorgio e di Torre Alfina (il cui SIA sarà tra breve presentato al MATTM) è il controllo dell'eventuale sismicità indotta o innescata dalle operazioni di reiniezione. Per ciascuno dei progetti Castel Giorgio e Torre Alfina sono previsti quattro pozzi reiniettori, uno verticale e tre deviati, perforati tutti dalla stessa piattaforma, denominata rispettivamente polo di reiniezione CG14 e AP4. La profondità prevista è di 2.300 m verticali per i pozzi CG14 e di 1.500 m verticali per i pozzi AP4, con scostamento dalla verticale dei pozzi deviati rispettivamente di 950 m e di 400 m, a fondo pozzo.

Il modello sismico ricavato da un profilo di sismica a rifrazione attraverso il campo geotermico di Torre Alfina è caratterizzato da velocità delle onde compressionali relativamente elevate (4,1-4,5 km/s) in un livello superficiale costituito dalle rocce vulcaniche e dalle formazioni flyschoidi (il metodo usato non consente di discriminare tra i due livelli). Nel livello successivo, corrispondente principalmente alle rocce carbonatiche del serbatoio geotermico, la velocità cresce a valori di 5,4-5,6 km/s e infine sale ulteriormente a 6,8-7,1 km/s nel sottostante livello costituito probabilmente da rocce metamorfiche, il cui top è intorno a 5 km di profondità (mai raggiunto dalle perforazioni). Nella zona è stato perforato da Enel nel 1987 un pozzo molto profondo (A15, prof. 4.826 m) che ha incontrato, al di sotto del flysch ligure, tre scaglie tettoniche sovrapposte di rocce carbonatiche a serie Toscana non metamorfiche che a loro volta ricoprono rocce carbonatiche a facies Umbra, dimostrando che il serbatoio geotermico della zona ha uno spessore notevole (almeno 3.700 m). Un log sismico nel pozzo ha trovato una velocità circa costante intorno a 6-6,1 km/s nelle rocce carbonatiche, con valori che scendono a 5-5,5 km/s nelle intercalazioni marnose o dei cosiddetti "scisti policromi" (velocità più elevata di quella trovata nel profilo sismico prima citato).

## **La rete di monitoraggio microsismico**

Nel raggio di circa 20 km dai limiti del permesso di ricerca geotermico Castel Giorgio-Torre Alfina, si trovano quattro stazioni sismiche appartenenti alla rete nazionale permanente

dell'INGV (LATE, MCIV, SACS, MGAB) e una gestita dalla Regione Umbria (Castel Viscardo) (Fig. 1).

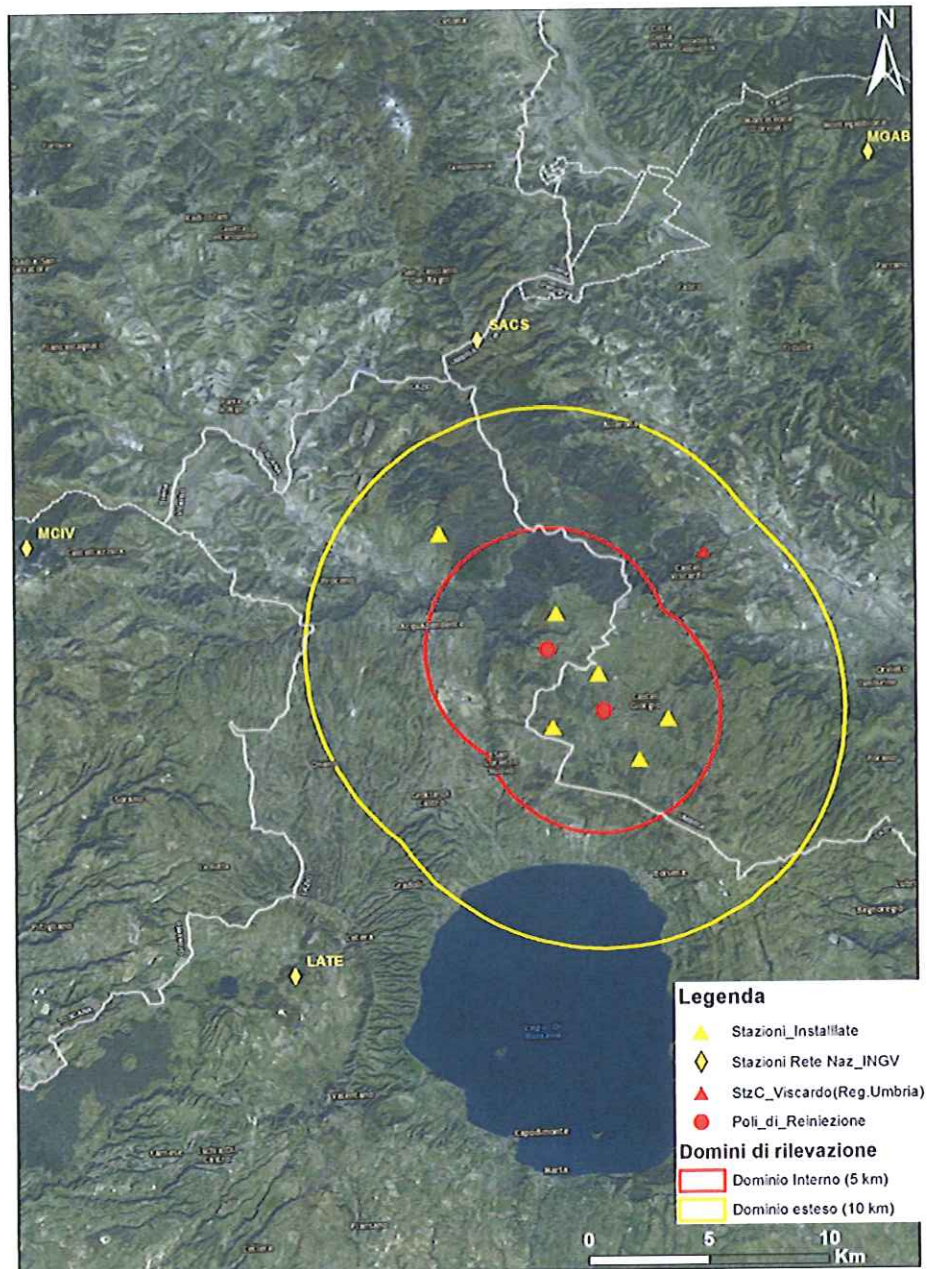
Le stazioni sismiche della rete dell'Osservatorio sismico Bina di Perugia si trovano invece tutte molto al di fuori dell'area del progetto e pertanto non si prestano allo studio della microsismicità dell'area di interesse.

Nell'ambito di una Convenzione stipulata fra la Società scrivente e l'INGV, quest'ultimo ha avuto l'incarico di realizzare una rete microsismica per monitorare la sismicità dell'area geotermica di Castel Giorgio – Torre Alfina. Dopo una lunga fase di studi per la ricerca dei siti ottimali, sono state installate tra maggio e luglio 2014 le prime cinque stazioni, più una sesta a larga banda di proprietà dell'INGV utilizzata per lo studio della risposta dei siti. L'ubicazione di queste stazioni è indicata in Fig.1.

Le stazioni sismiche sono state acquistate dalla Sara Electronic Instruments Srl di Perugia.

La rete microsismica locale è pertanto già operativa e la prescrizione A.1. d) prima citata sarà quindi perfettamente rispettata, considerato che a luglio 2015, ben prima dell'avvio delle attività del progetto, sarà già passato un anno dalla sua operatività. Dopo la scadenza del primo anno verrà predisposto e consegnato ad ARPA Umbria e ARPA Lazio un rapporto sull'attività sismica registrata, come previsto dalla prescrizione A.1. d).





**Fig. 1.** Ubicazione delle stazioni sismiche già installate per il controllo della microsismicità nell'area dei progetti geotermici Castel Giorgio e Torre Alfina (triangoli gialli). Sono indicate anche le stazioni più vicine della rete sismica permanente dell'INGV (losanghe gialle) e la stazione di Castel Viscardo della Regione Umbria (triangolo rosso). Con linee rossa e gialla sono indicati i limiti del dominio interno di rilevanza e del dominio esteso di rilevanza disegnati in conformità con le indicazioni delle Linee Guida MISE. I cerchietti rossi indicano i poli di reiniezione dei due progetti (più a sud quello relativo al progetto Castel Giorgio).

La rete microsismica è costituita da:

- 5 stazioni equipaggiate con geofoni a tre componenti con frequenza naturale di 2 Hz;
- 1 stazione broad-band equipaggiata con velocimetro con banda passante 0,025-50 Hz;
- digitalizzatori a 24 bit in grado di registrare eventi con un passo di campionamento di 200 Hz;
- antenna GPS per sincronizzazione delle stazioni;
- regolatore di carica;
- batteria da 60 Ah;
- pannelli fotovoltaici;
- sistema wi-fi di trasmissione.

Al momento, gli eventi vengono registrati in situ nella memoria dell'acquisitore della stazione sismica. Una volta completati gli studi di sito si provvederà alla sistemazione definitiva delle stazioni e ad attivare la teletrasmissione dei dati.

La strumentazione verrà in parte installata all'interno di uno shelter di piccole dimensioni (circa 1x1,5 m), con all'esterno due pannelli fotovoltaici. Per ridurre l'effetto del vento che produce fenomeni di risonanza e ridurre il livello di rumore ad alte frequenze, la strumentazione sarà ospitata in un pozzetto di circa 2 m di profondità, con una piccola gettata di cemento nel fondo e opportuno drenaggio. Il tutto sarà recintato.

I dati sismici acquisiti dalla rete verranno inoltrati tramite telemetria wi-fi ad una postazione computer ubicata nella centrale elettrica di Castel Giorgio dove saranno memorizzati in un apposito database, per poi essere trattati con un adeguato software al fine di ricavare i vari parametri utili al monitoraggio dei fenomeni sismici (variazioni temporali nell'attività sismica, distribuzione delle magnitudo degli eventi registrati, localizzazione degli eventi nello spazio e nel tempo e informazioni circa i meccanismi della sorgente). Nel periodo antecedente la realizzazione della centrale elettrica di Castel Giorgio, i dati verranno centralizzati in un sito ubicato in prossimità della centrale e dotato di energia elettrica e collegamento internet.

I dati acquisiti dalle stazioni della rete microsismica saranno integrati con quelli delle stazioni sismiche della rete nazionale permanente dell'INGV operanti entro un raggio di circa 20 km dall'area in esame, per migliorare le informazioni sulle caratteristiche sismo-strutturali di questa regione.

## **Adeguamento della rete microsismica alle Linee Guida MISE**

Nella Fig. 1 sono indicati i limiti del dominio interno di rilevazione (5 km) e del dominio esteso di rilevazione (10 km) definiti nelle Linee Guida MISE che descrivono le aree soggette a monitoraggio sismico degli impianti di idrocarburi e geotermici e le caratteristiche delle relative reti di monitoraggio.

Risulta evidente che l'ubicazione delle stazioni sismiche già installate corrisponde bene alla copertura del dominio interno.

Per adeguare la rete microsismica alle Linee Guida MISE, si prevede l'installazione della seguente nuova strumentazione:

- 2 velocimetri triassiali a larga banda (0.03-50 Hz)
- 2 velocimetri triassiali con caratteristiche analoghe a quelle già installate
- 4 accelerometri triassiali.

Anche questi strumenti verranno acquistati dalla SARA Electronic Instruments di Perugia.

La loro ubicazione di massima è indicata in Fig. 2. Le ubicazioni finali delle nuove stazioni potranno subire qualche modifica, a seconda delle risposte dei siti e di problemi logistici (es. autorizzazioni dei proprietari, possibilità o meno di connessione elettrica).

### **Processamento dei dati e bollettini sismici durante la gestione operativa degli impianti geotermici**

Le stazioni della rete permanente INGV presenti in prossimità della zona di interesse (Figg. 1 e 2) verranno utilizzate per il monitoraggio in tempo reale della sismicità.

Nel caso di insorgenza di sismicità anomala all'interno dei domini di osservazione (definito "stato di allarme" solo ai fini interni) si procederà al processamento immediato dei dati della rete microsismica locale provvedendo alla redazione di un bollettino sismico con frequenza da giornaliera a settimanale a seconda della frequenza di accadimento delle scosse. In caso di assenza di attività sismica anomala nell'area di interesse, verrà elaborato un bollettino trimestrale entro le prime due settimane del mese successivo al trimestre.

In caso di raggiungimento delle soglie indicate nelle Linee Guida MISE (vedi prossimo paragrafo) ci si adeguerà strettamente ai comportamenti ivi descritti.

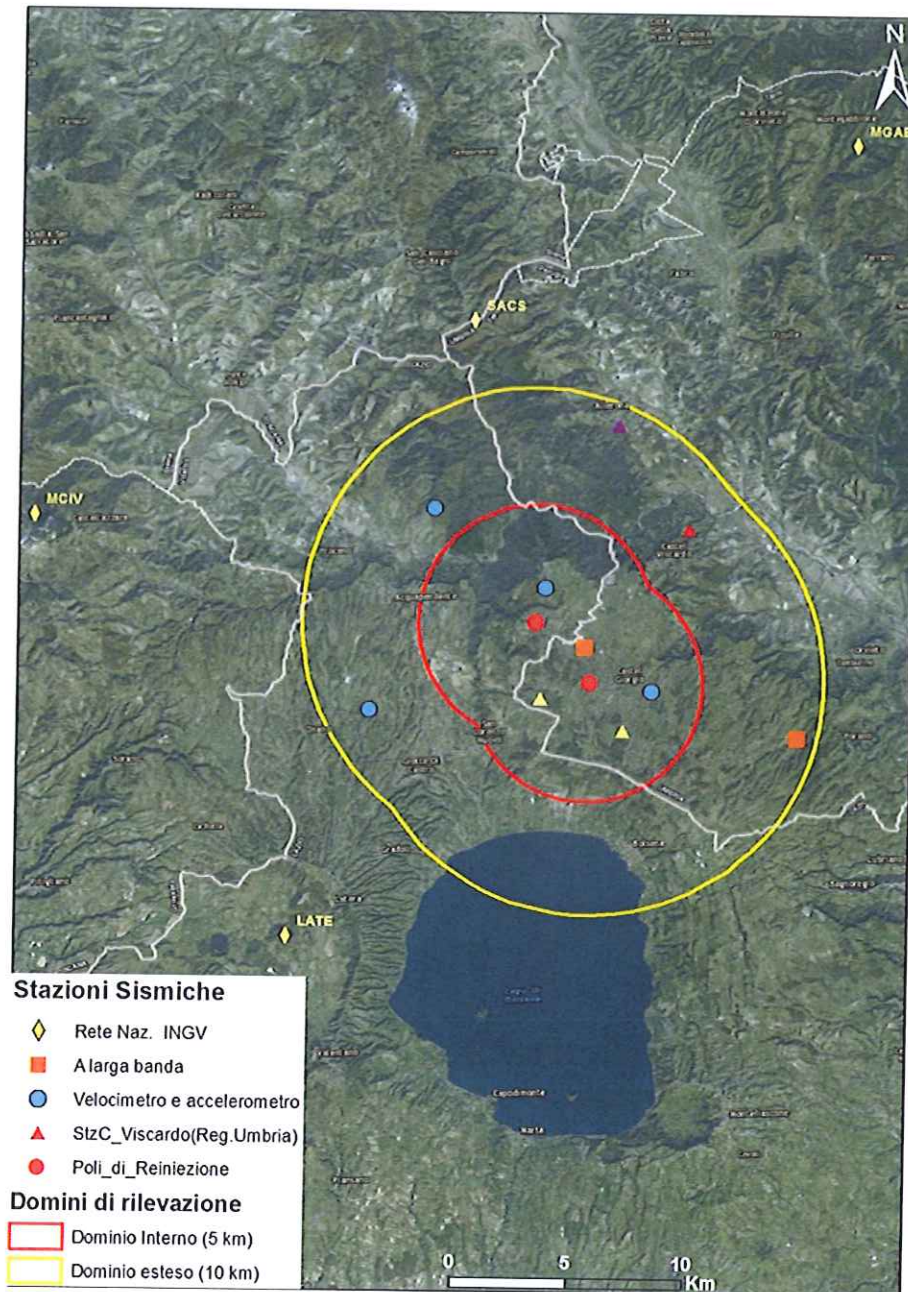


Fig. 2. Completamento della rete di monitoraggio microsismico secondo le Linee Guida MISE. Sono indicati i siti previsti per l'installazione dei nuovi velocimetri, accelerometri e delle stazioni a larga banda.

### Soglie di sismicità anomala

Per quanto riguarda le soglie dei parametri sismici monitorati nel dominio interno di rilevazione, ci si propone, in prima applicazione, di sperimentare un sistema a semaforo come suggerito nelle Linee Guida MISE.

I livelli di attivazione e le relative soglie sono indicati nella Fig. 3. Come può vedersi i parametri considerati sono i seguenti: magnitudo ( $M_{max}$ ), accelerazione di picco al suolo (PGA) e velocità di picco al suolo (PGV). Per l'attivazione del semaforo vanno considerati i valori assunti dai parametri esclusivamente all'interno del dominio interno di rilevazione, indicato nelle Figg. 1-2. La tabella seguente, tratta dalle stesse Linee Guida, riassume le azioni che verranno intraprese in relazione ai diversi livelli di attenzione. Nel nostro caso, la SPM (Struttura Preposta al Monitoraggio) è l'INGV di Roma, il Concessionario è la scrivente Società e l'UNMIG è la struttura tecnica del MISE.

| Livello di attivazione | Semaforo | $M_{max}$                          | PGA (% g) | PGV (cm/s) |
|------------------------|----------|------------------------------------|-----------|------------|
| 0                      | Verde    | $M_{max} \leq 1.5$                 | -         | -          |
| 1                      | Giallo   | $M_{verde} \leq M_{max} \leq 2.2$  | 0.5       | 0.4        |
| 2                      | Arancio  | $M_{giallo} \leq M_{max} \leq 3.0$ | 2.4       | 1.9        |
| 3                      | Rosso    | $M_{arancio} < M_{max}$            | 6.7       | 5.8        |

Fig. 3. Intervalli o valori indicativi dei parametri di monitoraggio sismico rilevati nel dominio interno di rilevazione da utilizzare come riferimento per la definizione delle soglie di attivazione dei vari livelli.

### Azioni da intraprendere in relazione ai Livelli di attenzione

| Livello di attivazione | Azioni  |
|------------------------|---|
| 0                      | Per il quadro complessivo delle azioni da intraprendere vedere il testo - par. 9.3 -<br>La SPM fornisce i dati acquisiti e le elaborazioni effettuate in ordinario al Concessionario, all'UNMIG e alla Regione.   |
| 1                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>a) La SPM effettua un'analisi delle variazioni dei parametri monitorati verificandone, ove possibile, l'eventuale correlazione con i dati di produzione/reiniezione/stoccaggio</li> <li>b) La SPM informa immediatamente il Concessionario, l'UNMIG e la Regione</li> <li>c) Il Concessionario fornisce eventuali ulteriori dati sulla produzione, re-iniezione o stoccaggio</li> <li>d) Nel caso sia esclusa, ovvero riscontrata, una correlazione tra le variazioni dei parametri monitorati e i dati di produzione/reiniezione/stoccaggio, si attua, rispettivamente, il rientro al livello 0 di ordinarietà o UNMIG, Regione e il Concessionario, sulla base delle analisi della SPM, fanno una valutazione complessiva delle informazioni disponibili e stabiliscono se ridurre progressivamente (livello di attivazione 2) o sospendere (livello 3) le attività in corso.</li> </ul> <p>Nel caso non sia possibile verificare l'eventuale correlazione, UNMIG, Regione e il Concessionario, ciascuno per quanto di propria responsabilità e sulla base delle analisi della SPM, stabiliscono se permanere al livello 1 o passare al livello 2.</p> |
| 2                      | <p>Restano validi i precedenti punti a-c). Inoltre:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>d) Il Concessionario riduce progressivamente l'attività</li> <li>e) UNMIG, Regione e il Concessionario, sulla base delle analisi della SPM, stabiliscono se sospendere (livello 3) le attività in corso.</li> <li>f) entro 10 giorni dalla riduzione SPM verifica se ci sono le condizioni per il rientro nell'ordinarietà (livello 0) o nel livello 1.</li> </ul>   |
| 3                      | <p>Restano validi i precedenti punti a-c). Inoltre:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>d) Il Concessionario sospende l'attività</li> <li>e) entro 10 giorni dalla sospensione SPM verifica se ci sono le condizioni per il rientro nell'ordinarietà (livello 0) o nei livelli 1 o 2.</li> </ul>   |

### Allegati

All. 1\_Linee Guida MISE

All. 2\_Rapporto su "Sismicità indotta o innescata"

All. 3\_Rapporto su "Sismicità storica e recente dell'area geotermica di Torre Alfina".

# Allegato 1 alle risposte A.1) c, d, e

## INDIRIZZI E LINEE GUIDA PER IL MONITORAGGIO DELLA SISMICITÀ, DELLE DEFORMAZIONI DEL SUOLO E DELLE PRESSIONI DI PORO NELL'AMBITO DELLE ATTIVITÀ ANTROPICHE

|  |    |
|--|----|
| 1. INTRODUZIONE.....   | 3  |
| 2. MOTIVAZIONI E FINALITÀ.....   | 5  |
| 3. TIPOLOGIE DI ATTIVITÀ TRATTATE E MODALITÀ DI APPLICAZIONE.....  | 8  |
| 4. CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA, STRUTTURALE E SISMOTETTONICA.....  | 8  |
| 5. CARATTERISTICHE DEL MONITORAGGIO SISMICO.....   | 10 |
| 5.1 Definizione dei volumi interessati dal monitoraggio sismico.....                                       | 10 |
| 5.2 Scopo del monitoraggio sismico.....  | 11 |
| 5.3 Caratteristiche tecniche della rete di monitoraggio sismico.....                                       | 11 |
| 5.4 Elaborazione e analisi dei dati.....   | 13 |
| 6. CARATTERISTICHE DEL MONITORAGGIO DELLE DEFORMAZIONI DEL SUOLO.....                                      | 15 |
| 6.1 Generalità.....  | 15 |
| 6.2 Caratteristiche tecniche del monitoraggio delle deformazioni del suolo.....                            | 16 |
| 7. CARATTERISTICHE DEL MONITORAGGIO DELLE PRESSIONI DI PORO.....   | 18 |
| 8. PUBBLICAZIONE DEI DATI DI MONITORAGGIO E DIVULGAZIONE DELLE INFORMAZIONI.....                           | 19 |
| 8.1 Informazioni sulla concessione.....  | 19 |
| 8.2 Introduzione alle attività di monitoraggio (sismicità, deformazioni del suolo, pressioni di poro)..... | 19 |
| 8.3 Dati generali sui monitoraggi.....   | 19 |
| 8.4 Dati di monitoraggio sismico.....  | 20 |
| 8.5 Dati di monitoraggio delle deformazioni del suolo.....   | 20 |
| 8.6 Dati di monitoraggio della pressione di poro.....  | 21 |
| 8.7 Documentazione.....  | 21 |
| 8.8 Formazione e accesso al sito.....  | 21 |
| 8.9 Link utili.....  | 21 |
| 9. INDIRIZZI IN MATERIA DI STRUTTURA DI GESTIONE, CONTROLLO E INTERVENTO.....                              | 22 |
| 9.1 Progettazione, realizzazione e manutenzione delle reti di monitoraggio.....                            | 22 |
| 9.2 Sistema di attivazione delle azioni da intraprendere.....  | 23 |
| 9.3 Fasi di gestione delle attività.....   | 24 |
| Fase 1 - Gestione ordinaria del monitoraggio.....  | 25 |
| Fase 2 - Gestione ordinaria di variazioni nei parametri monitorati.....                                    | 25 |
| Fase 3 - Gestione straordinaria di variazioni nei parametri monitorati.....                                | 27 |
| 9.4 Sistema sperimentale <i>a semaforo</i> .....   | 28 |

|   |    |
|---|----|
| 10. CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI ..... | 30 |
| GLOSSARIO .....                         | 32 |
| APPENDICE A .....                       | 36 |
| BIBLIOGRAFIA .....                      | 38 |



## 1. INTRODUZIONE

In questo documento sono riportate le conclusioni del Gruppo di Lavoro istituito presso il MiSE per definire Indirizzi e Linee Guida per il monitoraggio delle attività di sottosuolo, con particolare riferimento a quelle di coltivazione, reiniezione e stoccaggio di idrocarburi. Esso rappresenta la prima tra le azioni promosse dal Ministero dello sviluppo economico (MiSE) al fine di mantenere al più alto livello delle conoscenze gli standard di sicurezza per tali attività in zone sismicamente attive e in aree dove tali attività possono produrre deformazioni del suolo.

La commissione ICHESE (International Commission on Hydrocarbon Exploration and Seismicity in the Emilia Region, Appendice A) ha evidenziato l'opportunità che le attività di coltivazione di idrocarburi e di produzione di energia geotermica, sia in atto sia di nuova programmazione, siano costantemente monitorate tramite reti ad alta tecnologia, finalizzate a seguire l'evoluzione nello spazio e nel tempo dell'attività microsismica, delle deformazioni del suolo e della pressione di poro. La commissione ha indicato che queste reti dovranno essere messe in funzione prima dell'avvio di nuove attività, al fine di poter verificare e misurare la sismicità naturale di fondo e l'andamento delle deformazioni del suolo in condizioni "non perturbate". La stessa commissione ha inoltre auspicato il miglioramento delle basi informative di dati riguardanti i fenomeni monitorati.

Nelle raccomandazioni, la commissione ICHESE aveva già fornito una prima indicazione delle caratteristiche minime delle reti: capacità di rilevare tutti i terremoti di magnitudo almeno a partire da  $M_L$  0,5, utilizzo di metodi satellitari per la rilevazione delle deformazioni del suolo con tecnologie interferometriche - InSAR - e GNSS/GPS (d'ora in poi GPS) con una risoluzione di alcuni millimetri all'anno, misura al fondo pozzo della pressione dei fluidi con frequenza giornaliera.

Nelle raccomandazioni era inoltre auspicata l'attivazione di un sistema operativo "a semaforo" e la definizione di valori di soglia, per parametri osservati, associati a diversi livelli di attenzione.

Nelle more della definizione di una completa regolamentazione della materia da parte di tutte le autorità competenti, nazionali e regionali, il MiSE, per le proprie competenze in materia di attività estrattive e, in particolare, in qualità di autorità competente sia al rilascio di permessi, concessioni e autorizzazioni, sia alla vigilanza in materia di ricerca e produzione di idrocarburi e di stoccaggio di gas naturale e di  $CO_2$ , ha ritenuto di dover procedere tempestivamente alla messa a punto di linee di indirizzo per un sistema di monitoraggio avanzato e integrato.

Il presente documento costituisce, quindi, una prima formulazione delle Linee Guida tecniche per la realizzazione dei monitoraggi e degli indirizzi per la loro gestione e controllo nonché per le modalità di intervento legate agli scenari di variazione dei parametri monitorati, che saranno sperimentate dal MiSE su alcuni siti pilota. I risultati di questa sperimentazione saranno resi pubblici e condivisi con il Ministero ambiente e della tutela del territorio e del mare (MATTM) e le Regioni interessate.

Le presenti Linee Guida sono state redatte dal Gruppo di Lavoro istituito a tal fine dal MiSE il 27 febbraio 2014 nell'ambito della Commissione Idrocarburi e Risorse Minerarie (CIRM). Nel Gruppo di Lavoro, coordinato dal MiSE, sono riuniti esperti nazionali di sismicità, di deformazione del suolo e di geologia operanti in Università ed Enti di ricerca con competenze in materia; è presente, inoltre, un rappresentante del Dipartimento della Protezione Civile.

I Componenti del gruppo di lavoro sono:

Ing. Gilberto Dialuce (MiSE - coordinatore),

Dott. Claudio Chiarabba (INGV – Struttura Terremoti),

Dott.ssa Daniela Di Bucci (Dipartimento della Protezione Civile),

Prof. Carlo Doglioni (Dipartimento Scienze della Terra, Università Sapienza di Roma),

Prof. Paolo Gasparini (Università di Napoli “Federico II”; Analisi e Monitoraggio del rischio ambientale - AMRA),

Ing. Riccardo Lanari (CNR – Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell’Ambiente - IREA),

Dott. Enrico Priolo (OGS – Sezione Scientifica Centro di Ricerche Sismologiche),

Prof. Aldo Zollo (Università di Napoli “Federico II” - Dipartimento di Fisica).

Il Gruppo di Lavoro ha affrontato per la prima volta a livello nazionale il tema del monitoraggio delle attività di estrazione, reiniezione e stoccaggio di idrocarburi relativamente alla sismicità, alla deformazione del suolo e alle pressioni di poro producendo una prima versione che contiene specifiche tecniche tra le più avanzate. Il MiSE valuterà, caso per caso, la loro prima applicazione tenuto conto della variabilità della situazione geologico-strutturale e della sismicità naturale del territorio. Si raccomanda che questa prima versione del documento sia rivalutata a distanza di due anni sulla base:

- dell'esperienza acquisita in una prima fase sperimentale su campi pilota rappresentativi delle diverse casistiche riguardanti, tra l'altro, reservoir in rocce carbonatiche che includano attività di reiniezione (attività che, in generale in Italia, già è sottoposta a monitoraggio sismico che viene gestito, nella maggioranza dei casi, dagli operatori stessi);
- di uno studio di fattibilità, comprensivo dei costi di realizzazione e di gestione a regime, per tutti i campi produttivi in cui è realizzata la reiniezione e per gli altri casi che, come si vedrà nel seguito, si suggerisce di considerare in prima istanza (cioè concessioni per l'estrazione in cui siano presenti reiniezione e concessioni per lo stoccaggio di gas naturale).

Si suggerisce, inoltre, considerando la vasta esperienza già acquisita nei monitoraggi delle attività di stoccaggio di gas naturale in sottterraneo, di includere tra i casi pilota alcuni di questi campi di stoccaggio. Infatti, nella maggior parte di quelli in esercizio in Italia sono già attive reti di monitoraggio sismico e delle deformazioni del suolo.

## 2. MOTIVAZIONI E FINALITÀ

Le presenti Linee Guida hanno l'obiettivo di definire gli standard iniziali di osservazione degli effetti delle attività antropiche a seguito di operazioni di reiniezione di fluidi nel sottosuolo (acque di strato) e di estrazione/stoccaggio di idrocarburi e, in particolare, di stabilire le procedure e i protocolli di monitoraggio, includendo tra questi le modalità di analisi dell'evoluzione spazio-temporale di alcuni parametri descrittivi della sismicità, della deformazione del suolo e della pressione di poro. Tali standard dovranno essere aggiornati e perfezionati mediante una fase sperimentale su casi pilota rappresentativi di diverse casistiche, prima di una loro applicazione generalizzata.

Le Linee Guida presentano gli indirizzi e i criteri generali per la formulazione delle successive prescrizioni o specificazioni da parte delle Amministrazioni competenti coinvolte (Cfr. Glossario), da applicare alle singole concessioni in funzione delle caratteristiche del sito e del progetto di reiniezione, estrazione o stoccaggio. Il Gruppo di Lavoro ha tenuto in debita considerazione le prescrizioni di monitoraggio emanate in precedenza dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, compresa la Relazione che discute le problematiche relative alla definizione del quadro prescrittivo (MATTM, 2013).

Prima che le attività antropiche in esame abbiano inizio, il monitoraggio permette di quantificare i valori di fondo, naturali e/o indotti da altre attività antropiche, dei parametri sopra menzionati. Durante tutto il periodo di esercizio, il monitoraggio permette invece di distinguere e misurare in continuo l'eventuale sismicità e le variazioni di tutti i parametri monitorati attraverso il confronto con i valori di fondo precedentemente acquisiti e stimati.

In particolare, mediante il **monitoraggio sismico** si intende individuare e localizzare la sismicità in un volume circostante il luogo delle attività antropiche, anche con l'obiettivo di distinguere la sismicità naturale da quella eventualmente causata da tali attività. Il monitoraggio deve consentire di seguire l'evoluzione spazio-tempo-magnitudo della sismicità al fine, ove occorra, di rimodulare o, nei casi previsti, di sospendere le attività stesse.

Mediante il **monitoraggio delle deformazioni del suolo** si intende identificare eventuali fenomeni di deformazione superficiale legati alle attività in esame, per misurarne e analizzarne le variazioni spazio-temporali rispetto alle condizioni di fondo.

Con il **monitoraggio delle pressioni di poro** (o di giacimento) si intende misurare la pressione a fondo pozzo ed effettuare eventuali prove di interferenza con pozzi limitrofi, allo scopo di verificare il modello fluidodinamico del sottosuolo interessato dalle attività antropiche e valutare l'evoluzione nello spazio e nel tempo delle pressioni.

Le presenti Linee Guida sono state elaborate con particolare riferimento alle attività antropiche di reiniezione *onshore*, a cui saranno in primo luogo applicati gli standard previsti; ma sono comunque applicabili, con opportuni adattamenti tecnici, anche ad attività *offshore*, specialmente vicino alla costa. Esse costituiscono, inoltre, un riferimento per tutte le attività minerarie di stoccaggio di gas naturale in sottosuolo e di coltivazione di idrocarburi, e potranno essere estese alle altre attività di sottosuolo con opportuni adattamenti.

Se ne raccomanda l'applicazione sperimentale prioritariamente: (i) alle attività antropiche, nuove e in corso, che prevedono la reiniezione in sottterraneo dei fluidi di strato separati dagli idrocarburi prodotti; (ii) allo stoccaggio di gas naturale in sottterraneo.

Relativamente al monitoraggio delle pressioni di poro, si suggerisce di effettuarlo a partire dalle nuove attività e, per quelle in essere, dai casi in cui i pozzi siano tecnicamente equipaggiabili con le attrezzature per effettuare tale misurazione, nonché, per le prove di interferenza, dai casi in cui siano presenti pozzi utilizzabili a tal fine nell'intorno del pozzo monitorato.

Si ritiene che le indicazioni delle presenti Linee Guida non si debbano applicare, in via generale, nei casi di produzioni marginali di gas anidro e olio a profondità minori di 2 km, in quanto le attività svolte nell'ambito di tali specifiche condizioni non risultano sufficienti a determinare variazioni significative nei parametri monitorati. Per produzioni marginali si intendono quelle in giacimenti con riserve originarie inferiori a 300 milioni di m<sup>3</sup> standard di gas o a 30 milioni di barili di olio. Per queste produzioni rimangono comunque opportuni i monitoraggi delle deformazioni del suolo.

Più in generale, le Linee Guida, opportunamente adattate, potrebbero essere adottate anche nel caso di:

1. Invasi idrici artificiali,
2. Geotermia tradizionale,
3. Geotermia a ciclo chiuso,
4. Geotermia stimolata (attività attualmente non realizzata in Italia),
5. Stoccaggio del biossido di carbonio (attività attualmente non realizzata in Italia),
6. Estrazioni minerarie (cave e miniere),
7. Scavi di tunnel.

Da un punto di vista generale, si ritiene che la loro attuazione contribuirà a creare un sistema osservativo integrato, volto a tutelare maggiormente le aree in cui sono previste attività di coltivazione del sottosuolo in Italia. Questo gioverà, nel tempo, anche allo sviluppo di future attività, che potranno avvalersi di un'accresciuta base di dati e di conoscenze, nonché di una più completa copertura strumentale del territorio. Il Gruppo di Lavoro, in tal senso, auspica il rafforzamento delle sinergie esistenti tra i differenti soggetti pubblici (Enti Pubblici di Ricerca, Università, Istituzioni) e privati coinvolti, e la promozione di nuove collaborazioni. Ciò al fine di assicurare la piena condivisione dei dati e delle metodologie di analisi e modellazione, anche attraverso l'utilizzo mirato delle infrastrutture disponibili.

Le Linee Guida individuano, inoltre, le modalità per assicurare la massima trasparenza ed oggettività dei monitoraggi, la pubblicazione dei dati rilevati e la divulgazione delle informazioni. Esse delimitano, altresì, i criteri e le procedure da adottare per l'individuazione dei soggetti che, in base alle proprie competenze, gestiranno le reti di monitoraggio, analizzeranno i dati che verranno raccolti e li renderanno disponibili al Concessionario e alle autorità competenti.

Lo scopo è di rilevare variazioni nei parametri monitorati, evidenziare la loro eventuale correlazione con le attività antropiche svolte nel sottosuolo e intraprendere le azioni di mitigazione necessarie per ricondurre i parametri misurati entro il livello di fondo atteso, nonché predisporre le azioni più opportune per la messa in sicurezza dell'impianto, delle persone e del territorio interessato.

Per quanto riguarda le azioni da intraprendere in base alle variazioni dei parametri monitorati, si è definito uno schema generale che opera per livelli successivi di attivazione. Inoltre, anche sulla base dell'esperienza e della normativa di altre nazioni, si propone di introdurre in via sperimentale per le sole attività di reiniezione un modello decisionale basato sul superamento di soglie prestabilite, detto anche "sistema a semaforo". A questo scopo sono definiti i criteri con cui fissare, caso per caso, le soglie dei diversi livelli di attenzione per alcuni parametri monitorati. Vengono inoltre individuate le modalità di controllo dei parametri stessi e delle attività antropiche, nonché le linee di azione in caso di passaggio da un livello di attivazione all'altro, o di superamento delle soglie nel caso del sistema a semaforo.

Un aspetto importante riguarda le procedure di analisi su cui basare le azioni da adottare in base al monitoraggio. Il Gruppo di Lavoro, dopo approfondita analisi, ha concluso che per l'Italia mancano, al momento, metodologie consolidate e diffuse di analisi statistiche o fisiche che permettano di correlare sismicità rilevata alle attività antropiche entro il tempo massimo di uno/due giorni, necessario per prendere delle decisioni attraverso procedure direttamente applicabili. Nelle more di un miglioramento delle conoscenze in tale settore, è stato scelto un approccio a semaforo basato su parametri misurati esclusivamente entro un volume di sottosuolo circoscritto nell'intorno del pozzo di reiniezione e specifiche misure del moto del suolo in superficie.

Per meglio garantire l'indipendenza del soggetto preposto al monitoraggio rispetto al titolare della concessione di coltivazione e stoccaggio, si suggerisce di prevedere, se del caso anche attraverso un opportuno strumento normativo, l'istituzione presso il MiSE di un apposito fondo, alimentato dai Concessionari, con cui il MiSE stesso potrà curare direttamente l'affidamento dei monitoraggi mediante procedure pubbliche. Tuttavia, nella fase transitoria che precede l'auspicata istituzione di tale modalità di gestione, e al fine di non posticipare *sine die* l'attuazione del monitoraggio delle concessioni, nell'interesse pubblico generale, al Capitolo 9.2 è indicata una possibile modalità per garantire la maggiore separazione possibile tra il Concessionario e il soggetto che effettua il monitoraggio.

Il MiSE avrà cura di controllare e verificare che i monitoraggi svolti siano consistenti con le indicazioni contenute nel presente documento.

### **3. TIPOLOGIE DI ATTIVITÀ TRATTATE E MODALITÀ DI APPLICAZIONE**

Le Linee Guida, pur essendo applicabili a tutte le attività di sottosuolo, sono state elaborate principalmente per il monitoraggio sismico, delle deformazioni del suolo e della variazione di pressione di poro in relazione alle attività di estrazione di idrocarburi, di reiniezione delle acque di strato e di stoccaggio di gas naturale nel sottosuolo.

Se ne raccomanda una prima applicazione in forma sperimentale su casi pilota di attività già in corso, affiancata da uno studio di fattibilità, comprensivo dei costi di realizzazione e di gestione a regime, per tutti i campi produttivi in cui è realizzata la reiniezione e per i campi di stoccaggio (cfr. Capitolo 1), per poi passare, sulla base dell'esperienza acquisita, ad una successiva estensione alle altre attività in corso e alle nuove attività.

In fase di applicazione delle presenti Linee Guida, si raccomanda che le nuove infrastrutture di monitoraggio siano progettate anche tenendo in considerazione un principio di "valorizzazione dell'esistente" e, quindi, di prevedere, a seguito di opportuna valutazione, l'eventuale adeguamento di infrastrutture già operanti per ottenere le prestazioni richieste.

### **4. CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA, STRUTTURALE E SISMOTETTONICA**

Al fine di disporre del quadro geologico e sismotettonico dettagliato dell'area che include le attività, utile anche per la progettazione delle reti di monitoraggio, le Società richiedenti e, nei casi previsti, i Concessionari, predispongono e rendono disponibili, anche alla luce degli studi geologici precedentemente effettuati, i seguenti dati e informazioni:

- almeno tre sezioni geologiche: due perpendicolari ed una parallela alla struttura geologica che costituisce il giacimento, che abbiano lunghezza pari a non meno di 15 volte la profondità dei pozzi. Le sezioni devono arrivare ad una profondità almeno 3 volte maggiore di quella dei pozzi. L'area deve essere anche coperta da una carta geologica alla stessa scala delle sezioni, che contenga le sezioni stesse. La carta e le sezioni devono essere prodotte preferibilmente a scala 1:5.000 o, comunque, a scala non superiore a 1:25.000;
- profili sismici a riflessione, multicanale, dell'area definita secondo i criteri del punto precedente e, quando possibile, acquisizione sismica 3D del dominio esteso di rilevazione;
- modello stratigrafico - strutturale 3D, con profondità pari ad almeno 3 volte la profondità del pozzo di produzione o iniezione più profondo realizzato o previsto, e lati pari ad almeno 2 volte l'estensione della zona mineralizzata (reservoir), e che includa comunque le strutture sismogeniche nel raggio di 15-20 km;
- stima diretta o indiretta, anche mediante analisi su carote, dei parametri di porosità primaria

e secondaria nella stratigrafia del pozzo e nel volume emisferico a fondo pozzo di raggio pari a 2 volte la profondità del pozzo stesso (es. tramite log di pozzo, misure geoelettriche o magnetotelluriche e proiezioni laterali delle stratigrafie);

- valutazione del grado di compattazione della serie stratigrafica e della subsidenza attesa in funzione dell'emungimento/reiniezione di fluidi dalla porosità primaria;
- simulazione, in base alle caratteristiche petro-fisiche del giacimento, della migrazione dei fluidi nell'intorno del giacimento e nel dominio interno di rilevazione (quest'ultimo concetto è definito nel Capitolo 5);
- individuazione delle eventuali faglie attive adiacenti (entro 3 km) o prossime (entro 15 km) al giacimento;
- quadro cinematico generale dell'area interessata, anche alla luce dei dati geodetici, satellitari e sismologici di cui ai capitoli successivi;
- stima delle variazioni del carico litostatico in base ai dati previsti di emungimento o reiniezione, quindi in positivo o in negativo, associate alle attività minerarie;
- valutazione del volume intorno al pozzo attraverso il quale i fluidi reiniettati sono in grado di migrare e programmazione del relativo monitoraggio. A tal fine, potrà essere utilizzato un monitoraggio geochimico con traccianti (per esempio isotopi dell'ossigeno) per verificare la permeabilità e la velocità di migrazione dei fluidi tra pozzi;
- realizzazione di un modello geomeccanico che comprenda tutte le informazioni di cui sopra, da aggiornare periodicamente in funzione delle informazioni rese progressivamente disponibili dal monitoraggio e dai dati di produzione.

Inoltre, si suggerisce che venga curata:

- l'installazione, in pozzi pilota piezometrici superficiali, di piezometri e strumenti che monitorino in continuo le variazioni della falda (profondità, temperatura, composizione chimica) per evidenziare eventuali variazioni non legate al ciclo idrologico naturale. Si raccomanda, inoltre, che almeno uno dei piezometri venga accoppiato ad un assestmetro per la misura della compattazione degli strati superficiali attraverso la fuoriuscita dal terreno di una barra metallica, ancorata a fondo pozzo ad una profondità che raggiunga il limite inferiore degli acquiferi;
- l'esecuzione di rilievi geoelettrici o di magnetotellurica ripetuti relativi al volume del "dominio interno di rilevazione" (cfr. Capitolo 5) per valutare le anomalie di resistività e le loro eventuali variazioni nel tempo.

## 5. CARATTERISTICHE DEL MONITORAGGIO SISMICO

### 5.1 Definizione dei volumi interessati dal monitoraggio sismico

*Dominio interno di rilevazione (DI)* - Definisce il volume all'interno del quale si ritiene che possano verificarsi fenomeni di sismicità indotta o di deformazione del suolo associati all'attività svolta. Esso rappresenta il volume di riferimento per il quale saranno identificati, monitorati e analizzati con la massima sensibilità i fenomeni di sismicità e deformazione del suolo.

- a) Per le attività di estrazione di olio/gas da giacimento senza reiniezione, è il volume che si estende fino alla superficie comprendendo la zona mineralizzata (giacimento), come ricostruita dallo studio geologico preliminare, e un'ulteriore fascia che si estende ai lati e sotto fino ad una distanza di 3 km dal bordo del giacimento stesso. Qualora sia prevista reiniezione in livelli compresi nel giacimento, tale fascia si estende fino a 5 km dal bordo del giacimento stesso.
- b) Per le attività di stoccaggio, è il volume che comprende la zona mineralizzata (giacimento usato per lo stoccaggio), come ricostruita dallo studio geologico preliminare, e un'ulteriore fascia nell'intorno del giacimento fino ad una distanza di 2-3 km, in funzione dell'estensione del giacimento.
- c) Nel caso di reiniezione di fluidi all'esterno del giacimento, è il volume, che si estende fino alla superficie, definito dall'inviluppo costruito tracciando sfere centrate al fondo dei pozzi di reiniezione aventi raggio pari alla profondità del pozzo e comunque non inferiore a 8 km.

*Dominio esteso di rilevazione (DE)* - E' il volume circostante il dominio interno di rilevazione che comprende una porzione maggiore di crosta terrestre, al fine di definire e contestualizzare al meglio i fenomeni monitorati. Per tutte le attività si suggerisce che esso si estenda oltre il dominio interno di rilevazione per una fascia di ampiezza compresa tra 5-10 km, tenendo conto delle dimensioni del giacimento e tipologia di attività.

Le definizioni sopra date discendono dall'evidenza, risultante dai dati di letteratura, che la maggior parte della sismicità indotta può generarsi principalmente nel volume che circonda il giacimento e i pozzi di reiniezione, soprattutto inferiormente. Per la reiniezione di fluidi all'esterno del giacimento si fa riferimento alla profondità dei livelli del pozzo in cui viene reiniettata l'acqua di strato, mentre per lo stoccaggio si fa riferimento al bordo esterno del giacimento, essendo i pozzi di produzione e stoccaggio comunque sempre compresi all'interno del giacimento.

Un eventuale ampliamento dei domini di rilevazione potrà essere stabilito per ogni singola concessione durante le fasi di progettazione delle reti di monitoraggio sulla base di considerazioni specifiche, o durante il periodo di monitoraggio sulla base di nuovi dati emergenti che ne consigliassero la modifica. Nel caso di attivazione di nuovi pozzi di reiniezione entro o fuori dal giacimento, detti volumi dovranno obbligatoriamente essere ridefiniti in accordo a quanto stabilito.



## 5.2 Scopo del monitoraggio sismico

1. Lo scopo del monitoraggio sismico è di rilevare, localizzare e determinare i principali parametri di sorgente della sismicità e microsismicità verificatasi nei domini di rilevazione;
2. migliorare a scala locale il livello di magnitudo di completezza delle rilevazioni nei domini di rilevazione;
3. misurare con accuratezza le accelerazioni del suolo prodotte in superficie da terremoti in prossimità dell'area di coltivazione o stoccaggio.

I dati rilevati dovranno anche servire a costruire un catalogo di eventi sismici che possa essere utilizzato per monitorare l'evoluzione nel dominio spazio-tempo-magnitudo della sismicità nei domini di rilevazione, e per le analisi di pericolosità da sismicità indotta, anche dipendente dal tempo.

## 5.3 Caratteristiche tecniche della rete di monitoraggio sismico

La rete di monitoraggio sismico dovrà soddisfare provatamente i seguenti requisiti:

1. nel dominio interno di rilevazione, rilevare e localizzare i terremoti a partire da magnitudo locale  $M_L$  compresa tra 0 e 1 ( $0 \leq M_L \leq 1$ ) e con incertezza nella localizzazione dell'ipocentro di alcune centinaia di metri;
2. nel dominio esteso di rilevazione, migliorare di circa 1 unità il livello di magnitudo di completezza delle rilevazioni effettuate dalle reti nazionali o regionali che svolgono servizio di monitoraggio sismico per finalità di protezione civile a livello nazionale o regionale, con incertezza nella localizzazione dell'ipocentro contenuta entro circa 1 km;
3. determinare l'accelerazione e la velocità del moto del suolo provocata da eventuali terremoti (deboli e forti) presso i punti di misurazione;
4. integrarsi opportunamente con le reti di monitoraggio esistenti (ovvero: rete nazionale, reti regionali e ulteriori eventuali reti locali) al fine di migliorare l'accuratezza e la completezza della rilevazione della sismicità.

L'idoneità dell'infrastruttura di monitoraggio realizzata sarà valutata su base prestazionale, ovvero per la sua capacità di soddisfare i punti 1-4 sopra enunciati. Tuttavia le presenti Linee Guida si pongono anche l'obiettivo di fornire dei riferimenti tecnici per la progettazione. In conseguenza, nel seguito vengono enunciate alcune caratteristiche che si ritiene opportuno che le reti soddisfino.

- a) Verrà utilizzata un'interdistanza tra le stazioni indicativamente di circa 3-5 km nell'area superficiale del dominio interno di rilevazione DI che verrà aumentata progressivamente procedendo verso il bordo esterno del dominio esteso DE.
- b) Ogni stazione dovrà essere dotata di due sensori tri-assiali, uno ad elevata sensibilità (sismometro) e uno ad elevata dinamica (accelerometro). Potranno essere adottati sensori sismometrici a corto periodo ( $T \leq 1$  s), ma con periodo proprio non inferiore a  $T = 0.5$  s. Si raccomanda l'installazione di almeno un sensore a banda estesa o larga (periodo proprio  $T \geq 20-40$  s, e frequenza massima di rilevazione non inferiore a 80 Hz) presso una stazione interna alla rete dedicata.
- c) Il segnale dovrà essere acquisito in continuo, con frequenza di campionamento dei dati non inferiore a 200 Hz e a 100 Hz, rispettivamente per i sismometri e per gli accelerometri posti in superficie, e a 250 Hz per i sensori (sismometri o accelerometri) posti in pozzi profondi. Il

segnale dovrà essere trasmesso in tempo “*quasi-reale*” al centro di controllo presso la Struttura Preposta al Monitoraggio (d’ora in avanti SPM; cfr. Capitolo 9), ove ne sarà curata anche l’archiviazione, in modo da garantire l’integrità, la continuità e la sicurezza del dato. L’apparato di acquisizione dovrà essere dotato di un sistema di temporizzazione di precisione, basato su tecnologia GPS, per consentire la stima corretta dei tempi di arrivo delle fasi e l’integrazione con le altre reti esistenti.

- d) Si raccomanda che la stazione a banda larga integri la funzione di rilevazione sismica con quella geodetica tramite la realizzazione di una stazione permanente di precisione GPS, collocata e configurata con campionamento di acquisizione a 10 Hz. Tale stazione sarà parte integrante del sistema di monitoraggio della deformazione di cui al Capitolo 6.
- e) Per l’installazione dei sensori si dovrà prevedere l’adozione di specifici accorgimenti atti a ridurre il rumore sismico ambientale. Nel caso di elevato rumore sismico di fondo, si suggerisce l’installazione dei sensori sismometrici in profondità, in funzione della litologia e della tipologia del sensore; nel caso di suoli poco consolidati, come ad esempio quelli di pianura, si suggerisce una profondità indicativa compresa tra 100 m e 200 m.
- f) Si raccomanda di adottare strategie di gestione della rete atte a minimizzare le interruzioni nel flusso dei dati e delle elaborazioni. In particolare, dovrebbe essere garantita la copertura dei dati per almeno il 95% del tempo per ogni stazione, ed eventuali interruzioni o malfunzionamenti della singola stazione dovrebbero essere risolti in tempi brevi, in un intervallo di tempo massimo possibilmente compreso tra 7-10 giorni. A tale scopo, si raccomanda l’acquisto di strumentazione di ricambio da tenere disponibile per eventuali sostituzioni. Tale materiale dovrebbe essere disponibile in numero di circa una unità completa ogni quattro, intendendosi per unità l’insieme della strumentazione (sismologica, elettronica, elettrica, etc.) necessaria per il funzionamento della stazione.
- g) Si raccomanda che siano attivate procedure idonee a determinare le curve di risposta strumentale, che includano sia i sensori sia gli acquisitori digitali, e a stimare l’orientazione dei sismometri posti in pozzo, di prevedere la verifica periodica della risposta strumentale complessiva, nonché di provvedere a tutti gli aggiornamenti in conseguenza a modifiche/sostituzioni degli apparati.

Ove non sia possibile raggiungere le prestazioni richieste ai punti precedenti, si consiglia l’installazione di sensori sismici anche in pozzi, eventualmente profondi, in modo da ridurre il più possibile la distanza dal dominio di rilevazione (ad esempio nel caso in cui risultino disponibili pozzi che possano essere attrezzati con la strumentazione di rilevazione sismica). In questi casi si suggerisce l’adozione di stringhe di sensori a corto o cortissimo periodo, con numero di sensori per stringa non inferiore a 4 e frequenza di campionamento più elevata di quanto indicato al precedente punto c).

In linea generale, potrà essere prevista l’installazione di sistemi di monitoraggio sismico con risoluzione crescente in magnitudo-localizzazione (ad esempio aumentando la densità delle stazioni) in funzione della pericolosità attesa di sismicità indotta, valutata in funzione dei volumi iniettati.

Si rimarca quanto già espresso nel Capitolo 3, cioè che le caratteristiche tecniche delle reti microsismiche, sotto specificate, debbano essere perseguite alla luce del principio di “valorizzazione dell’esistente” e quindi prevedere, a seguito di opportuna valutazione, un eventuale adeguamento della rete già attiva per ottenere le prestazioni richieste.

Per quanto riguarda i tempi di esercizio del monitoraggio, si raccomandano le seguenti modalità:

1. il monitoraggio sismico dovrà partire almeno un anno prima dell'inizio della attività di coltivazione o stoccaggio, al fine di poter verificare e misurare la sismicità naturale di fondo in condizioni "non perturbate";
2. il monitoraggio sismico dovrà proseguire per tutto il tempo dell'attività di coltivazione o stoccaggio prevista, e protrarsi per almeno un anno dopo la conclusione delle attività.

Dopo due anni consecutivi di attività, la SPM valuterà le prestazioni della rete di monitoraggio ed eventuali criticità del sistema di analisi ed elaborazione dei dati adottato. Nel caso in cui il monitoraggio non soddisfi le prestazioni sopra indicate per limiti tecnici, dovranno essere previsti opportuni interventi di miglioramento. Eventuali motivazioni oggettive, che precludano il raggiungimento delle prestazioni prescritte, dovranno essere documentate da parte dei Concessionari al MiSE tramite relazioni della SPM.

#### 5.4 Elaborazione e analisi dei dati

Dovranno essere implementate procedure di elaborazione e analisi dei dati in grado di soddisfare gli obiettivi del monitoraggio sismico già specificati in precedenza ai paragrafi 5.2 e 5.3. Dovranno inoltre essere adottate strategie di archiviazione sicura e distribuzione/diffusione dei dati, ricorrendo alle pratiche e ai formati standard in uso presso la comunità scientifica sismologica.

Per quanto riguarda la localizzazione e il calcolo della magnitudo si raccomanda di adottare, nel tempo, delle configurazioni dei parametri che garantiscano un'accuratezza progressivamente maggiore nel dominio interno di rilevazione, secondo lo schema seguente.

Configurazione 0 - deve allinearsi alle procedure di localizzazione assoluta e di stima della magnitudo adottate dalla Rete Sismica Nazionale o da eventuali Reti Sismiche Regionali esistenti nell'area e riconosciute per finalità di protezione civile, nazionale o regionale. In particolare, a questo livello è stimata la magnitudo locale o la magnitudo momento, con procedure omogenee a quelle adottate a scala nazionale o regionale. In aggiunta, possono essere adottati calcoli della localizzazione della magnitudo più accurati tramite calibrazione delle leggi di attenuazione di ampiezza e dei termini di correzione di sito.

Da adottarsi contestualmente all'avvio del sistema di monitoraggio sismico.

Configurazione 1 - deve prevedere: un modello di velocità 1D *ad hoc* per il dominio di rilevazione, supportato da studi specifici e coerente con i dati ottenuti dalla stratigrafia e dalla rete di monitoraggio; l'adozione di eventuali metodi di localizzazione assoluta ritenuti più accurati o completi; la calibrazione dell'intera procedura (es: attraverso la riduzione dei residui di stazione), al fine di migliorare l'accuratezza complessiva del sistema. A questo livello saranno determinate sia la magnitudo locale che la magnitudo momento. Per la stima della magnitudo momento sarà necessario determinare i parametri da utilizzare per la correzione degli effetti di attenuazione anelastica.

Da adottarsi entro la conclusione del terzo anno di monitoraggio.

Configurazione 2 - deve prevedere l'adozione di metodi di localizzazione relativa di precisione e/o di metodi basati sulla coerenza delle forme d'onda registrate (es: cross-correlazione). A questo livello saranno rideterminate sia la magnitudo locale che la magnitudo momento, sarà calcolato il meccanismo focale e stimato il rilascio di sforzo statico (o *stress drop*).

Da adottarsi entro la conclusione del quarto anno di monitoraggio, compatibilmente con la presenza di eventi locali sufficientemente raggruppati nello spazio (*cluster*).

Configurazione 3 - deve prevedere lo sviluppo di un modello di velocità 3D specifico per il dominio di rilevazione e l'adozione di metodi di localizzazione (assoluta o relativa) in grado di utilizzare detto modello. A questo livello saranno rideterminate sia la magnitudo locale che la magnitudo momento e calcolati il meccanismo focale ed il rilascio di sforzo statico (*stress drop*).

Facoltativo, ma raccomandato, senza specifica di tempo.

I risultati delle rilevazioni dovranno essere forniti almeno nella forma di catalogo parametrico degli eventi localizzati, per ognuno delle singole configurazioni adottate, rielaborando a ogni livello superiore anche i dati della sismicità pregressa.

Considerate le caratteristiche tecnologiche, la densità della rete e le metodologie di analisi dei dati suggerite in queste Linee Guida, le reti dedicate saranno in grado di effettuare stime più accurate di localizzazione e magnitudo locale/momento, rispetto alle reti nazionali/regionali, per eventi che accadano in entrambi i domini di rilevazione. Per questo motivo si propone che il sistema decisionale si basi sulle determinazioni di magnitudo, locale o momento, effettuate dalla singola rete dedicata.

Il sistema di riconoscimento della sismicità dovrà avere le seguenti funzioni:

- a) sistema di riconoscimento automatico in modalità di tempo "quasi reale", utilizzato dalla SPM per la verifica dei valori dei parametri selezionati o dei livelli di soglia (cfr. Capitolo 9). L'eventuale occorrenza di attività sismica che si discosti dal quadro ordinario, secondo quanto descritto nel Capitolo 9, dovrà essere segnalata e analizzata con tempestività, seguendo la tempistica definita nello stesso Capitolo;
- b) sistema di riconoscimento e revisione dei dati *off-line* per le analisi di dettaglio, con tempistica definita al Capitolo 9. La SPM dovrà aggiornare il quadro della sismicità nei domini di rilevazione facendo riferimento a un intervallo di tempo corrente (finestra temporale mobile) di alcuni giorni, la cui durata è determinata dal tipo di attività per cui il monitoraggio è stato istituito (cfr. Tabella 1) e dai valori dei parametri selezionati o del livello di soglia eventualmente superato a seguito di eventi pregressi (cfr. Capitolo 9).

| Tipologia di attività                  | $\Delta T_s$ |
|--|--------------|
| Estrazione olio/gas                    | 30 gg        |
| Re-iniezione di fluidi                 | 1-2 gg       |
| Stoccaggio del gas in serbatoi depleti | 10-20 gg     |

Tabella 1 – Durata della finestra temporale corrente ( $\Delta T_s$ ) entro cui deve essere eseguita l'analisi off-line dei dati sismologici in funzione del tipo di attività.

Le presenti Linee Guida non richiedono, in generale, l'istituzione di turnazioni di personale che prevedano la presenza continua di un analista sismologico presso la SPM. Si suggerisce, invece, l'istituzione di un sistema di reperibilità.

I risultati complessivi delle rilevazioni dovranno essere illustrati e analizzati in rapporti periodici, con cadenza indicativa da 3 a 12 mesi (consigliata: 6 mesi). Detti rapporti dovranno descrivere, per

il periodo rendicontato: lo stato di funzionamento della rete, riportando eventuali anomalie, con rappresentazione grafica dello stato on/off quotidiano delle stazioni e del livello del segnale/rumore di fondo; la sismicità rilevata, riportando anche un catalogo parametrico completo e aggiornato; un'analisi delle prestazioni complessive della rete, che viene valutata in funzione della sismicità rilevata e localizzabile (es. stima della magnitudo di completezza di eventi localizzabili); eventuali situazioni in cui la sismicità si discosti dall'ordinario, in accordo a quanto già indicato nel paragrafo precedente. Nel caso si rilevi attività sismica che si discosti dal quadro ordinario, i rapporti saranno predisposti con la tempistica indicata al Capitolo 9.

## **6. CARATTERISTICHE DEL MONITORAGGIO DELLE DEFORMAZIONI DEL SUOLO**

### **6.1 Generalità**

Le attività di estrazione/stoccaggio di idrocarburi e di reiniezione di fluidi nel sottosuolo possono indurre fenomeni di deformazione superficiale anche di notevole entità. Tali effetti deformativi forniscono importanti informazioni sulle caratteristiche dei fenomeni sub-superficiali da cui sono originati e sulla loro evoluzione temporale. Essi hanno tipicamente una dinamica temporale abbastanza lenta e si estendono spazialmente. Pertanto risulta particolarmente appropriato per la loro misura l'utilizzo di tecniche InSAR avanzate, che si basano sull'elaborazione di sequenze temporali di immagini SAR (Sansosti et al., 2010). I risultati delle elaborazioni InSAR (d'ora in avanti, misure InSAR) sono rappresentati da serie temporali di deformazione i cui valori sono relativi ad una zona di riferimento (rappresentata generalmente da un pixel delle immagini SAR, spesso denominato pixel di "aggancio" o di "riferimento"), scelta tipicamente in un'area assunta stabile, e si riferiscono alla componente degli spostamenti superficiali rilevati, proiettata lungo la linea di vista del radar (LOS, acronimo dell'inglese *line of sight*). Queste misure vanno perciò opportunamente integrate con quelle fornite da una rete di stazioni GPS in continuo, che consentono di ottenere informazioni sulle tre componenti degli spostamenti rilevati in corrispondenza delle stazioni riceventi.

Tale sistema di monitoraggio ha l'obiettivo di fornire informazioni sia sull'andamento temporale delle deformazioni del suolo (più precisamente dello strato superficiale del suolo) durante il periodo di osservazione, sia sulla loro distribuzione spaziale nell'area analizzata, evidenziando eventuali variazioni rispetto allo scenario deformativo di *background*.

Si raccomanda anche per il sistema di monitoraggio delle deformazioni del suolo quanto già espresso nel Capitolo 3, ovvero che tale sistema debba essere realizzato o adeguato tenendo conto delle caratteristiche descritte nel seguito ma secondo un principio di opportuna valorizzazione della strumentazione (e dei relativi archivi dati) già esistente.

## 6.2 Caratteristiche tecniche del monitoraggio delle deformazioni del suolo

Si raccomanda che il monitoraggio riguardi la porzione superficiale dei domini di rilevazione (interno ed esteso) ed abbia le seguenti caratteristiche:

- per l'area interessata dal monitoraggio deve essere fornito un quadro delle deformazioni superficiali rilevate attraverso l'utilizzo di misure InSAR effettuate su dati di archivio acquisiti possibilmente negli ultimi 15-20 anni, e comunque relativi almeno agli ultimi 10 anni, con accuratezze dell'ordine di 5 - 10 mm (per le misure InSAR in LOS) e di circa 1 - 2 mm/anno per le stime dei ratei di deformazione. Tali attività possono eventualmente beneficiare di banche dati di misure interferometriche già disponibili, come ad esempio nel caso di quelle ottenute grazie al Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale o alle iniziative effettuate dalle singole regioni. In ogni caso, però, le accuratezze delle misure interferometriche rese disponibili devono essere in linea con quanto sopra specificato;
- il monitoraggio dei fenomeni deformativi del suolo deve essere aggiornato mediante successive misure InSAR con cadenza indicativa da 3 a 12 mesi (consigliata 6 mesi, ma è da valutare alla luce della disponibilità dei dati SAR e della caratterizzazione geologica, strutturale e sismotettonica del sito) e per almeno 3 anni successivi alla fine delle attività di coltivazione, stoccaggio o reiniezione nel sottosuolo. La suddetta cadenza va opportunamente ridotta (intensificazione delle misure) in presenza di variazioni rilevate rispetto al quadro deformativo di *background*, in accordo con quanto indicato nel Capitolo 9. L'aggiornamento delle misure InSAR può essere effettuato sfruttando i dati SAR acquisiti dai sensori attualmente disponibili, quali RADARSAT-2, COSMO-SkyMed e TerraSAR-X, caratterizzati da una politica di acquisizione "*on-demand*"; in tal caso, in aggiunta alle misure InSAR, deve essere disponibile anche l'archivio dei dati grezzi SAR (anche denominati *Level 0*) o delle immagini SAR (generate a piena risoluzione spaziale e spesso definite immagini *SLC*, acronimo di *Single Look Complex*) che sono state utilizzate per il calcolo delle misure InSAR. A partire dal 2015 si raccomanda, però, l'uso dei dati SAR collezionati dai sistemi europei Sentinel-1, che consentiranno di acquisire in breve tempo ed in uno scenario "*free and open access*" un vasto archivio di dati SAR relativi all'intero territorio italiano;
- le misure InSAR aggiornate devono prevedere l'utilizzo di dati SAR acquisiti da orbite ascendenti e discendenti, in modo tale da poter ricostruire le componenti verticale ed orizzontale (E-W) delle deformazioni del suolo rilevate. Nel caso in cui siano disponibili dati SAR collezionati da una sola orbita di acquisizione, si dovrà far riferimento alla componente degli spostamenti proiettata rispetto al *LOS* del radar. Le misure InSAR devono essere generate con formati standard e attraverso metodologie note o in uso presso la comunità scientifica, per le quali devono essere indicate le accuratezze stimate (dipendenti dall'estensione temporale delle sequenze di immagini SAR analizzate e dalle loro caratteristiche); inoltre, le misure InSAR devono essere prodotte con un campionamento compreso tra 30 e 100 m, ottenuto a valle di opportune operazioni di mediatura spaziale;
- i valori di deformazione ottenuti grazie alle misure InSAR vanno integrati/complementati con quelli forniti da una rete GPS in continuo, preesistente o di nuova realizzazione, le cui

caratteristiche vanno adeguate o definite a valle del progetto della rete di monitoraggio delle deformazioni del suolo da parte della SPM (cfr. Capitolo 9). Le informazioni ottenute grazie a tale rete locale GPS, opportunamente inquadrata nel sistema di riferimento internazionale (attualmente ITRF2008), devono permettere di:

- rendere le misure InSAR indipendenti dalla “zona di riferimento” scelta per la loro analisi e rappresentazione,
- rilevare (e correggere) eventuali artefatti che possono essere presenti nelle misure InSAR;
- effettuare eventuali modellazioni 3D del campo di deformazione relativo al dominio di rilevazione.

Pertanto, si raccomanda che la rete locale GPS preveda la presenza di stazioni permanenti di precisione (di tipo geodetico), distribuite opportunamente in funzione dell'estensione e delle caratteristiche dell'area da monitorare ed installate con una adeguata monumentazione adatta a scopi geofisici (ad esempio UNAVCO). In particolare, si richiede che le stazioni abbiano interdistanze inferiori a 10-15 km e che una di esse sia co-locata con la stazione a banda larga della rete di monitoraggio sismico descritta nel Capitolo 5; si suggerisce, inoltre, di valutare la possibilità di installare dei clinometri biassiali in corrispondenza delle stazioni, per poter separare eventuali fenomeni di sito dal fenomeno di deformazione oggetto di studio. È infine necessario verificare l'accesso ai dati acquisiti da almeno altre 5 stazioni GPS in continuo già operanti da almeno due anni e poste a distanza inferiore a 200-300 km dal dominio interno di rilevazione.

- i dati raccolti dalle stazioni GPS vanno resi disponibili sia in formato RINEX, sia come risultato opportuno della loro elaborazione eseguita mediante l'utilizzo di software in uso presso la comunità scientifica (ad esempio software BERNESE). Per ogni stazione GPS devono essere fornite le serie temporali calcolate, su base giornaliera, per le tre componenti degli spostamenti rilevati lungo le direzioni N-S (latitudine), E-W (longitudine) e verticale, e i relativi ratei;
- la SPM (cfr. Capitolo 9) deve valutare l'opportunità di integrare le informazioni sulle deformazioni del suolo, ottenute attraverso le misure InSAR e GPS, con misure di livellazione geometrica di precisione. In tal caso la rete di livellazione, basata su una serie di capisaldi opportunamente spazati e posizionati (tipicamente materializzati su edifici, ponti, etc.), deve essere collegata ad una delle reti esistenti (possibilmente alla rete IGM) ed il suo utilizzo presuppone una buona conoscenza dell'estensione spaziale del campo deformativo superficiale. Le misure di livellazione vanno effettuate con una periodicità non superiore a 2-3 anni al massimo;
- i risultati complessivi delle rilevazioni delle deformazioni del suolo dovranno essere illustrati e analizzati in rapporti periodici, con cadenza indicativa da 3 a 12 mesi (consigliata 6 mesi). Tali rapporti dovranno, per il periodo analizzato:
  - descrivere lo stato di funzionamento del sistema di monitoraggio,
  - fornire informazioni sia sull'andamento temporale delle deformazioni del suolo, sia sulla loro distribuzione spaziale,

- evidenziare eventuali variazioni rispetto allo scenario deformativo di *background*; in questo ultimo caso, i rapporti saranno predisposti con la tempistica indicata nel Capitolo 9.

## **7. CARATTERISTICHE DEL MONITORAGGIO DELLE PRESSIONI DI PORO**

Il valore della pressione statica nel dominio di rilevazione è un utile elemento per l'aggiornamento e la verifica dei modelli di giacimento per gli stoccaggi e le reiniezioni.

La scelta dei pozzi da monitorare sarà basata sulle caratteristiche geologiche dell'area e su criteri di ingegneria di giacimento.

Per i nuovi pozzi di stoccaggio e reiniezione (esclusi i pozzi di produzione), la pressione di poro (o di giacimento) verrà misurata in continuo a fondo pozzo tramite appositi strumenti fissi al fondo ("*surface read-out*"), predisposti al momento del completamento del pozzo stesso, che forniscono una misura in tempo reale.

Per alcuni dei pozzi esistenti verranno utilizzati "*memory gauges*", temporaneamente posizionati al fondo pozzo per una registrazione in remoto della pressione ad intervalli predefiniti. Periodicamente verranno effettuate campagne di misurazione della pressione statica del campo.

Un'ulteriore possibilità per acquisire i valori della pressione è quella di utilizzare pozzi non produttivi, anche ubicati nelle vicinanze, all'esterno del giacimento.

I valori di pressione nel volume circostante i pozzi, che comunque sono di difficile misurazione ed altamente incerti, possono essere stimati effettuando correlazioni con altri pozzi di monitoraggio, anche avvalendosi dell'applicazione di modelli.

Con periodicità almeno semestrale dovranno essere prodotti rapporti di andamento delle pressioni misurate o stimate.

Un maggiore dettaglio negli aspetti descritti potrà essere definito a valle della fase di sperimentazione.



## **8. PUBBLICAZIONE DEI DATI DI MONITORAGGIO E DIVULGAZIONE DELLE INFORMAZIONI**

Con lo scopo di garantire l'efficacia e la trasparenza delle attività svolte, si prevede la realizzazione, sul sito internet del Ministero dello sviluppo economico – DGRME, di un'apposita area contenente sezioni specifiche per le singole concessioni, dedicate alla disseminazione di informazioni sulle attività in corso e dei dati acquisiti nel corso del monitoraggio.

Il modello di tali sezioni sarà identico per tutti i giacimenti oggetto di monitoraggio. I dati del giacimento saranno forniti dal Concessionario, mentre i dati del monitoraggio saranno forniti direttamente dalla SPM (cfr. Capitolo 9). Gli stessi soggetti potranno inoltre realizzare materiale divulgativo, anche in formato cartaceo, e organizzare incontri con la popolazione per illustrare le attività industriali, le attività di controllo della sismicità indotta e della deformazione attraverso il monitoraggio.

Nella sezione del sito internet relativa a ciascuna concessione dovranno essere fornite le seguenti informazioni.

### **8.1 Informazioni sulla concessione**

1. storia
2. caratteristiche del giacimento/sito di stoccaggio
3. descrizione sintetica del modello geomeccanico
4. dati di produzione mensili dall'inizio delle attività
5. FAQ

### **8.2 Introduzione alle attività di monitoraggio (sismicità, deformazioni del suolo, pressioni di poro)**

1. **monitoraggio sismico:** introduzione sulla sismicità; tecniche di misurazione; inquadramento della sismicità naturale regionale; focus sulla sismicità nell'intorno del sito
2. **monitoraggio delle deformazioni del suolo:** introduzione sulle deformazioni del suolo; tecniche di misurazione; inquadramento delle deformazioni naturali regionali; focus sulle deformazioni nell'intorno del sito
3. **monitoraggio della pressione di poro:** introduzione sulle deformazioni del suolo; tecniche di misurazione e di valutazione tramite modelli

### **8.3 Dati generali sui monitoraggi**

1. soggetto che ha progettato le reti, che le ha realizzate e ne cura la manutenzione, che raccoglie e analizza i dati
2. caratteristiche delle reti (mappa generale delle stazioni, numero dei sensori e caratteristiche)
3. dominio interno e dominio esteso di rilevazione (criterio di identificazione, mappa)

#### **8.4 Dati di monitoraggio sismico**

1. Informazioni generali:
  - a) introduzione sulla sismicità
  - b) tecniche di misurazione
  - c) inquadramento della sismicità naturale regionale e focus sulla sismicità nell'intorno del dominio esteso
2. Dati generali sul monitoraggio svolto:
  - a) soggetto che ha progettato le reti, che le ha realizzate e ne cura la manutenzione, che raccoglie e analizza i dati
  - b) caratteristiche delle reti (mappa generale delle stazioni, numero dei sensori e caratteristiche)
3. Dati di monitoraggio sismico:
  - a) localizzazione degli eventi registrati sulla mappa delle stazioni appartenenti alla rete nazionale e locale, nella concessione e nel suo intorno; nella stessa mappa deve essere riportata la localizzazione degli impianti (pozzi, centrale di trattamento, etc.)
  - b) dati di forme d'onda in continuo con formati sismologici standard (es.: miniSeed e/o SAC), completi delle informazioni necessarie per effettuare la correzione strumentale (es: file dataless)
  - c) informazioni aggiornate sulle stazioni (in funzione o temporaneamente non operanti)
  - d) lista completa degli eventi sismici localizzati dall'entrata in esercizio della rete, con aggiornamento in base ai tempi indicati in Tabella 1

#### **8.5 Dati di monitoraggio delle deformazioni del suolo**

1. Informazioni generali:
  - a) introduzione sulle deformazioni del suolo
  - b) tecniche di misurazione
  - c) inquadramento delle deformazioni naturali regionali e focus sulle deformazioni nell'intorno del sito
2. Dati generali sul monitoraggio svolto:
  - a) soggetto che ha progettato le reti, che le ha realizzate e ne cura la manutenzione, che raccoglie e analizza i dati
  - b) caratteristiche delle reti (mappa generale delle stazioni, numero dei sensori e caratteristiche)
3. Dati di monitoraggio delle deformazioni del suolo:
  - a) InSAR: pubblicazione delle misure secondo la cadenza delle rilevazioni
  - b) rilevazioni GPS in continuo: pubblicazione dei dati elaborati con aggiornamento almeno settimanale
  - c) livellazioni geodetiche (ove disponibili)
  - d) pubblicazione dei dati pregressi disponibili

### **8.6 Dati di monitoraggio della pressione di poro**

1. Informazioni generali:
  - a) introduzione sulle pressioni di giacimento
  - b) tecniche di misurazione e di valutazione tramite modelli
2. Dati generali sul monitoraggio svolto:
  - a) soggetto che ha realizzato le reti, che ne cura la manutenzione, che raccoglie e analizza i dati
  - b) caratteristiche delle reti (ubicazione dei pozzi monitorati, numero dei sensori e caratteristiche)
3. Dati di monitoraggio delle pressioni di giacimento:
  - a) misure di fondo pozzo
  - b) pressioni di poro nell'intorno del giacimento, stimate tramite l'applicazione dei modelli a partire dalle misure in pozzo

### **8.7 Documentazione**

1. rapporti di gestione della concessione (annuali)
2. rapporti periodici sui risultati dei monitoraggi, eventuali pubblicazioni scientifiche in merito
3. documento di gestione operativa del monitoraggio (DGOM; cfr. Capitolo 9)

### **8.8 Formazione e accesso al sito**

1. conferenze
2. news ed eventi
3. organizzazione delle visite presso gli impianti (inclusa la modulistica di richiesta)
4. filmati e foto dell'impianto

### **8.9 Link utili**

1. Link ai siti istituzionali di riferimento
2. indirizzo email per eventuali contatti (info@...)

## **9. INDIRIZZI IN MATERIA DI STRUTTURA DI GESTIONE, CONTROLLO E INTERVENTO**

### **9.1 Progettazione, realizzazione e manutenzione delle reti di monitoraggio**

Considerando che attualmente nell'ordinamento nazionale non è prevista una struttura con competenze specifiche idonee al controllo dei monitoraggi volti a individuare possibili effetti di sismicità indotta dalle attività antropiche, in questa fase transitoria è individuato un soggetto tecnico/scientifico altamente qualificato che supporti il MiSE (in particolare gli uffici tecnici UNMIG - Ufficio Nazionale Minerario per gli Idrocarburi e le georisorse), e, più in generale, l'Autorità competente, nella gestione, nell'analisi e nell'utilizzo dei dati dei monitoraggi. Pertanto, nelle more dell'istituzione di un fondo finalizzato all'affidamento diretto dei monitoraggi da parte del MiSE (cfr. Capitolo 2), si propone di seguire i seguenti Indirizzi per l'individuazione di tale struttura, che viene definita Struttura Preposta al Monitoraggio (SPM), organo tecnico MISE. La SPM è costituita da una o più Università o Enti di ricerca di comprovate competenze in materia, eventualmente in consorzio tra loro, o anche con strutture private.

Per ogni concessione sarà designata una SPM che svolgerà, in via esclusiva, il compito di organo tecnico di supervisione dei progetti, raccolta, trattamento e trasmissione dei dati al MiSE e al Concessionario. Le modalità di conferimento dell'incarico saranno stabilite dal MiSE.

Per quanto riguarda la realizzazione e la gestione del monitoraggio – intendendo con il termine “monitoraggio” l'insieme dei tre tipi di monitoraggio previsti, ovvero monitoraggio sismico, delle deformazioni del suolo e della misurazione della pressione di poro – i compiti del Concessionario e della SPM sono suddivisi come spiegato nel seguito.

Il Concessionario, in concerto con la SPM designata, è in carico di predisporre il progetto di monitoraggio, ed è responsabile della realizzazione delle reti (intendendo con ciò l'acquisto, l'installazione o l'eventuale adeguamento della strumentazione), nonché per la loro manutenzione e gestione.

La SPM esamina e valuta il progetto di monitoraggio ai fini della sua approvazione da parte del MiSE ed esegue l'elaborazione, l'analisi e l'interpretazione dei dati. La SPM può anche essere incaricata dal Concessionario di eseguire la realizzazione e la manutenzione delle reti, ferme restando la responsabilità e la copertura dei costi da parte dello stesso Concessionario. Al fine di consentire la completa operatività della SPM, il flusso dei dati in continuo deve essere disponibile direttamente per la SPM.

Concessioni limitrofe possono dotarsi di sistemi di monitoraggio condivisi e a tale scopo possono essere stipulati appositi accordi.

In fase di completamento dell'infrastruttura di monitoraggio (reti, centro di raccolta dati, ecc.), la SPM, il Concessionario, l'UNMIG, la Regione e, ove ricorra, il MATTM si riuniscono per definire le modalità operative di gestione del monitoraggio e di interazione tra i vari soggetti coinvolti, tra cui quelle con cui il Concessionario fornisce con cadenza giornaliera alla SPM i dati di produzione/iniezione/stoccaggio, redigendo un Documento di Gestione Operativa del Monitoraggio (DGOM). Il DGOM dovrà essere reso pubblico mediante le modalità stabilite al Capitolo 8,

salvaguardando comunque la riservatezza industriale dei dati di produzione. All'interno di questo documento saranno indicate le decisioni concordate tra le parti e saranno descritti gli elementi più significativi per la conduzione del monitoraggio nonché, in raccordo con le Amministrazioni competenti, le modalità di comunicazione e informazione al pubblico delle eventuali variazioni dei livelli di attivazione delle azioni da intraprendere (cfr. Capitolo 9.2). In particolare, saranno esplicitate le seguenti informazioni:

- i limiti dei domini di rilevazione;
- i valori dei parametri per il quadro di riferimento e per le soglie del *semaforo* da adottare nell'ambito del modello decisionale specifico per ogni singola concessione (cfr. Capitoli 9.2 e 9.4);
- la procedura con cui sarà messa in atto la riduzione progressiva o la sospensione delle attività di produzione/reiniezione/stoccaggio nel caso di passaggio ai Livelli di attivazione 2 e 3, corrispondenti rispettivamente ai colori arancione e rosso;
- la procedura con cui sarà ripristinata l'attività, nel momento in cui i parametri monitorati siano tornati al di sotto dei valori corrispondenti ai Livelli di attivazione 1 e 0;
- eventuali ulteriori elementi utili all'interpretazione dei dati di monitoraggio.

Nella fase transitoria di cui al Capitolo 2, si ritiene opportuna l'istituzione, sotto il coordinamento del MiSE, di un Tavolo di Lavoro in cui i soggetti che svolgono il ruolo di SPM, insieme con rappresentanti del Ministero dell'ambiente e dei concessionari possano, con cadenza almeno semestrale:

- confrontarsi sulle modalità di attuazione delle presenti Linee Guida;
- analizzare le metodologie applicate nei diversi casi e la qualità dei risultati raggiunti;
- trovare modalità operative quanto più possibile condivise;
- fornire proposte per giungere alla soluzione di eventuali criticità che dovessero emergere nel corso delle attività e nell'implementazione delle presenti Linee Guida.

## **9.2 Sistema di attivazione delle azioni da intraprendere**

Per quanto relativo agli Indirizzi per la gestione del monitoraggio, si propone di adottare, in via sperimentale, un sistema decisionale definito attraverso quattro livelli di attivazione basato sulla valutazione del modello geodinamico dell'area e del quadro complessivo di una serie di parametri monitorati nei domini di rilevazione, quali:

1. la variazione del numero e della frequenza degli eventi sismici, la loro magnitudo e distribuzione spaziale,
2. i valori di picco di accelerazione e di velocità del moto del suolo,
3. la variazione dei ratei di deformazione del suolo,
4. la variazione delle pressioni di poro.

I quattro livelli di intervento sono definiti nella Tabella 2.

| Livello di attivazione | Stato corrispondente       |
|------------------------|----------------------------|
| 0                      | Ordinarietà                |
| 1                      | Attenzione                 |
| 2                      | Riduzione delle attività   |
| 3                      | Sospensione delle attività |

**Tabella 2** – Livelli di attivazione previsti in base alla valutazione del quadro complessivo dei parametri monitorati.

Il sistema decisionale del tipo *a semaforo* prevede delle procedure volte a intraprendere delle azioni associate a diversi livelli di attivazione definiti sulla base di valori di soglia dei parametri monitorati. In base alle conoscenze scientifiche attuali, il Gruppo di Lavoro non ritiene opportuno adottare un modello decisionale con degli automatismi a *semaforo*, legato a valori precisi di soglia, per tutte le varie attività considerate nelle presenti Linee Guida. Infatti, data la variabilità dei contesti geologici, delle profondità e delle modalità con cui le attività di estrazione e coltivazione di idrocarburi sono svolte, della sismicità naturale di fondo e dalla sua profondità, non è possibile stabilire in modo univoco dei valori di soglia per tutti i parametri sopra citati, ma solo per alcuni di essi. In particolare, le variazioni delle deformazioni e dei relativi ratei devono essere valutate caso per caso in funzione della loro distribuzione spaziale e in riferimento al quadro deformativo di fondo.

Pertanto, il modello decisionale proposto prevede che la transizione da un livello all'altro avvenga attraverso valutazioni effettuate di concerto tra la SPM, l'UNMIG, la Regione e il Concessionario, nell'ambito delle rispettive competenze, contestualmente al manifestarsi di un quadro di valori dei parametri fuori dall'ordinario e al riconoscimento di una possibile correlazione tra le variazioni dei parametri monitorati e le attività di coltivazione/stoccaggio in corso.

Si propone, invece, l'adozione in via sperimentale del sistema decisionale a *semaforo*, con automatismi legati a precisi valori di soglia, esclusivamente per le attività di reiniezione di fluidi nel sottosuolo. Questa parte è trattata in dettaglio nel Capitolo 9.4.

I valori di riferimento (o di soglia, per i casi previsti) dei parametri adottati nel DGOM saranno definiti dalla SPM per ogni singola concessione in funzione delle caratteristiche sismotettoniche dell'area di attività. Essi potranno eventualmente essere perfezionati e specificati nel DGOM alla luce dei dati via via acquisiti nel corso delle attività stesse. Si sottolinea l'importanza, durante i primi anni di applicazione delle Linee Guida, di favorire studi e ricerche, nonché occasioni di confronto scientifico, al fine di pervenire, auspicabilmente, all'identificazione di *marker* che permettano di distinguere la sismicità naturale da quella causata dalle attività antropiche.

### 9.3 Fasi di gestione delle attività

Per quanto riguarda le azioni da intraprendere in base agli esiti del monitoraggio, si individuano tre distinte fasi di gestione, da affrontarsi come segue.

### **Fase 1 - Gestione ordinaria del monitoraggio**

Riguarda il caso in cui il quadro dei parametri monitorati nel dominio interno di rilevazione, relativamente alla variazione del numero degli eventi e/o della magnitudo della sismicità, nonché dell'accelerazione e della velocità di picco di moto del suolo, dei ratei di deformazione del suolo e delle pressioni di poro, non si discostino dall'andamento di fondo e si mantengano al di sotto dei livelli di riferimento adottati nel DGOM, o dei valori di soglia nel caso del sistema a semaforo (un esempio di valori indicativi è riportato nel Capitolo 9.4). Tale quadro si colloca nel Livello di attivazione 0 (ordinarietà, colore verde).

La SPM fornisce i dati acquisiti e le elaborazioni effettuate in regime ordinario al Concessionario, all'UNMIG e alla Regione in funzione delle scadenze previste ai Capitoli 5, 6 e 7, e pubblica i dati in internet come descritto nel Capitolo 8. Inoltre, rilascia all'UNMIG e alla Regione un rapporto periodico sulle attività svolte (cfr. Capitoli 5, 6, 7 e 8).

### **Fase 2 - Gestione ordinaria di variazioni nei parametri monitorati**

Nel caso in cui si riscontrino variazioni al di fuori dell'intervallo di variazione di fondo nell'andamento dei parametri monitorati, e/o il superamento dei valori di soglia del semaforo relativi al Livello 0, secondo quanto definito dal DGOM per ogni concessione, si passa al Livello di attivazione 1 (attenzione, colore giallo).

In tal caso, le azioni da intraprendere sono le seguenti.

1. La SPM informa immediatamente il Concessionario l'UNMIG e la Regione.
2. La SPM provvede ad analizzare i segnali del monitoraggio con cadenza giornaliera e a fornire consulenza al Concessionario e agli Enti sopra menzionati.
3. Il Concessionario provvede a fornire i dati di produzione/iniezione/stoccaggio con cadenza possibilmente oraria, comunque al massimo giornaliera, come previsto nel DGOM, nonché le eventuali ulteriori informazioni a sua disposizione, al fine di consentire alla SPM di studiare le variazioni riscontrate in relazione alle attività di produzione, reiniezione o stoccaggio in corso, e verificare, se i dati a disposizione lo consentono, l'occorrenza di eventuali correlazioni. È auspicabile che le metodologie di elaborazione utilizzate permettano, tra l'altro, di evidenziare variazioni dagli andamenti tipici della sismicità di fondo, quali variazioni dell'intervallo di tempo tra eventi, variazioni nel valore di  $b$  della distribuzione della magnitudo, *clustering* spaziali o/e temporali, comportamenti non-poissoniani. Nel frattempo, la produzione, la reiniezione o lo stoccaggio continuano, salvo diverse considerazioni dell'UNMIG e del Concessionario.
4. Se sussistono le condizioni per effettuare in tempi utili analisi di correlazione tra le variazioni dei parametri monitorati e le attività di coltivazione/stoccaggio in corso, e l'esito è negativo, cioè non si rilevano correlazioni, si rientra nel Livello di attivazione 0 (ordinarietà, colore verde). Se invece l'esito è positivo, l'UNMIG, la Regione e il Concessionario, ciascuno per quanto di propria responsabilità e sulla base delle analisi della SPM, stabiliscono se ridurre progressivamente (Livello di attivazione 2, colore arancione) o sospendere (Livello di attivazione 3, colore rosso) le attività di produzione/reiniezione/stoccaggio in corso.

Qualora non sussistano le condizioni per effettuare in tempi utili le analisi di correlazione tra le variazioni dei parametri monitorati e le attività di coltivazione/stoccaggio in corso, l'UNMIG, la Regione e il Concessionario, sulla base delle analisi della SPM, valutano congiuntamente il quadro che emerge dai dati di monitoraggio e stabiliscono, ciascuno per quanto di propria responsabilità, se permanere nello stato di attenzione (Livello di attivazione 1, colore giallo) o eventualmente ridurre progressivamente le attività di produzione/reiniezione/stoccaggio in corso (Livello di attivazione 2, colore arancione). In caso si decida di passare al Livello di attivazione 2 (colore arancione), il Concessionario dà tempestiva comunicazione formale delle azioni intraprese all'UNMIG di competenza (che ne informa a sua volta il MiSE-DGRME), alla Regione e, nei casi di competenza, al Ministero per l'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare – Direzione Generale per le Valutazioni Ambientali, e alla Provincia. Il MiSE-DGRME informa il Dipartimento della Protezione Civile nazionale.

Nel caso in cui, trovandosi nel Livello di attivazione 2, le azioni intraprese non siano considerate sufficienti, l'UNMIG, la Regione e il Concessionario, sulla base delle analisi della SPM, ciascuno per la propria responsabilità, valutano la possibilità di passare al Livello di attivazione superiore (Livello di attivazione 3, colore rosso), sospendendo le attività di produzione/reiniezione/stoccaggio in corso. Il Concessionario dà tempestiva comunicazione formale delle azioni intraprese all'UNMIG di competenza (che ne informa a sua volta il MiSE-DGRME), alla Regione e, nei casi di competenza, al Ministero per l'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare – Direzione Generale per le Valutazioni Ambientali e alla Provincia. Il MiSE-DGRME informa il Dipartimento della Protezione Civile nazionale.

In tutti i casi, la SPM continua ad analizzare i segnali del monitoraggio con cadenza giornaliera e a fornire consulenza al Concessionario e agli Enti sopra menzionati.

Entro dieci giorni dalla riduzione o sospensione delle attività, la SPM verifica se sia avvenuta una variazione dei parametri compatibile con il rientro ad un livello inferiore o, più in generale, un ripristino delle condizioni di fondo o un'inversione di tendenza nelle variazioni osservate. In caso di esito favorevole di uno dei primi due riscontri, il Concessionario comunica agli Enti sopra menzionati che il quadro dei parametri è compatibile con un rientro al Livello di attenzione inferiore e concorda con essi se riprendere o aumentare progressivamente le attività, verificando giornalmente l'andamento dei valori dei parametri monitorati rispetto al Livello raggiunto. Nel caso in cui il quadro dei parametri indichi un'inversione di tendenza nelle variazioni non sufficiente per il rientro nei Livelli inferiori, si permane nel Livello attivato ancora per un periodo di osservazione stabilito congiuntamente da SPM, UNMIG e Regione, sentito il Concessionario. In tutti i casi il MiSE informa il Dipartimento della Protezione Civile nazionale.

Qualora tali condizioni non siano verificate, e dunque permanga l'anomalia dei parametri misurati oltre i tempi sopra definiti, si passa alla Fase 3.



### Fase 3 - Gestione straordinaria di variazioni nei parametri monitorati

Riguarda il caso in cui le procedure poste in essere nella Fase 2 sopra menzionata non determinino una variazione dei parametri compatibile con il rientro ad un Livello inferiore o, più in generale, il ripristino delle condizioni di fondo o l'inversione di tendenza nelle variazioni osservate entro i tempi sopra indicati.

Tale caso rientra in quanto previsto dall'art. 5 della legge 225/1992 e successive modificazioni (imminenza di calamità naturali o connesse con l'attività dell'uomo che in ragione della loro intensità ed estensione debbono, con immediatezza d'intervento, essere fronteggiate con mezzi e poteri straordinari da impiegare durante limitati e predefiniti periodi di tempo).

Il Concessionario, pertanto, sentita la SPM, avvisa tempestivamente l'UNMIG e la Regione. Il MiSE, ricevuta immediata comunicazione dall'UNMIG, informa il Dipartimento della Protezione Civile nazionale, che attiva i propri organismi scientifici e operativi per i seguiti di competenza ai sensi della legge 225/1992.

La Tabella 3 riassume, in forma sintetica ma non esaustiva, le azioni da intraprendere in relazione ai diversi Livelli di attivazione.

| Livello di attivazione | Azioni  |
|------------------------|---|
| 0                      | Per il quadro complessivo delle azioni da intraprendere vedere il testo - par. 9.3 -<br>La SPM fornisce i dati acquisiti e le elaborazioni effettuate in ordinario al Concessionario, all'UNMIG e alla Regione.   |
| 1                      | a) La SPM effettua un'analisi delle variazioni dei parametri monitorati verificandone, ove possibile, l'eventuale correlazione con i dati di produzione/reiniezione/stoccaggio<br>b) La SPM informa immediatamente il Concessionario, l'UNMIG e la Regione<br>c) Il Concessionario fornisce eventuali ulteriori dati sulla produzione, re-iniezione o stoccaggio<br>d) Nel caso sia esclusa, ovvero riscontrata, una correlazione tra le variazioni dei parametri monitorati e i dati di produzione/reiniezione/stoccaggio, si attua, rispettivamente, il rientro al livello 0 di ordinarietà o UNMIG, Regione e il Concessionario, sulla base delle analisi della SPM, fanno una valutazione complessiva delle informazioni disponibili e stabiliscono se ridurre progressivamente (livello di attivazione 2) o sospendere (livello 3) le attività in corso.<br>Nel caso non sia possibile verificare l'eventuale correlazione, UNMIG, Regione e il Concessionario, ciascuno per quanto di propria responsabilità e sulla base delle analisi della SPM, stabiliscono se permanere al livello 1 o passare al livello 2. |
| 2                      | Restano validi i precedenti punti a-c). Inoltre:<br>d) Il Concessionario riduce progressivamente l'attività<br>e) UNMIG, Regione e il Concessionario, sulla base delle analisi della SPM, stabiliscono se sospendere (livello 3) le attività in corso.<br>f) entro 10 giorni dalla riduzione SPM verifica se ci sono le condizioni per il rientro nell'ordinarietà (livello 0) o nel livello 1.   |
| 3                      | Restano validi i precedenti punti a-c). Inoltre:<br>d) Il Concessionario sospende l'attività<br>e) entro 10 giorni dalla sospensione SPM verifica se ci sono le condizioni per il rientro nell'ordinarietà (livello 0) o nei livelli 1 o 2.   |

#### 9.4 Sistema sperimentale a semaforo

In prima applicazione, si propone di sperimentare l'adozione di un sistema a semaforo nel dominio di rilevazione per i pozzi di reiniezione.

Per le attività di reiniezione dei fluidi nel sottosuolo, il sistema a semaforo sarà applicato ai parametri monitorati nel Dominio interno di rilevazione (DI), relativo ai pozzi di reiniezione, come definiti nel Capitolo 5.

I parametri monitorati sono quelli già elencati nel Capitolo 9.1. Come detto, la variabilità dei contesti geologici, delle profondità e delle modalità con cui le attività sono svolte, della sismicità naturale di fondo e dalla sua profondità, non consentono di stabilire in modo univoco dei valori di soglia per tutti i parametri, ma solo per alcuni di essi. In particolare, le variazioni delle deformazioni e dei relativi ratei devono essere valutate caso per caso in funzione della loro distribuzione spaziale e in riferimento al quadro deformativo di fondo.

Le soglie sono indicate per i seguenti parametri: magnitudo (Max), accelerazione di picco al suolo (PGA), e velocità di picco al suolo (PGV). Per l'attivazione del semaforo vanno considerati i valori assunti dai parametri esclusivamente all'interno del dominio interno di rilevazione DI. La Tabella 3 riporta intervalli o valori di riferimento che possono essere adottati per la definizione delle relative soglie. Si sottolinea che quanto in tabella ha valore puramente indicativo, e che i valori di soglia devono essere definiti ed esplicitati nel DGOM caso per caso per ogni concessione, anche in funzione delle caratteristiche sismotettoniche dell'area di attività e comunque dopo il periodo di monitoraggio previsto in condizioni non perturbate (cfr. Capitolo 5.3), in cui viene rilevata la sismicità di fondo.

È opportuno che si preveda un periodo di calibrazione dei valori delle soglie sulla base dei dati via via acquisiti, in modo da evitare l'attivazione di livelli di intervento non adeguati. I valori di soglia dei parametri adottati potranno eventualmente essere riconsiderati e specificati nel DGOM alla luce dei dati raccolti nel corso delle attività stesse.

Per quanto riguarda la magnitudo, la Tabella 4 suggerisce degli intervalli che ricomprendono i valori massimi ( $M_{max}$ ) da adottare per la definizione degli singoli livelli del semaforo. I valori di PGA e PGV, descrittivi dello scuotimento sismico, sono invece univoci e sono stati desunti da quelli usati dal sistema di monitoraggio sismico nazionale dell'INGV per le mappe di scuotimento sismico (*shake maps*; Michelini et al., 2008; <http://shakemap.rm.ingv.it/shake/index.html>). Tali valori servono ad attivare le opportune azioni in relazione allo scuotimento misurato in superficie, percepito e/o potenzialmente capace di provocare danni alle costruzioni. La scelta definitiva dei valori di soglia, sia per la magnitudo sia per lo scuotimento sismico, sarà effettuata dall'UNMIG e dalla Regione, sentito il Concessionario, ciascuno per quanto di propria responsabilità e sulla base delle analisi della SPM, anche tenendo conto delle condizioni di vulnerabilità e di esposizione del territorio su cui insiste l'attività.

| Livello di attivazione | Semaforo | $M_{max}$                          | PGA<br>(% g) | PGV<br>(cm/s <sup>2</sup> ) |
|------------------------|----------|------------------------------------|--------------|-----------------------------|
| 0                      | Verde    | $M_{max} \leq 1.5$                 | -            | -                           |
| 1                      | Giallo   | $M_{verde} \leq M_{max} \leq 2.2$  | 0.5          | 0.4                         |
| 2                      | Arancio  | $M_{giallo} \leq M_{max} \leq 3.0$ | 2.4          | 1.9                         |
| 3                      | Rosso    | $M_{arancio} < M_{max}$            | 6.7          | 5.8                         |

**Tabella 4** – Intervalli o valori indicativi dei parametri di monitoraggio rilevati nel dominio interno di rilevazione (DI) da utilizzare come riferimento per la definizione delle soglie. Sono definiti i seguenti parametri: magnitudo massima ( $M_{max}$ ), accelerazione di picco al suolo (PGA) e velocità di picco al suolo (PGV).

Affinché si passi da un livello all'altro del semaforo è sufficiente che uno dei parametri elencati in Tabella 4 (misurato nel dominio interno di rilevazione DI) superi le soglie indicate. Tuttavia, come detto in precedenza, si può passare da un corrispondente livello di attivazione all'altro anche sulla base della valutazione complessiva delle variazioni osservate nei domini di rilevazione (es. numerosità degli eventi e aumento della loro frequenza).

In caso di impossibilità a stabilire la suddetta correlazione o di assenza di correlazione, pur perdurando valori dei parametri di monitoraggio al di sopra delle soglie, la SPM informa il Concessionario, l'UNMIG e la Regione che valuteranno la possibilità di sospendere/continuare l'attività e intraprendere misure aggiuntive per monitorare l'evoluzione del fenomeno.

Si ribadisce la necessità di realizzare studi e ricerche per l'identificazione di *marker* che permettano di distinguere la sismicità naturale da quella eventualmente causata dalle attività antropiche, e che permettano la definizione di valori di soglia robusti in funzione delle diverse attività svolte.

Le fasi di gestione descritte nel Capitolo 9.3 possono evidentemente integrare le indicazioni derivanti dal sistema a semaforo, associando i livelli di attivazione ai corrispondenti colori del semaforo e considerando che il superamento delle soglie del semaforo stesso determina l'adozione diretta delle azioni previste per i vari livelli nelle diverse fasi.

Nel caso venga direttamente superato il terzo valore di soglia del semaforo (semaforo rosso), il Concessionario riduce le attività di produzione/reiniezione/stoccaggio in corso e dà tempestiva comunicazione formale delle azioni intraprese all'UNMIG di competenza (che ne informa a sua volta il MiSE-DGRME), alla Regione e, nei casi di competenza, al Ministero per l'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare – Direzione Generale per le Valutazioni Ambientali e alla Provincia. La l'UNMIG, la Regione e il Concessionario, ciascuno per quanto di propria responsabilità e sulla base delle analisi della SPM, possono sospendere le attività di produzione/reiniezione/stoccaggio in corso. Il MiSE-DGRME informa il Dipartimento della Protezione Civile nazionale circa le decisioni prese e le azioni in corso.

## 10. CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI

I presenti “Indirizzi e Linee Guida” nascono dalla necessità di adeguare gli standard di sicurezza nelle attività di sottosuolo, vista che il territorio italiano è interessato da terremoti naturali. Essi costituiscono il primo documento nazionale in cui si raccolgono in modo organico e dettagliato le specifiche tecniche delle reti di monitoraggio, e gli indirizzi in merito al quadro decisionale e alle procedure attraverso le quali i risultati dei monitoraggi vengono utilizzati per effettuare azioni. Il documento contiene alcuni elementi per i quali vi è una scarsa esperienza operativa, pertanto si insiste sul fatto che le indicazioni in esso fornite debbano essere rivalutate, in base all’esperienza diretta, indicativamente a due anni dalla loro prima applicazione sperimentale in siti pilota.

Uno dei temi su cui vi è stata immediata e unanime concordanza di parere è stato quello che riguarda le attività estrattive che comportano la reiniezione dei fluidi. Al fine di ridurre al minimo il potenziale impatto, per queste attività si raccomanda di:

1. preservare il carico naturale originale, mantenendo il bilancio di fluidi estratti e reiniettati il più vicino possibile allo zero;
2. mantenere la pressione di reiniezione il più possibile vicina a quella originale naturale, comunque da valutare in base ai test di iniettività.

Il Gruppo di lavoro si è trovato di fronte ad alcune notevoli difficoltà, dovute principalmente:

- alla peculiarità del territorio italiano rispetto a quello di altri paesi; l’Italia è probabilmente uno dei pochi paesi ad avere una esposizione media/elevata ai terremoti su quasi tutto il proprio territorio;
- alle limitate conoscenze scientifiche a supporto del riconoscimento chiaro e univoco della sismicità indotta dalla cosiddetta sismicità innescata o eventualmente naturale;
- alla mancanza di metodologie consolidate e diffuse di analisi, statistiche o fisiche, che permettano di correlare la sismicità rilevata alle attività produttive entro il tempo massimo di uno/due giorni, necessario per prendere delle decisioni.

Uno dei punti intensamente analizzati è stato quello della struttura organizzativa generale, per la quale si riteneva indispensabile assegnare il compito di progettare le reti di monitoraggio, analizzare e interpretare i dati, a soggetti pubblici qualificati, separare il legame diretto tra il Concessionario e il soggetto preposto al monitoraggio in modo da garantire l’indipendenza delle valutazioni scientifiche e, infine, istituire un livello di verifica e controllo sull’attività di monitoraggio svolta. Come indicato nel Capitolo 2, si ribadisce il suggerimento di prevedere l’istituzione presso il MiSE di un apposito fondo, alimentato dai Concessionari, con cui il MiSE stesso possa curare direttamente l’affidamento dei monitoraggi mediante procedure pubbliche. Pertanto le indicazioni fornite nel Capitolo 9 devono essere considerate come la migliore soluzione possibile, a parere del Gruppo di Lavoro, stante l’attuale quadro normativo.

Un altro punto affrontato è stato quello della definizione delle aree su cui effettuare il monitoraggio e di come attuare procedure decisionali efficaci. Soprattutto per il monitoraggio sismico, è stato necessario considerare e sintetizzare, in un impianto formale semplice e applicabile, le esperienze derivate da differenti attività produttive. Alla fine, il principio unificante è stato individuato nella definizione di due volumi, chiamati rispettivamente “domino interno di rilevazione” e “domino esteso di rilevazione”, in base alle posizioni dei pozzi e all’estensione del giacimento o del serbatoio di stoccaggio. Il domino interno di rilevazione del monitoraggio sismico circonda i punti (pozzi) o la zona sorgente (giacimento) delle attività con un raggio limitato ma sufficientemente ampio da includere i fenomeni di sismicità indotta. Per il dominio interno di rilevazione, la rete di monitoraggio sismico dovrà avere la massima sensibilità, in modo tale da consentire l'utilizzo di tecniche raffinate per la localizzazione dei terremoti e la ricostruzione di variazioni nei modelli di velocità nonché, laddove i dati lo consentiranno, di tracciare l'eventuale migrazione della sismicità.

Il riconoscimento di dettaglio della sismicità naturale nel volume circostante a quello dove sono svolte le attività e l'eventuale occorrenza di sismicità connessa all'attività antropica, che in tale ambito può essere ricondotta nella categoria della sismicità innescata, è presa debitamente in conto dal volume del dominio esteso di rilevazione, di cui si dà un criterio di quantificazione minima, e che comunque può essere ulteriormente allargato, qualora lo si ritenga opportuno. Sebbene con precisione e sensibilità minori, il livello di osservazione nel dominio esteso di rilevazione permette di cartografare la sismicità e le deformazioni del suolo con l'accuratezza necessaria.

L'ultimo punto trattato è quello che riguarda gli indirizzi in merito alle decisioni da adottare in funzione dei risultati del monitoraggio. È stato scelto un approccio ripartito su quattro livelli di attivazione utilizzati come standard internazionali, stabiliti in base al quadro complessivo di rilevazione dei parametri monitorati, prevedendo anche delle modalità “di rientro” all'ordinarietà. Si noti che il Livello di attivazione 2, quello giallo, rappresenta un livello di “attenzione”, importantissimo per permettere alla SPM di disporre per tempo di un quadro scientifico conoscitivo derivante dalle rilevazioni per l'eventuale adozione di azioni di riduzione o sospensione delle attività antropiche. È stata poi suggerita l'adozione, in via sperimentale, di un sistema a semaforo solo per le attività in cui è prevista la reiniezione di fluidi nel sottosuolo. I semafori sono definiti da soglie basate sulla magnitudo e sul moto del suolo all'interno dei domini di rilevazione. Si è valutata la possibilità che le decisioni dovessero avvenire a seguito di analisi atte a stabilire in tempi rapidi una possibile correlazione tra la sismicità rilevata e le attività in corso. Questa possibilità è stata prevista ma, nella consapevolezza delle intrinseche difficoltà di attuazione, la si ritiene un'opzione che avrà maggiore applicabilità in futuro, quando saranno maturate conoscenze e metodologie scientifiche consolidate, capaci di fornire risposte immediate e affidabili per la realtà italiana. Il Gruppo di Lavoro auspica che su questo tema si sviluppi una forte attività di ricerca, volta a fornire in tempi rapidi gli strumenti necessari per una loro applicazione nel semaforo. Più in generale, si suggerisce di dare impulso ad alcune linee di ricerca specifiche da parte dei Ministeri o di altre Istituzioni competenti, tra cui:

- riconoscimento e caratterizzazione della sismicità indotta, innescata e naturale;
- sviluppo di metodologie rapide e applicabili per stabilire la correlazione tra i vari parametri monitorati e l'attività di coltivazione del sottosuolo;

- analisi del significato dei valori osservati in funzione dei parametri di produzione/reiniezione/stoccaggio;
- modalità di integrazione della sismicità indotta nelle stime di pericolosità sismica di tipo *time dependent*.

Roma, 24 novembre 2014

Ing. Gilberto Dialuce

Dott. Claudio Chiarabba

Dott.ssa Daniela Di Bucci

Prof. Carlo Doglioni

Prof. Paolo Gasparini

Ing. Riccardo Lanari

Dott. Enrico Priolo

Prof. Aldo Zollo

## GLOSSARIO

1. **Autorità Competente:** l'individuazione di una Autorità Competente in esame deve essere introdotta da opportuna definizione legislativa. Attualmente, in mancanza di riferimenti nell'ordinamento nazionale, in materia di coltivazione del sottosuolo, per Autorità competenti si intendono, per quanto di pertinenza: l'UNMIG per la sicurezza e la vigilanza delle attività minerarie con specifico riferimento all'esplorazione e la coltivazione di idrocarburi e agli stoccaggi; il MATTM per quanto riguarda gli aspetti della valutazione di impatto ambientale; le Regioni per le autorizzazioni alla reiniezione e per le intese per il rilascio dei titoli, nonché per la competenza esclusiva nel settore delle attività geotermiche; le Province per le attività di cave e miniere per i minerali solidi.
2. **Carico litostatico:** il carico litostatico (comprendente i fluidi) in ambienti tettonici estensionali coincide con la direzione dell'asse principale del massimo tensore degli sforzi. L'aumento del carico litostatico determina una crescita dello stress differenziale che può portare all'attivazione o innesco di faglie attive. Viceversa, il carico litostatico in ambienti compressivi è il minimo tensore di sforzo, e la sua diminuzione aumenta a sua volta lo stress differenziale, facilitando l'attivazione o l'innesco di faglie attive. In ambienti tettonici trascorrenti il carico litostatico è il tensore intermedio degli sforzi. Pertanto tali modifiche del campo di sforzo devono essere attentamente monitorate e valutate nel volume crostale coinvolto dall'attività mineraria, al fine di non turbarne l'equilibrio.
3. **Concessionario:** il titolare di una concessione di risorse minerarie e, in particolare, di idrocarburi e di stoccaggio sotterraneo di gas naturale. Il concessionario è per la normativa di sicurezza italiana di recepimento comunitario (D.Lgs. 624/1996 di recepimento delle direttive 92/91/CEE e 92/104/CEE) il titolare responsabile della sicurezza delle attività, della redazione ed attuazione del piano di sicurezza e di emergenza, e del documento di sicurezza e salute coordinato depositato presso l'autorità di vigilanza, nel cui ambito devono essere disposte tutte le misure di prevenzione del rischio, di monitoraggio e di intervento in materia di sicurezza.
4. **Deformazione del suolo:** cambiamento di forma, volume e/o della posizione di una o più porzioni dello strato superficiale che ricopre la crosta terrestre.
5. **Faglia attiva:** faglia che presenta evidenze di scorrimento relativo tra due volumi di roccia/terreno avvenuto nel corso degli ultimi 40.000 anni, per cui si presume che lo scorrimento possa ancora verificarsi.
6. **Faglia sismogenica:** faglia in grado di generare terremoti. Al fine di stimare la pericolosità sismica, l'aggettivo sismogenico viene attribuito alle faglie presenti in quella parte della litosfera che si trova al di sopra della transizione fragile-duttile e che è caratterizzata da un prevalente comportamento elasto-fragile e/o elasto-frizionale delle rocce.
7. **Giacimento (reservoir):** struttura geologica con caratteristiche che hanno consentito, nel tempo, l'accumulo e la conservazione degli idrocarburi. La presenza di particolari assetti

geologico/strutturali nel sottosuolo (trappole) ha determinato condizioni potenzialmente favorevoli all'accumulo degli idrocarburi, impedendone la migrazione, e quindi la dispersione. Una volta depletato, dopo aver valutato la capacità volumetrica totale (stock) e le caratteristiche petrofisiche (porosità, permeabilità, saturazioni gas/acqua), può essere in taluni casi essere convertito a sito di stoccaggio. Il giacimento è un sistema roccioso poroso e permeabile, strutturalmente complesso, caratterizzato da proprietà geominerarie eterogenee che influiscono sui volumi in gioco e sul movimento dei fluidi.

8. **Interferometria SAR differenziale (DInSAR o più semplicemente InSAR):** tecnica per la stima delle deformazioni del suolo con accuratezza dell'ordine di frazioni della lunghezza d'onda del segnale radar trasmesso nella banda delle microonde.
9. **Magnitudo Locale:** la magnitudo locale ( $M_L$ ) o magnitudo Richter, è stata introdotta da Richter (1935) La definizione originale della magnitudo locale è basata sulla misura dell'ampiezza di un sismogramma registrato da un sismografo standard chiamato Wood-Anderson:

$$M_L = \log_{10} A - 1.67 + 2.56 \log \Delta \quad (1)$$

dove  $A$  è l'ampiezza massima del moto del suolo, corretto per la risposta strumentale, misurata in  $\mu\text{m}$  e  $\Delta$  è la distanza in km ( $\Delta < 600$  km). La magnitudo locale  $M_L$  è raramente utilizzata oggi nella sua formulazione originaria dal momento che i sismografi a torsione Wood-Anderson non sono più disponibili e perché, naturalmente, la maggior parte dei terremoti non avviene in California. Per questo motivo i coefficienti dell'equazione (1) vanno opportunamente ri-calibrati mediante specifiche analisi preliminari sui sismogrammi acquisiti nella regione d'interesse. Con l'avvento delle registrazioni digitali dei terremoti, è oggi pratica corrente calcolare la magnitudo locale dalla conversione dei sismogrammi in registrazioni simulate a un sismometro Wood-Anderson.

10. **Magnitudo Momento ( $M_w$ ):** la magnitudo momento ( ) è stata introdotta da Kanamori (1977) e Hanks e Kanamori (1979) per misurare la grandezza di un terremoto in termini di rilascio di energia. Si basa su di un parametro di sorgente, il momento sismico scalare ( ), che esprime il momento di una delle due coppie di forze che generano la dislocazione all'origine del terremoto e che risulta uguale al prodotto tra la rigidità delle rocce ( ) nella zona sorgente, la dislocazione finale media sulla superficie di frattura ( ), e la dimensione dell'area di faglia ( ):

La scala di magnitudo-momento è pertanto definita in termini della magnitudo ( ) che si ottiene dal momento sismico attraverso la relazione:

-

in cui ( ) è espresso in Nm. Questa scala di magnitudo, pur essendo calibrata sulla (magnitudo dalle onde di superficie), gode della importante proprietà che non satura al crescere della magnitudo.

11. **Meccanismo focale:** il meccanismo focale di un terremoto descrive la deformazione nella regione sorgente da cui sono irradiate le onde sismiche. Nel caso di un evento sismico prodotto dalla frattura lungo una superficie di faglia, il meccanismo focale fornisce l'informazione sull'orientazione nello spazio del piano di faglia e del vettore di dislocazione ed è anche conosciuto come "soluzione del piano di faglia". Per descrivere l'orientazione di tale piano in un sistema di coordinate geografiche sono necessari due angoli, l'orientazione



(o *strike*) e la pendenza (o *dip*). La direzione di dislocazione è invece specificata mediante una di due quantità alternative che descrivono la direzione media di dislocazione (*rake* o *plunge*).

12. **Memory Gauge:** tipo di misuratore /manometro elettronico di pressione che campiona e registra la pressione a fondo pozzo, raccogliendo i dati e rendendoli adatti al download su apparecchi di acquisizione quando lo strumento montato viene ritirato in superficie. I memory gauges sono generalmente utilizzati per misurare la pressione e la temperatura a fondo pozzo in risposta alla variazione dei tassi di produzione nei test di verifica di produttività del pozzo e delle performance del reservoir.

13. **Pore pressure:** si intende la pressione dell'acqua all'interno dei pori di un mezzo saturato e si indica con la lettera (P). Quando è presente il fluido all'interno delle rocce, la forza effettiva  $\sigma_n$  è ridotta da una quantità equivalente alla pressione di poro, e lo stress di taglio ( $\tau$ ) richiesto per causare scivolamento è ridotto secondo la seguente legge:

$$(1) \tau_{crit} = \mu (\sigma_n - P)$$

Questa riduzione nella forza effettiva sulla faglia crostale è il meccanismo essenziale della sismicità indotta. Per uno stato di stress tettonico costante, la forza effettiva sulla faglia crostale può essere ridotta al di sotto della soglia critica da un aumento della pressione di fluido contenuta all'interno delle rocce, che porta all'improvviso scivolamento e all'avvenimento di un terremoto.

14. **Sistema di acquisizione/trasmissione dei dati in tempo "quasi reale":** si intende il tipo di acquisizione e trasmissione attraverso cui il dato, una volta raccolto dallo strumento di acquisizione (stazione sismologica), è inviato immediatamente al sistema di elaborazione e archiviazione attraverso pacchetti di dati a lunghezza finita. Nel tempo quasi-reale il sistema rilascia l'informazione con una cadenza temporale non rigorosamente definita e rispettata, così come accade per i sistemi in tempo-reale. Nei sistemi a tempo quasi-reale il ritardo con cui viene rilasciata l'informazione è in genere dell'ordine di frazioni di secondo per il sistema di acquisizione e dell'ordine di decine di secondi fino a pochi minuti per il sistema di elaborazione e localizzazione ed eventuale segnalazione.

15. **Sismicità indotta:** sismicità generata da variazioni del campo di stress attribuibili ad attività antropiche (McGarr et al., 2002) o a fenomeni naturali non legati alla deformazione tettonica della crosta terrestre (es: precipitazioni atmosferiche).

16. **Sismicità innescata:** Per sismicità innescata s'intende un'attività naturale la cui enucleazione è stata anticipata da attività antropiche e in particolare dalla sismicità indotta. Le attività antropiche sono responsabili solo di una minima frazione delle variazioni del campo di stress che genera la sismicità, mentre il ruolo stress pre-esistente dovuto alla tettonica.

17. **Sismicità naturale:** sismicità prodotta da variazioni del campo di sforzo dovuto alla deformazione tettonica della crosta terrestre.

18. **Synthetic Aperture Radar (SAR):** modalità di acquisizione da parte di sistemi radar coerenti in grado di consentire la generazione, a seguito di opportuna elaborazione dei dati acquisiti, di immagini a microonde con elevate risoluzioni spaziali (metro/decina di metri).

19. **Rilascio di sforzo (o stress-drop):** il rilascio di sforzo è la differenza tra lo sforzo iniziale e finale lungo la superficie di faglia, dopo l'occorrenza di un episodio di frattura che dà luogo ad un terremoto. Esso è un parametro fisico generalmente variabile sulla superficie di faglia, ma viene solitamente indicato e misurato il suo valore medio. Il rilascio di sforzo si distingue in *statico (static stress drop)*, differenza tra lo sforzo iniziale ed il livello di attrito statico a frattura avvenuta, o *dinamico (dynamic stress drop)*, differenza tra lo sforzo iniziale ed il livello di attrito dinamico durante l'evoluzione della frattura.
20. **UNMIG:** Ufficio Nazionale Minerario per gli Idrocarburi e le Georisorse, della Direzione generale delle Risorse Minerarie ed Energetiche (DGRME) – Ministero dello sviluppo economico – Ufficio tecnico, articolato sul territorio, con compiti di gestione tecnico-amministrativa delle attività di prospezione, ricerca, coltivazione e stoccaggio di idrocarburi, vigilanza e controllo sugli impianti, prevenzione infortuni, sicurezza e salute dei lavoratori sia in terraferma che in mare.
21. **Surface Readout (SRO):** termine generico che indica una Lettura superficiale (Surface) tramite invio di una informazione trasformata in forma leggibile (read out). Nel caso specifico indica la lettura superficiale dei dati di fondo pozzo in superficie per mezzo di una linea elettrica.
22. **SPM - Struttura Preposta al Monitoraggio:** soggetto tecnico-scientifico, costituito una o più Università o Enti di ricerca di comprovate competenze in materia, eventualmente in consorzio tra loro, o anche con strutture private, competente in materia di progettazione e gestione di reti di monitoraggio, raccolta e analisi dei dati, cui vengono conferiti dall'Amministrazione competente compiti di raccolta e analisi dei dati di monitoraggio e di supporto all'Amministrazione nelle valutazioni conseguenti. La SPM può inoltre effettuare la progettazione e la realizzazione delle reti.

## APPENDICE A

### Raccomandazioni rapporto ICHESE (p. 196):

*“Le attività di sfruttamento di idrocarburi e dell'energia geotermica, sia in atto che di nuova programmazione, devono essere accompagnate da reti di monitoraggio ad alta tecnologia finalizzate a seguire l'evoluzione nel tempo dei tre aspetti fondamentali: l'attività microsismica, le deformazioni del suolo e la pressione di poro. Queste reti dovrebbero essere messe in funzione al più presto, già quando si attende la concessione, in modo da raccogliere informazioni sulla sismicità ambientale precedente all'attività per il più lungo tempo possibile. Il monitoraggio microsismico può fornire indicazioni sulla attività delle faglie e sui meccanismi di sorgente che possono essere utili alla caratterizzazione delle zone sismogeniche.*

*Il monitoraggio sismico dovrebbe essere effettuato con una rete locale dedicata capace di rilevare e caratterizzare tutti i terremoti di magnitudo almeno 0,5  $M_L$ .*

*Le deformazioni del suolo devono essere rilevate principalmente con metodi satellitari. Dovrebbero essere utilizzate tecnologie interferometriche (INSAR) e GPS che permettono di identificare processi di subsidenza con una risoluzione di alcuni millimetri all'anno.*

*La pressione dei fluidi nei serbatoi e nei pori delle rocce deve essere misurata al fondo dei pozzi e nelle rocce circostanti con frequenza giornaliera.*

*Infine, utilizzando l'esperienza di altri casi simili nel mondo e le caratteristiche geologiche e sismotettoniche dell'area in studio, deve essere generato un sistema operativo "a semaforo", e devono essere stabilite le soglie tra i diversi livelli di allarme.*

*È consigliabile che tutti i dati sismici vengano continuamente analizzati con metodologie statistiche per evidenziare variazioni dagli andamenti tipici della sismicità di fondo, quali variazioni dell'intervallo di tempo tra eventi, variazioni nel valore di b della distribuzione della magnitudo, clustering spaziali o/e temporali, comportamenti non-poissoniani. L'utilizzo di metodologie ETAS e di eventuali altre nuove metodologie va incoraggiato.*

*È necessario che i dati rilevanti per il conseguimento di quanto sin qui indicato e in possesso delle compagnie siano da esse messi a disposizione degli enti responsabili per il controllo.*

*Infine, l'implementazione di un Programma di Interazione e Comunicazione con la popolazione e gli amministratori locali ha una importanza critica perché venga acquisita fiducia nella gestione ottimale delle operazioni."*

## BIBLIOGRAFIA

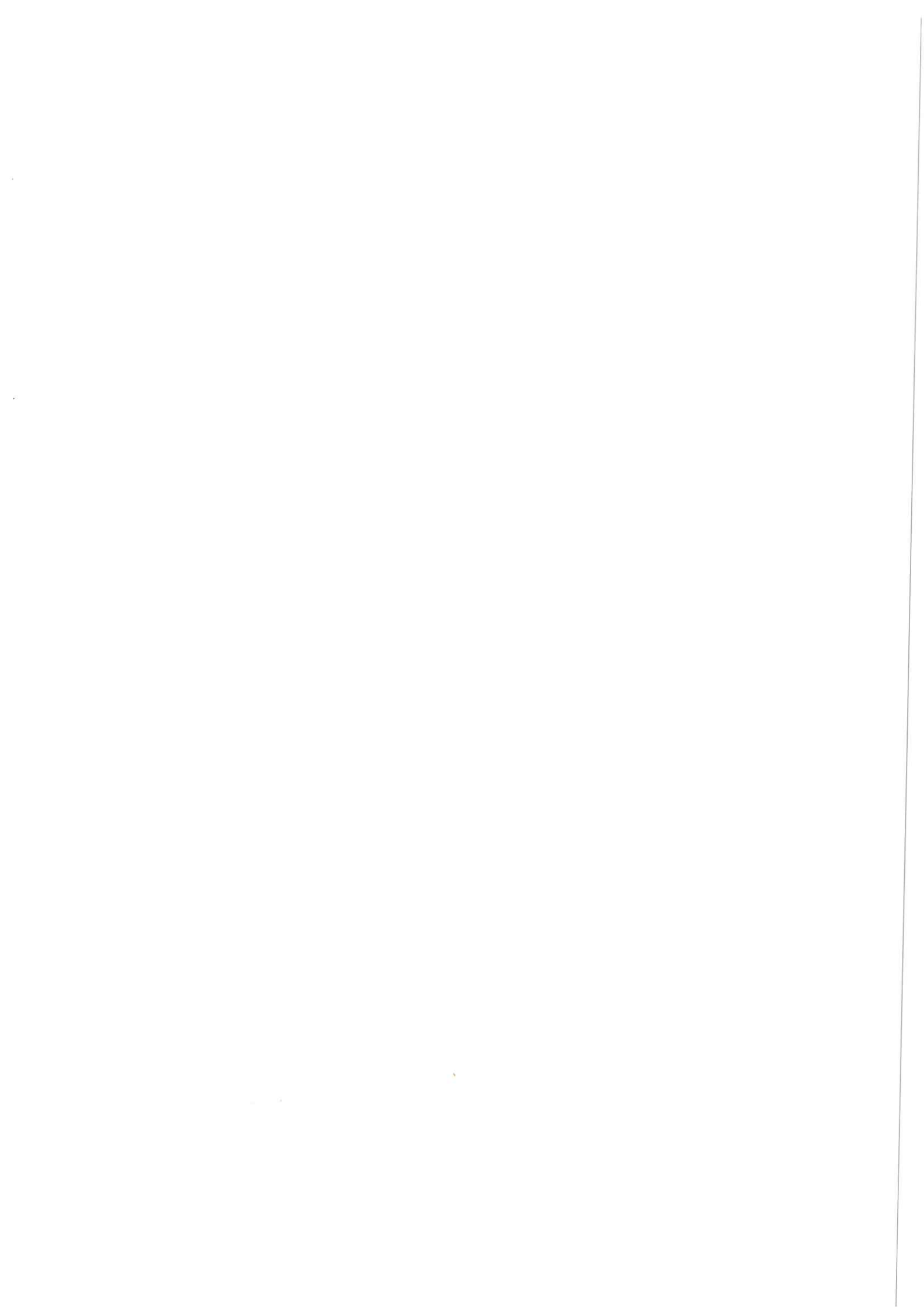
1. Hanks, T.C. and H. Kanamori (1979). Moment magnitude scale, *Journal of Geophysical Research* 84 (B5): 2348–50).
2. H. Kanamori (1977). The energy release in great earthquakes. *J. Geophys. Res.* 82, 2981-2987).
3. International Commission on Hydrocarbon Exploration and Seismicity in the Emilia Region Report (2014).
4. ISPRA, Rapporto sullo stato delle conoscenze riguardo alle possibili relazioni tra attività antropiche e sismicità indotta/innescata in Italia (2014).
5. Legge 24 Febbraio 1992, n.225, Istituzione del Servizio Nazionale della Protezione Civile. (GU n.64 del 17-3-1992. Suppl. Ordinario n.53).
6. MATTM, – Commissione VIA – VAS (2013). Relazione del gruppo di lavoro per la formulazione di prescrizioni inerenti il monitoraggio microsismico, geodetico e termodinamico negli stoccaggi di gas.
7. McGarr, A., D. Simpson, and L. Seeber (2002), 40. Case histories of induced and triggered seismicity, *International Geophysics*, 81A, 647-661  
Michellini, A., Faenza, L., V., Lauciani, and L. Malgini, 2008. ShakeMap implementation in Italy. *Res. Lett.* 79, 688-697.
8. Michellini, A., Faenza, L., V., Lauciani, and L. Malgini, 2008. ShakeMap implementation in Italy. *Res. Lett.* 79, 688-697.
9. Richter, C.F. (1935). An instrumental earthquake magnitude scale". *Bulletin of the Seismological Society of America* 25 (1-2): 1–32).
10. Sansosti, E., Casu, F., Manzo, M., Lanari, R., 2010, Space-borne radar interferometry techniques for the generation of deformation time series: An advanced tool for Earth's surface displacement analysis, *Geophysical Research Letters*, 37, DOI: 10.1029/2010GL044379.
11. Seismic hazard due to small-magnitude, shallow-source, induced earthquakes in The Netherlands - Torild van Eck\*, Femke Goutbeek, Hein Haak, Bernard Dost  
Seismology Division, Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI) - Engineering Geology - Volume 87, 105-121, 2006.
12. TNO – 2008-U-R1071/B – Berghermeer seismicity study.
13. Zollo A. e Emolo A., *Terremoti e onde: Metodi e pratica della sismologia moderna*, 2011, Liguori ed., Napoli.



**IMPIANTO PILOTA GEOTERMICO TORRE ALFINA**  
**Studio di Impatto Ambientale**

**ALLEGATO G**  
**SISMICITA' INDOTTA O INNESCATA**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'M. Bolero', is located in the lower right quadrant of the page.



## 1 INTRODUZIONE

Nel presente rapporto vengono fornite informazioni relative :

1. alla fisica del processo e relative equazioni matematiche,
2. alla sismicità indotta nei campi geotermici toscani, gli unici in esercizio in Italia,
3. alla sismicità indotta nei campi geotermici di Latera e Torre Alfina dalle operazioni di estrazione e reiniezione dei fluidi eseguite da Enel negli anni '70 e '80,
4. al problema della sismicità indotta da iniezione di fluidi in campi geotermici a livello mondiale.

A conclusione viene infine fornito l'elenco dei rapporti e pubblicazioni scientifiche citati.

## 2 FISICA DEL PROCESSO

Il problema della sismicità indotta (SI) o innescata dalla iniezione di fluidi nel sottosuolo è una questione affrontata da molti anni, non solo nei campi geotermici ma anche in quelli petroliferi, a gas o in operazioni minerarie. Per quanto riguarda la fisica del processo si riporta di seguito il trattamento di Cladouhos et al. (2010).

*“ La SI avviene quando la pressione del fluido in una faglia o frattura raggiunge un valore critico al di sopra del quale è superato l'attrito che impedisce lo scivolamento della faglia. Lo scivolamento dinamico di una faglia che causa SI comincia a una pressione critica del fluido ( $P_c$ ) che riduce lo stress normale effettivo attraverso un piano di faglia pre-esistente ( $\delta_{eff}$ ) tanto che lo stress critico o stress di taglio ( $T_c$ ) viene superato. Assumendo una profondità di interesse costante:*

$$\delta_{eff} = \delta_n - P_c$$

$$T_c < \delta_{eff} \mu$$

dove  $\delta_n$  è lo stress normale al piano di faglia e  $\mu$  è il coefficiente di attrito statico sul piano di faglia. Per la SI la pressione critica è una combinazione della pressione iniziale o pressione in sito prima dell'iniezione,  $P_0$ , e del cambiamento di pressione applicato  $\Delta P_c$ , necessario per causare lo scivolamento

$$P_c = P_0 + \Delta P_c$$

Assumendo una tavola d'acqua vicina alla superficie,  $P_0$  sarà leggermente inferiore alla pressione idrostatica  $P_h$ . Comunque le tavole d'acqua in aree con risorse geotermiche possono essere piuttosto profonde, in condizioni sottopressurizzate ( $P_0 \ll P_h$ ). Sovrapressioni o condizioni artesiane ( $P_0 > P_h$ ) possono ugualmente esistere. In generale per la SI, la pressione critica sarà raggiunta riempiendo un pozzo con acqua e pompando

$$P_c = P_h + P_{wp} - P_{fric}$$

Dove  $P_{wp}$  è la pressione a bocca pozzo e  $P_{fric}$  sono le perdite di flusso per attrito al di sotto del pozzo e lungo il percorso di flusso nelle fratture. Esiste la possibilità che in regioni naturali sottopressurizzate ( $P_0 \ll P_h$ ) la pressione critica possa essere raggiunta prima di aver completamente riempito il pozzo con il fluido e applicato la pressione di testa pozzo

$$P_c < P_h$$

$\Delta P_c$  dipende dall'ambiente tettonico dove è stato perforato il pozzo.  $\Delta P_c$  può essere relativamente piccolo in masse rocciose già o vicine allo stato di stress critico, per esempio masse rocciose che hanno già sperimentato sismicità naturale. Al momento,  $\Delta P_c$  non può essere determinata con precisione prima dell'iniezione. Il massimo cambiamento effettivo della pressione o dell'aumento di pressione di un progetto di iniezione dipende dalla capacità di monitorare la sismicità e controllare la pressione”.

È quanto ci si prefigge di fare nella gestione dei progetti geotermici di Castel Giorgio e di Torre Alfina.

### 3 SISMICITÀ INDOTTA NEI CAMPI GEOTERMICI TOSCANI.

Si riassumono di seguito le informazioni essenziali sulla sismicità dei campi geotermici toscani, tratte dalle pubblicazioni scientifiche citate.

#### 3.1. Larderello –Travale.

Quello di Larderello – Travale è il primo campo geotermico al mondo, utilizzato per la produzione di energia elettrica fin dall'inizio del 20° secolo. È pertanto quello nel quale si ha il più lungo record di dati relativi al comportamento di un sistema geotermico di alta entalpia sottoposto a intensivo sfruttamento. Il sistema ha attualmente una capacità installata di 722 MWe, la produzione totale di vapore supera le 4700 t/ora e la quantità di acqua reiniettata nel serbatoio è di 1500 t/ora (solo a Larderello, reiniezione iniziata nel 1979) (Romagnoli et al., 2010).

A titolo di confronto si riportano i parametri equivalenti per il progetto geotermico di Torre Alfina:

- Capacità elettrica netta : 5 MWe
- Fluido estratto dal serbatoio: max 850 t/ora
- Fluido reiniettato nel serbatoio: max 850 t/ora

Nel caso di funzionamento contemporaneo dei due impianti di Castel Giorgio e di Torre Alfina la quantità totale di fluido estratto e reiniettato è di 1900 t/ora.

Fino agli inizi degli anni '80 il fluido è stato estratto a Larderello-Travale da un serbatoio “superficiale” in rocce carbonatiche – anidritiche alla profondità di 500-1500 m, con  $T= 220^{\circ}$ - $230^{\circ}$ C, e  $P \leq 32$  bar. Successivamente il fluido è stato estratto anche da un serbatoio più profondo ( $> 3000$  m) in rocce metamorfiche, con  $T= 300^{\circ}$ - $350^{\circ}$ C e  $P= 40$ - $70$  bar.

Per quanto riguarda la sismicità del campo geotermico di Larderello-Travale sono disponibili le informazioni contenute in Batini et al. (1980a e 1985) sintetizzate da Evans et al. (2012) e in una pubblicazione di Amici della Terra (2008). Si riassumono di seguito le principali conclusioni sulla sismicità indotta dalle operazioni di coltivazione del campo geotermico, tratte letteralmente dalle pubblicazioni citate.

Batini et al. (1980a). *E' stato tentato un confronto tra la sismicità e l'attività connessa allo sfruttamento del campo geotermico (estrazione e iniezione di fluidi in profondità, perforazione di pozzi profondi in perdita totale di circolazione, stimolazione di pozzi sterili, etc.) allo scopo di stabilire se e come queste attività modificano i meccanismi di rilascio dello stress della regione Larderello – Travale. I dati relativi alla quantità di fluidi estratta e iniettata nel sottosuolo sono stati confrontati con l'energia sismica che è rilasciata ogni mese. Dagli istogrammi ricostruiti per la regione geotermica Larderello – Travale, l'energia sismica è stata rilasciata come una funzione lineare nel tempo fino a Maggio 1979, quando è avvenuto un brusco aumento di sismicità. Questo aumento non può essere correlato né con la quantità di fluidi iniettati, né con la*



produzione di fluido né con le precipitazioni medie mensili di pioggia (pag.38). Comunque non è possibile con le nostre attuali conoscenze, generalizzare una relazione causa – effetto tra iniezione di acqua e terremoti indotti in quell'area. Si possono distinguere tre diversi casi:

- Nell'area di Travale dopo l'iniezione di acqua è stato osservato un aumento di sismicità
- Nell'area Gabbro – Bulera (parte nord della regione) un aumento di sismicità non è sempre avvenuto dopo iniezione d'acqua
- Nell'area Larderello – Castelnuovo (parte centrale della regione) non c'è correlazione tra iniezione di acqua e rilascio di energia sismica (pag.42).

Batini et al. (1985). “ La correlazione tra sismicità e acqua reiniettata nei pozzi ubicati nell'area geotermica suggerisce che parte degli eventi sismici di bassa magnitudo sono indotti. Comunque, i dati analizzati indicano che un aumento nella quantità di acqua iniettata non produce un aumento nel valore massimo della magnitudo”.

Evans et al. (2012). “ L'area ha una lunga storia di sismicità, e perciò molti, se non la maggior parte degli eventi sono probabilmente naturali. I 5 anni di dati mostrano grandi variazioni spaziali e temporali nel tasso di eventi e nel valore  $b$ . Gli eventi sono più superficiali di 8 km, con il 75 % localizzato a profondità tra 3.0 e 5.5 km. Il massimo evento ha avvicinato una magnitudo  $M_L$  di 3.2. Si vede una chiara correlazione tra volume di acqua iniettata e numero degli eventi, sebbene il maggior numero degli eventi indotti risulta essere di piccola magnitudo. Non è evidente alcun cambiamento nella frequenza degli eventi con  $M_L \geq 2.0$  (Batini et al., 1985) (pagg.43-44).”

### 3.2 Monte Amiata.

Il sistema geotermico del M. Amiata (province di Grosseto e Siena) è il secondo in Italia dopo Larderello ed è anch'esso in esercizio da molti anni. La potenza geotermoelettrica installata totale è di 88 MW con cinque unità produttive installate (Cappetti et al., 2010) nei campi di Bagnore e Piancastagnaio. Come a Larderello, sono stati trovati due serbatoi geotermici, uno più superficiale di tipo *steam-dominated* in rocce carbonatiche-anidridiche (profondità 0,6 – 1,0 Km) e uno più profondo di tipo *water-dominated* in rocce metamorfiche, con una T di 300-350 °C e una pressione intorno a 200 bar a 3000 m di profondità. Anche nei campi geotermici dell'Amiata l'Enel inietta acqua nel sottosuolo ma se ne ignora la quantità. Si riporta di seguito la descrizione della sismicità dell'area del M. Amiata tratta da Evans et al., (2012). “Il livello della sismicità di fondo è considerevole (Batini et al., 1980b, 1990), e tende a mascherare potenziali eventi indotti. Studi della sismicità storica dall'anno 1000 AD indicano che nell'area è avvenuto un evento relativamente grande con intensità IX MCS (Batini et al., 1990)... La sismicità ha in genere profondità inferiore a 8 km e tende ad avvenire in sciame con molti piccoli eventi (Moia, 2008). Un evento con magnitudo  $M_L$  3.5 è avvenuto nella zona del serbatoio nel 1983 (Moia et al., 1993). Comunque, potrebbe essere stato un evento naturale che sarebbe avvenuto anche in assenza di attività di iniezione (Batini et al., 1990; Moia et al., 1993). L'esame del catalogo dell'INGV mostra che un altro evento con magnitudo durata  $M_D$  3.5 è avvenuto nel 2000 a 10 km di Piancastagnaio ad una profondità di 5 Km”.

Per quanto riguarda la sismicità naturale e indotta dei campi geotermici toscani, si ritiene utile riportare a continuazione quanto scrive in merito l'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Toscana.

*“ L'estrazione e la reiniezione di fluidi geotermici può influenzare la sismicità naturale. A The Geysers (California - U.S.A.), la reiniezione di fluidi iniziò nel 1969 come via di smaltimento dei condensati di vapore, essendo in quell'anno entrata in vigore una normativa che stabiliva gli standard di accettabilità per gli scarichi in corpi idrici di superficie. Venne in seguito compreso che la reiniezione poteva rappresentare un modo per mantenere buoni livelli di produzione del vapore e, verso la metà degli anni '70, le quantità di condensati reiniettate superavano gli 8 Mt/a, ed erano più che raddoppiate dieci anni dopo. La reiniezione prendeva forza proprio quando vennero avviati studi per la registrazione degli eventi sismici, allo scopo di verificare se esistessero relazioni causa-effetto tra le attività di sfruttamento dell'energia geotermica e la sismicità della zona. Gli eventi osservati erano quasi tutti di bassa intensità (<2 della scala Richter) ed estremamente localizzati. La maggior parte degli epicentri coincidevano con la zona di estrazione del vapore, mentre gli ipocentri erano di bassa profondità (1-4 km). Probabilmente una parte di questi microterremoti era dovuta all'estrazione del vapore: la messa in servizio di nuove centrali, con aumento dell'estrazione dei fluidi, accaduto nel 1979, portò ad un incremento della sismicità. La zona di The Geysers si trova circa 50 km a NE della faglia di Sant'Andrea, ed a pochi chilometri da un ramo secondario di questa. Una zona ad alta sismicità di origine però, più profonda. Gli eventi di superficie certamente sono da porre in relazione con le attività geotermiche ed è difficile sostenere che la reiniezione non ne avesse prodotti. Fortunatamente si tratta, in generale, di eventi di bassa intensità, mentre quelli che hanno origine al di fuori del campo di vapore, hanno ipocentri tra i 4 ed i 12 km e sono molto meno frequenti. Nel 1976, furono avviati studi analoghi anche in Giappone, dove, contrariamente a quanto osservato in California, la reiniezione di acque calde non produceva alcun fenomeno sismico. La reiniezione dei condensati a Larderello-Valle del Secolo iniziò nella prima metà degli anni '70 allo scopo di evitare di entrare in conflitto con la normativa per il rilascio di sostanze potenzialmente pericolose nei corpi idrici di superficie. Si temeva, che l'arrivo di acqua fredda potesse danneggiare il campo di vapore in produzione. Così i primi pozzi di reiniezione vennero collocati lontano dalle aree di sfruttamento, verso le zone marginali dove era nota la presenza di acque meteoriche. Solo in un secondo tempo venne accertato come la reiniezione potesse rappresentare una efficace via per recuperare con maggiore efficienza l'energia termica contenuta nelle rocce del serbatoio, specie in quelle zone ad elevata permeabilità e con alto grado di sovrariscaldamento del vapore. Sin dal 1976 ENEL ha avviato un monitoraggio in continuo sulla microsismicità dei luoghi di sfruttamento. Questo, dopo aver portato a termine una ricostruzione della sismicità storica, sulla base dei dati riportati nel Catalogo Nazionale dei Terremoti che per la Toscana meridionale copre il periodo dall'anno 1000 sino al 1990, seppur con diverso grado di accuratezza: gli eventi di intensità minore, III-IV grado della scala Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS) sono riportati dal 1900, mentre dal 1790 solo quelli dal V-VI in su, dal 1700 quelli dal VII-VIII e dal 1000 solo gli eventi più disastrosi (>VIII grado della scala MCS). I dati mostrano come i sistemi geotermici toscani si trovano su una cintura sismicamente attiva. Dagli studi condotti nell'area di Travale/Radicondoli ed a Larderello, risultavano delle relazioni tra l'attività sismica e le operazioni di reiniezione dei fluidi impiegati nella produzione di energia elettrica. Tuttavia, gli eventi sismici indotti erano sempre di bassa intensità, la quale non aumentava all'aumentare della quantità di fluidi reiniettati. Anche l'area del Monte Amiata ha dato indicazioni simili: la rete di rilevamento installata nel 1982 ha segnalato ben 2000 sismi, con ipocentro a profondità inferiori ai 10 km ed intensità, in genere, inferiore a magnitudo 2. L'intensità massima è stata di magnitudo 3,5, che corrisponde al IV-V grado della scala Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS; ENEL., 1995). Le esperienze sino ad oggi condotte indicano come la sismicità prodotta dallo sfruttamento delle risorse geotermiche e dalla reiniezione dei condensati sia rilevabile solo a livello strumentale”. ([www.Arpat.toscana.it](http://www.Arpat.toscana.it)) febbraio 2013.*

Ugualmente sembra utile riproporre quanto scrive sull'argomento l'associazione ambientalista Amici della Terra (Onlus Firenze, 2008) nella pubblicazione intitolata "La risorsa geotermica per usi elettrici in Italia : energia, ambiente e accettabilità sociale" (pagg. 26-29).

### Microsismicità

*"La procedura di reiniezione dei condensati è considerata responsabile nel determinare fenomeni microsismici nelle zone interessate dalla presenza di coltivazioni geotermiche. Alcune ricerche in campo internazionale hanno accertato una possibile correlazione tra la reiniezione dei condensati e il verificarsi di eventi sismici d'intensità relativamente bassa, tuttavia la combinazione reiniezione- terremoto non è un principio generale applicabile a tutti i campi geotermici. L'attività di rilevamento sismico nelle aree geotermiche ha avuto inizio, in concomitanza con l'utilizzo della tecnica di reiniezione dei fluidi nel serbatoio geotermico, nel tentativo di verificare l'esistenza di una relazione causa-effetto tra lo sfruttamento dei campi geotermici e i fenomeni sismici presenti nelle aree interessate da attività geotermiche. Il monitoraggio sismico nelle aree geotermiche ha avuto origine congiuntamente al programma di reiniezione dei fluidi iniziato nel campo geotermico di The Geysers (Stati Uniti) agli inizi degli anni '70. Gli studi condotti in questa zona hanno confermato la correlazione tra lo sfruttamento del sistema e alcune manifestazioni sismiche di bassa intensità, inferiori ai 2 gradi della scala Richter, verificatesi in quest'area, con epicentri in prossimità delle zone di estrazione, e ipocentri localizzati a bassa profondità. I dati raccolti nella zona nel periodo 1976-1996 hanno indicato una correlazione molto significativa fra la produzione di vapore, la reiniezione dei fluidi e la microsismicità locale con oltre 17800 eventi registrati con magnitudo superiore a 1.4. Nella prima metà degli anni '70 la tecnica di reiniezione dei fluidi è stata introdotta nella zona di Larderello, con il duplice obiettivo di arrestare il decadimento produttivo di alcune zone del campo geotermico, e adeguare l'attività geotermoelettrica alla nuova normativa circa lo smaltimento dei reflui industriali nei corpi idrici di superficie (Legge n. 319 del 10 maggio 1976).*

*Insieme con essa ha inizio, nel 1976, un programma dell'Enel di monitoraggio sismico della zona, utilizzando come parametri di riferimento i dati sulla sismicità storica dell'area riportati nel catalogo Nazionale Terremoti. La rete di monitoraggio sismico che copre un'area di circa 800 km<sup>2</sup>, nel periodo 1977- 1993 ha registrato più di 3000 eventi sismici d'intensità inferiore a magnitudo 2 e un solo evento di magnitudo 3.3. La maggior parte dei microsismi registrati sono stati localizzati ad una profondità tra 1 ed 8 km dalla superficie, un elemento distintivo che amplifica la percezione degli eventi sismici, sebbene siano caratterizzati da una bassa energia. Altri studi condotti negli anni '80 nella zona di Larderello (Batini et al. 1980), hanno confermato una correlazione positiva tra la tecnica di reiniezione e la sismicità di alcune zone del campo. Per gli autori le attività di reiniezione possono stimolare episodi di bassa sismicità in quei bacini geotermici a prevalente comportamento liquido, come per la zona di Travale, a causa delle variazioni di pressione nelle fratture, che alterano l'equilibrio idrodinamico del bacino geotermico stimolando l'attività sismica. Un effetto che non è stato registrato in quei bacini come Larderello-Castelnuovo, a prevalente comportamento gassoso, dove la procedura di reiniezione non ha prodotto nessun effetto sismico indotto. Anche per l'area del Monte Amiata i dati disponibili rilevati attraverso la rete di rilevamento locale presente dal 1977, hanno offerto indicazioni simili. I fenomeni sismici registrati in quest'area sono stati generalmente di intensità inferiori a magnitudo 2, e caratterizzati da bassi ipocentri a profondità comprese tra 1 e 5 km. Tra il 1997 e il 2000 l'area del Monte Amiata è stata interessata da alcuni episodi sismici di modesta entità, magnitudo 3.8, che hanno provocato danni ad abitazioni e suscitato preoccupazione e timori circa una possibile connessione tra questi episodi e lo sfruttamento dei campi geotermici. Nel 2001, allo scopo di ricavare maggior informazione circa le caratteristiche degli eventi sismici accaduti nell'area del Monte Amiata, è stata siglata una convenzione triennale tra Regione Toscana e Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), per implementare il sistema di monitoraggio della zona. Il programma realizzato*

dall'INGV ha preso in esame i dati storici sulla sismicità dell'area, analizzando gli eventi ricadenti in un raggio di 20 km dal comune di Piancastagnaio. L'analisi storica ha evidenziato un'attività sismica maggiore, sia per numero di eventi, sia per intensità nella prima metà del novecento, con dei cluster tipici di molte zone italiane, e in particolare delle aree vulcaniche. I dati storici oltre a segnalare la naturale tendenza sismica dell'area dell'Amiata, hanno permesso di rilevare come la maggior parte dei sismi avvenuti nella zona, posseggano caratteristiche di durata e intensità simili agli eventi del 1997 e del 2000. Nelle conclusioni tratte da questo primo studio, l'INGV ha stabilito che le attività sismiche accadute nel marzo 1997 e nell'aprile e ottobre del 2000 non potevano considerarsi anomale rispetto al quadro sismo tettonico della zona, e che l'allarme suscitato dagli episodi del 1997 e del 2000 era imputabile a un lungo periodo d'inattività sismica che ha interessato la zona dagli anni '50 in poi.

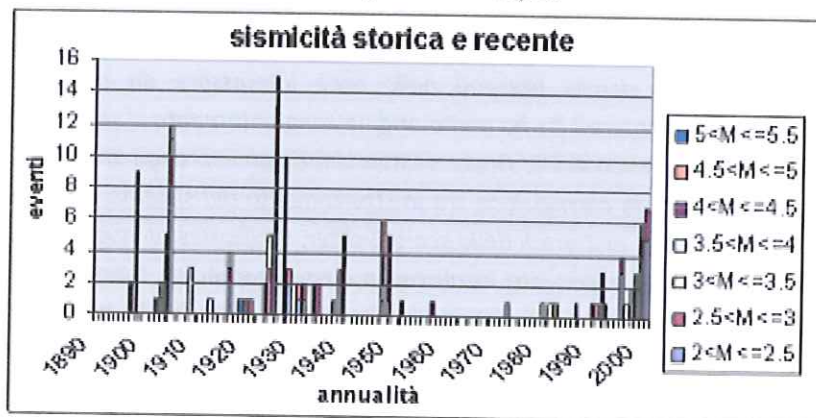
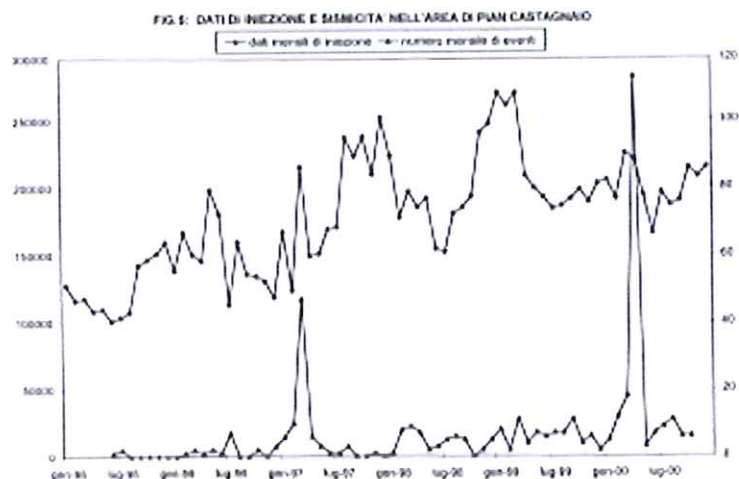


Grafico sismicità storica e recente.  
Fonte INGV, 2001.

Nei primi mesi del 2001 un'altra serie di eventi con magnitudo massima di 2,8 è stata oggetto di studio da parte dell'INGV. L'analisi spazio-temporale dei dati raccolti per mezzo della rete nazionale e della rete Enel, ha concluso circa l'esistenza di spazi della crosta terrestre di dimensioni di pochi chilometri che vengono attivati, con episodi distinti di rilascio della tensione elastica accumulata dalle deformazioni secolari di origine tettonica. Queste strutture interagendo elasticamente sono all'origine delle sequenze di terremoti rilevate anche in altre aree vulcaniche a elevata sismicità come le aree dei Colli Albani, dei Campi Flegrei, prive di attività antropiche connesse con l'utilizzo della risorsa geotermica.

Con l'obiettivo di verificare le possibili correlazioni tra gli eventi sismici e l'attività di sfruttamento dei campi geotermici, l'Enel ha fornito all'INGV i dati sull'attività di estrazione e reiniezione nel periodo compreso tra il gennaio 1995 e il luglio 2000 e il catalogo degli eventi sismici localizzati dalla propria rete sismografica che ricadevano nella zona di Piancastagnaio. In letteratura le condizioni necessarie per evidenziare una possibile relazione di causa-effetto tra attività di reiniezione ed eventi sismici sono due: la prima, è che l'evento sismico avvenga in zone non interessate prima da attività sismica; la seconda, che l'attività si manifesti dopo un breve intervallo dal momento della reiniezione. La sismicità correlata all'iniezione mostra, infatti, sia una dipendenza temporale da quest'ultima sia una concentrazione iniziale nei pressi del punto di reiniezione che tende a distribuirsi su un raggio più ampio con il procedere delle operazioni d'iniezione.



◆ dati mensili reiniezione    ▲ dati mensili sismicità periodo 1995-2000. Fonte INGV, 2001.

*La comparazione dei dati di reiniezione ricevuti da Enel con quelli riguardanti gli eventi sismici accaduti nello stesso periodo, non ha indicato per l'INGV nessun tipo di relazione. Durante il periodo, infatti, le operazioni di reiniezione sono state costanti, e quindi non indicative di un possibile rapporto causa-effetto, facendo propendere per una spiegazione casuale dei fenomeni sismici con andamenti nel tempo del tutto imprevedibili. Nello stesso periodo su commissione della comunità Montana zona I-2, allo scopo di raccogliere maggiori informazioni sulla sismicità della zona, è stato assegnato alla società Edra il compito di realizzare un monitoraggio sismico, il cui studio si è focalizzato in particolare sull'analisi delle forme d'onda sismica, interpretate come possibili indicatori del legame tra attività di reiniezione e sismicità. Le osservazioni offerte nello studio in esame secondo l'INGV, non hanno rilevato una correlazione tra l'attività microsismica e la coltivazione del campo geotermico; le caratteristiche delle onde sismiche analizzate sono coerenti con quelle naturalmente presenti in altre aree vulcaniche, e determinate dalla fratturazione idraulica probabilmente connessa a variazioni di pressione dei fluidi all'interno delle fratture. Il tema della possibile relazione tra l'utilizzazione dei fluidi, e il manifestarsi di eventi sismici di bassa intensità rimane quindi aperto e suscettibile di ulteriori indagini. Infatti, se da un lato l'area del Monte Amiata è naturalmente considerata zona sismica e quindi i terremoti non possono essere considerati eventi eccezionali per la zona, d'altra parte le conclusioni offerte nello studio non escludono che le attività geotermiche possono rappresentare condizioni in grado di stimolare eventi sismici. Sarebbe quindi opportuno potenziare il sistema di osservazione geofisica e geochimica del territorio, con lo scopo di ottenere maggiori informazioni circa la natura, spontanea o indotta degli eventi sismici."*

#### 4 SISMICITÀ INDOTTA DALLE OPERAZIONI ENEL DEGLI ANNI 1977-1980 A TORRE ALFINA E A LATERA

Tutte le informazioni disponibili su questi fenomeni si basano sul rapporto tecnico di Batini et al. (1980b), ripreso con pochi dati aggiuntivi da Moia (2008) e di recente sintetizzato da Evans et al. (2012). Il rapporto di Batini et al. (1980b) descrive la sismicità delle zone geotermiche di Latera, Torre Alfina e Cesano, nelle quali l'Enel aveva in corso operazioni geotermiche comprensive della perforazione di pozzi profondi e di prove di produzione e iniezione del fluido. Viene inizialmente descritta la sismicità storica delle tre aree nel periodo 1900-1975, mostrando che mentre Torre Alfina e Latera hanno un certo grado di sismicità crostale (ipocentri fino a 25 km, max magnitudo 4.7), a Cesano non si è registrata alcuna attività sismica in quel

periodo (pag. 50-53). Il rapporto descrive poi la sismicità delle aree di Torre Alfina e Latera registrata dalle reti sismiche installate dall'Enel e operative dal 1977.

In considerazione del fatto che le zone dei pozzi A4 e A14 sono proprio quelle dove sono previste le operazioni di produzione e iniezione del fluido nel progetto geotermico pilota Castel Giorgio, è importante riportare quanto si legge a pag.54 del rapporto: *“non c'è stato aumento dell'attività sismica nell'area di Torre Alfina durante le prove di produzione e iniezione ai pozzi A14 e A4, ma si può osservare una chiara correlazione tra aumento di attività e prove specifiche nel pozzo L-2 nell'area di Latera”*.

Batini et al. (1980b) riferiscono poi della sismicità registrata nei primi mesi del 1977, durante prove di reiniezione al pozzo RA-1. Si osservi che questo pozzo è situato circa 6,7 km a NW del pozzo A-14 e si colloca all'esterno del perimetro del permesso di ricerca richiesto da ITW & LKW SpA. Batini et al. (1980b) riferiscono che *“un aumento dell'attività sismica è correlato chiaramente ai due periodi delle prove di reiniezione ..... In entrambi i casi la densità maggiore degli eventi sismici avviene in corrispondenza dei valori più alti di pressione (registrati a testa pozzo: > 10 atm); il flusso di acqua iniettato è intorno a 140-150 m<sup>3</sup>/ora....Per una dozzina di eventi ubicati in prossimità del pozzo RA-1 è stato possibile stimare la profondità (tra 1.1 e 3.0 Km)”* (pag.62). Da dati ENEL risulta in realtà che nel gennaio 1977 furono eseguite nel pozzo RA1 vere e proprie prove di fratturazione idraulica con pressione alla bocca pozzo di 54 atm.

Batini et al. (1980b) riferiscono anche sulla sismicità indotta a Latera da iniezione di acqua nel pozzo L-2: *“un aumento dell'attività sismica è connesso con aumenti nei volumi iniettati di acqua (fino a 30.000 m<sup>3</sup> ; flusso 100 m<sup>3</sup> /ora). I valori di magnitudo variano tra 1.5 e 2; la profondità focale è meno di 1 Km vicino al pozzo e si sposta fino a 2 Km allontanandosi da esso”* (pag 67).

Nelle conclusioni (pag.80) rilevano che il diverso comportamento osservato nelle prove di iniezione nei pozzi RA-I e L-2 (con sismicità indotta), rispetto a quello osservato nelle prove estrazione-reiniezione nei pozzi A-4 e A-14 (nessuna sismicità indotta) potrebbe essere dovuto al fatto che nel primo caso le iniezioni erano avvenute a pressione, mentre nel secondo caso il fluido era stato iniettato in *“a free- flowing manner”* cioè esattamente nel modo in cui è prevista la reiniezione nei progetti Castel Giorgio e Torre Alfina. Da notare tuttavia che la diversa durata delle prove nei due casi, potrebbe aver influenzato i risultati.

Come già detto il rapporto di Moia (2008), riproduce sostanzialmente i dati e le considerazioni di Batini et al. (1980b) già presentati. Si ritiene comunque interessante riprodurre quanto riportato a pag 23/64 del rapporto: *“ La sismicità indotta risulta strettamente legata al rilascio di parte dell'energia accumulata in seguito all'evolversi dei processi geodinamici in atto nella litosfera. Da ciò discende che l'intervento umano va considerato come un fattore capace di attivare un processo già in atto ed in parte “congelato” nella litosfera ma non già come fattore determinante il processo stesso”*. Si tratterebbe quindi di sismicità *“innescata”*.

Relativamente a Latera, il rapporto di Moia (2008) riporta alcuni nuovi dati, successivi al rapporto di Batini et al. (1980b). Poiché gli stessi dati sono stati di recente analizzati da Evans et al. (2012) (Moia è uno degli autori), si ritiene utile riportare di seguito quanto viene scritto in proposito (pag. 44-45) :

#### Latera

*“Il serbatoio è ospitato in rocce carbonatiche fratturate a 0.6-2.0 km di profondità e ha una temperatura di 200-230 °C. Una rete sismica composta da 10 stazioni è entrata in funzione alla fine del 1978, circa un anno prima della prima iniezione (Batini et al., 1980 b). Diversi eventi naturali con magnitudo compresa tra 0.6-1.7 M<sub>L</sub> sono stati rilevati ogni mese ad una distanza compresa tra 20-35 km dal serbatoio (Batini et al.,*

1980b). Descriviamo in modo dettagliato gli esperimenti avvenuti in questo sito in quanto non sono stati pubblicati nella letteratura geotermica internazionale. Uno degli episodi di iniezione ha avuto luogo nei mesi di marzo-aprile 1980. Un totale di 30.000 m<sup>3</sup> di acqua è stata iniettata nel pozzo L2 profondo 1.4 km in due periodi con durata di 8 e 10 giorni, con portate medie di 35-45 l/s (Moia, 2008). La pressione alla testa del pozzo è incerta. Circa 24 eventi con magnitudo compresa tra 1.5-2.0 M<sub>L</sub> si sono verificati in due "clusters" durante i 2 mesi (Batini et al., 1980b). Un cluster è localizzato a soli 200 m a sud del punto di iniezione, ad una simile profondità, suggerendo che i microterremoti sono stati indotti. È da notare che un evento con magnitudo M<sub>L</sub>=2.9, verificatosi il 9 dicembre 1984 vicino al pozzo L2, è avvenuto quando si stava iniettando il fluido prodotto dal pozzo L3D distante 2 km. Sfortunatamente i parametri di circolazione sono sconosciuti (Moia, 2008). Questo è il più grande evento che si pensa sia stato indotto da operazioni geotermiche a Latera. Una più completa analisi della risposta sismica del serbatoio all'iniezione è stata condotta nel pozzo L1 profondo 2.8 km tra giugno 1981 e maggio 1982. I risultati della sequenza dei test sono mostrati in Fig.3a. I dettagli del completamento del pozzo sono incerti, nonostante è noto che era aperto in una zona di frattura ad una profondità di 1.7 km. Sono avvenute tre iniezioni di fluido separate con durate comprese tra 17-102 ore a mesi di distanza, aumentando progressivamente le portate di 15, 25 e 83 l/s. Le pressioni corrispondenti a testa pozzo erano 5.5, 5.0 e 9.0 MPa (Moia, 2008). La pressione a testa pozzo ha raggiunto i 7.0 MPa all'inizio del primo test ma dopo è scesa a 5.0 MPa per le altre 61 ore di prova. La microsismicità intorno al pozzo è iniziata dopo poche ore e si è fermata dopo 35 ore (fig.3b). Sono stati registrati un totale di 223 eventi sismici con magnitudo minore di M<sub>L</sub>=0.5 (Moia 2008). La seconda iniezione di fluido è stata condotta con tassi più alti ma comparabile con la pressione alla testa del pozzo del maggio 1982 con durata di 102 ore. La micro sismicità è iniziata soltanto 55 ore dopo l'iniezione, al termine della quale era stato iniettato 1.5 volte il volume netto del primo test. È persistita una attività sismica sporadica fino alla chiusura, registrando 148 eventi con una magnitudo massima di 0.4 M<sub>L</sub>. Il terzo test con il più alto tasso di iniezione, è stato condotto nel maggio 1982 con una durata di 17 ore. Un alto tasso di microsismicità è cominciato quasi immediatamente ma è crollato dopo 6 ore. Sono stati registrati un totale di 370 eventi, la massima magnitudo è stata M<sub>L</sub> =0.5 (Moia, 2008). Gli ipocentri, durante tutti e tre i test di iniezione, sono stati localizzati tra 150 e 1500 m dal pozzo, e ad una profondità compresa tra 1.5 e 2.0 km, che è vicina alla profondità alla quale il pozzo intercetta una faglia. Tuttavia, l'errore di localizzazione formale è grande (vedi didascalia fig.3). E' chiaro che la sismicità è stata indotta e ha possibilmente riattivato la faglia. Il pozzo è stato trattato con acido poco dopo la terza iniezione che ha migliorato l'iniettività. Una iniezione successiva con una portata di 111 l/s e pressione alla testa del pozzo di 6.0 MPa non ha prodotto eventi sismici (fig.3a). Sono stati condotti ulteriori studi sulla relazione tra iniezione e sismicità locale a Latera nel pozzo L6 nel dicembre 1981. In fig.4 sono mostrati i test con la corrispondente sismicità indotta. Il primo test è stato eseguito in rocce vulcaniche, alla profondità di 1.4 km con l'iniezione di un liquido di formazione con portata di 66 l/s e una pressione a testa pozzo di 7.5 MPa. Sono stati osservati circa 20 eventi, tutti di magnitudo negativa (cioè molto piccola). La seconda serie di iniezioni è stata condotta il 18-19 dicembre in rocce carbonatiche, alla profondità di 1.7 km. La sequenza è iniziata con tre brevi iniezioni di durata di circa 2 ore, con portata di 8 l/s ed una pressione a testa pozzo di 13-14 MPa finendo poi con un trattamento con acido che ha incrementato la portata fino a 28 l/s e con pressioni alla testa del pozzo pari a 14.5 MPa per un'ora (Moia, 2008). La microsismicità inizia non appena aumenta la portata e finisce con la chiusura. È stata poi eseguita una iniezione di 24 ore a 28 l/s. L'attività microsismica è cominciata dopo 10 ore, anche se le pressioni di testa pozzo erano sotto 13 MPa, ed è terminata con la chiusura. Dopo 2 giorni si ha l'ultima iniezione di fluidi per 20 ore, con una portata di 40 l/s ed una pressione media alla testa del pozzo pari a 14.5 MPa. La microsismicità è iniziata dopo 11 ore, raggiungendo un picco appena prima della chiusura ed è continuata per alcune ore in seguito. Circa 196 eventi sono stati

intercettati, 28 di questi dopo la chiusura. Molti hanno magnitudo negativa, il più grande è stato di  $M_L$  0.8. La localizzazione degli eventi si estende a SE del pozzo ad una distanza compresa tra 200-1500m (Fig.4b).

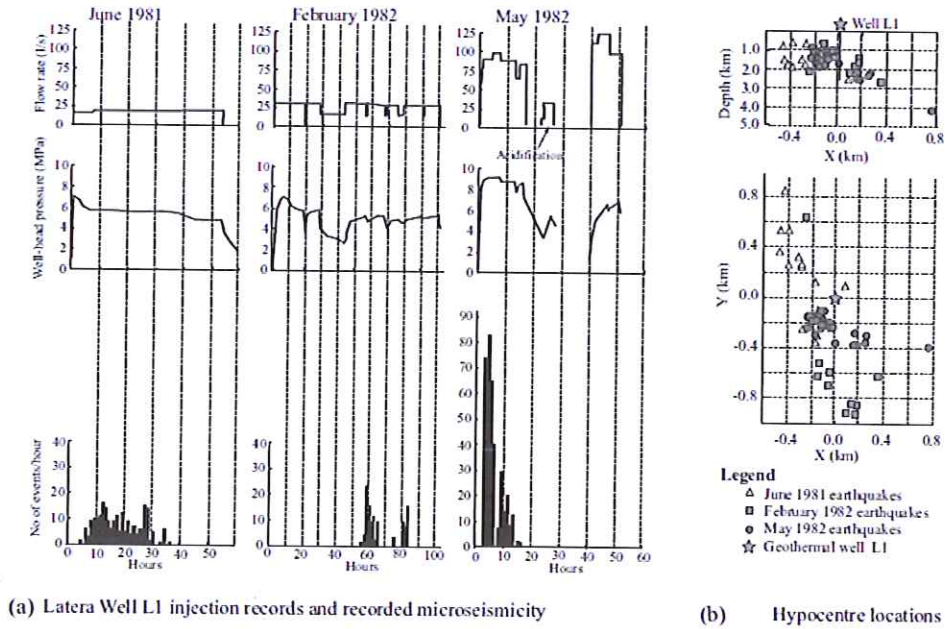


Fig.3. Campo geotermico di Latera. a) Parametri di iniezione e sismicità registrata (in numero di eventi/ora) nelle prove di iniezione nel pozzo L1 del 1981-1982. b) Ipocentri dei terremoti associati con le iniezioni. Gli assi X e Y puntano rispettivamente verso est e nord. Gli errori di localizzazione sono superiori a 1 km in verticale e occasionalmente anche in orizzontale.

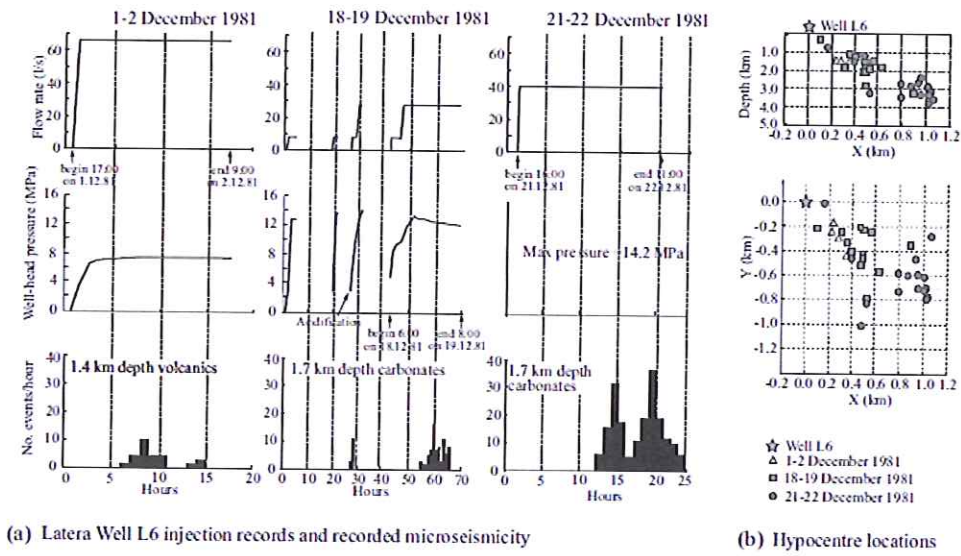


Fig.4. Campo geotermico di Latera. a) Parametri di iniezione e sismicità registrata (in numero di eventi/ora) nelle prove di iniezione nel pozzo L6 del 1981. b) Ipocentri dei terremoti associati con le iniezioni. Gli assi X e Y puntano rispettivamente verso est e nord. Gli errori di localizzazione sono superiori a 1 km in verticale e occasionalmente anche in orizzontale.



## Torre Alfina

*Il pozzo RA-1 è stato perforato fino a circa 2710 m e una sequenza di prove di iniezione con acqua dolce sono state realizzate nel gennaio-febbraio 1977 con tassi di iniezione tra di 20-40 l/s e pressioni alla testa pozzo fino a 1.2 MPa. Una rete microsismica temporanea ha registrato 177 eventi vicino al pozzo (a 1.4-3.3 km di profondità e 0.2-2.0 km di distanza). L'evento maggiore ha avuto una magnitudo  $M_L$  3.0 ed è stato avvertito dalla popolazione locale (Moia, 2008). Gli eventi sono avvenuti solo con portate maggiori di 25 l/s con pressioni di iniezione superiori a 0.7 MPa e sono cessati subito dopo la cessazione dell'iniezione. (Batini et al., 1980b) riportano che l'iniezione per gravità di fluido prodotto dal pozzo A-14 nel pozzo A-4 non ha prodotto alcuna sismicità.*

## 5 LA SISMICITÀ INDOTTA NEI CAMPI GEOTERMICI DEL MONDO

Si farà riferimento nel seguito ai progetti geotermici convenzionali nei quali, come nei progetti di Castel Giorgio e di Torre Alfina, la circolazione del fluido avviene in condizioni bilanciate, senza creare le condizioni di sovrappressione tipiche dei progetti EGS (Enhanced Geothermal System) che hanno per obiettivo la creazione di un serbatoio artificiale iniettando grandi volumi di acqua sotto pressione in rocce calde a bassa permeabilità proprio allo scopo di indurre scivolamenti sismici e innalzare la permeabilità di fratture preesistenti (Cladouhos et al., 2010, Evans et al., 2012). È da notare tuttavia che anche nei progetti EGS non sono noti casi di terremoti indotti da stimolazione o iniezione ad alta pressione che abbiano causato danni apprezzabili (Bromley, 2012).

Una rassegna dell'esperienza internazionale in materia di sismicità indotta nei campi geotermici è stata recentemente presentata da Bromley (2012) e da essa sono state tratte le conclusioni sotto riportate.

*“ Molti campi geotermici convenzionali sono in produzione da più di 25 anni e nella maggioranza di essi non è stata riportata alcuna sismicità indotta avvertita. Nei pochi casi in cui questo è avvenuto, la sismicità indotta è consistita di terremoti piccoli o microterremoti. La massima magnitudo  $M_L$  è stata di 4.6 a The Geyser in California”.*

*“ I livelli della sismicità indotta (numero di eventi e magnitudo) dipendono dalle condizioni naturali: lo stress e l'attrito locali, l'orientazione e l'ubicazione delle faglie. In ambienti tettonici attivi, sono comuni livelli elevati di sismicità naturale, le faglie possono essere in condizioni di pre-stress e la sismicità può essere indotta da cambiamenti di stress”.*

*“ I fattori che interessano la sismicità sono : a) stress per spostamento da contrazione volumetrica causata dall'estrazione di fluido; b) stress termici creati dall'iniezione di fluidi freddi in rocce calde; c) stress chimici associati con iniezione di salamoia o fluidi acidi, che causano indebolimento delle rocce”. Si osservi che questi ultimi non sono possibili nei progetti Castel Giorgio e Torre Alfina nei quali è prevista solo reiniezione degli stessi fluidi estratti dal serbatoio e anche la contrazione volumetrica del punto a) è compensata dalla reiniezione nel serbatoio di un volume di liquido pari a quello estratto. “Il beneficio primario della sismicità indotta è l'aumento di permeabilità (iniettività)”.*

*“I fattori controllabili sono: la pressione e la temperatura della reiniezione, il volume, la durata e il tasso di aumento”. In particolare è utile l’osservazione, derivante dallo studio della sismicità indotta a The Geysers, che “l’iniezione rapida innesca un maggior numero di terremoti” della quale si farà tesoro nella messa in produzione del campo geotermico di Torre Alfina.*

È anche importante l’osservazione che sia a The Geysers che a Berlin (El Salvador) la sismicità dei serbatoi geotermici è aumentata dopo che si sono verificati forti terremoti naturali in regioni vicine.

Le conclusioni principali che Bromley (2012) trae dalla rassegna della sismicità in campi geotermici a scala mondiale sono le seguenti:

*“Delle centinaia di serbatoi geotermici convenzionali sviluppati a scala mondiale, solo pochi hanno prodotto eventi sismici indotti con una magnitudo risentita dalle persone, durante le normali operazioni di estrazione e reiniezione di fluidi. Questi eventi non hanno ridotto le operazioni nel serbatoio.*

*“L’esperienza mostra che gli eventi sismici indotti nei progetti geotermici sono generalmente di piccola magnitudo. Comunque a causa della loro origine poco profonda, gli eventi più grandi vengono talvolta risentiti alla superficie. In alcuni casi, gli eventi sismici indotti generano una preoccupazione pubblica. Questa può scaturire dall’idea che eventi più grandi, potenzialmente causa di danno, potrebbero essere prodotti dalle attività geotermiche future. Comunque non ci sono stati esempi di danni significativi causati da eventi sismici indotti, cosicché la possibilità di un aumento nello scuotimento del terreno non rappresenta generalmente una preoccupazione pubblica, almeno che questa non venga alimentata da una montatura giornalistica”.*

*“Le frequenze generate da eventi sismici indotti sono generalmente troppo alte per causare danni strutturali significativi (che richiedono una frequenza < 10 Hz). Le frequenze della sismicità indotta in campi geotermici sono tipicamente 100-300 Hz”.*

## **6 CONCLUSIONI PER IL CAMPO GEOTERMICO DI CASTEL GIORGIO-TORRE ALFINA**

La reiniezione di fluido è pratica corrente in tutti i moltissimi campi geotermici convenzionali in esercizio nel mondo. Le aree interessate sono tutte sismicamente attive ma in esse l’eventuale sismicità indotta è rimasta sempre a livelli lontanissimi da quelli pericolosi e rilevabile solo per via strumentale.

Pertanto, il serbatoio geologico è interessato sempre da valori di portata in reiniezione molto più alti di quelli programmati per i progetti Castel Giorgio e Torre Alfina. Si deve osservare altresì che la geotermia come pratica industriale non può che interessare serbatoi caratterizzati da alta permeabilità della formazione fratturata.

I pozzi che interessano questi serbatoi sono pertanto caratterizzati da una connessione con il serbatoio ad altissima iniettività e produttività, che sono le grandezze fisiche che esprimono la “facilità” con cui pozzi possono ricevere o produrre acqua, rispettivamente. La “facilità” con cui tale passaggio di acqua può avvenire è di solito espresso in t/ora di acqua per ogni bar di pressione necessaria a far transitare il flusso dal pozzo alla formazione, cioè in t/h.bar o m<sup>3</sup>/h.bar.

E' anche evidente che, tanto maggiore è la permeabilità del serbatoio, tanto maggiore risulta l'iniettività. Analogamente, a parità di permeabilità della formazione geologica del serbatoio, tanto maggiore è l'estensione del tratto di pozzo che l'attraversa, tanto maggiore sarà l'iniettività del pozzo. Questa è la ragione per cui una maggiore iniettività dei pozzi viene ricercata anche aumentando la lunghezza del tratto di pozzo che interessa il serbatoio tendendo con ciò a intercettare un maggior numero di fratture presenti nella formazione.

A titolo di riferimento, l'iniettività attesa nelle zone interessate dalla perforazione è di circa  $100\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{bar}$ , come riportato anche nel Progetto Definitivo.

È evidente che tutt'altro valore assumerebbero prove di stimolazione di formazioni geologiche con scarsa o scarsissima permeabilità. Infatti, tali prove necessariamente avvengono esercitando pressione a testa pozzo in modo da "fratturare" la formazione geologica e creare così ex novo un serbatoio. Come già detto, è questo il caso dei cosiddetti progetti EGS (Enhanced Geothermal Systems) che hanno per obiettivo la fratturazione di rocce calde poco o pochissimo permeabili proprio allo scopo di creare una rete di fratture artificiali tali da costituire una sorta di serbatoio geotermico, ovviamente anch'esso artificiale.

Una sismicità indotta è inevitabilmente associata a questi progetti e la maggior parte degli articoli scientifici anche molto recenti pubblicati su riviste internazionali trattano appunto di sismicità indotta in esperimenti di tipo EGS e molti fanno riferimento all'ormai ben noto caso del progetto EGS di Basilea (per esempio: Bachmann et al. 2012, Wang e Ghassemi 2012, Dinske e Shapiro 2013, Douglas et al. 2013, Edwards e Douglas 2013, Gischig e Wiemer 2013, Goertz-Allmann e Wiemer 2013, Shapiro et al. 2013, Kiraly et al. 2014).

Si ripete ancora una volta che le operazioni di reiniezione previste nei progetti geotermici Castel Giorgio e Torre Alfina non prevedono alcuna pressurizzazione della testa pozzo, visto che alla luce dei risultati dell'esplorazione Enel degli anni '80 ci si attende un'elevata permeabilità del serbatoio e quindi un'elevata iniettività dei pozzi.

In un recentissimo articolo, Bromley (2014) fa una nuova rassegna della sismicità registrata nei campi geotermici convenzionali della Nuova Zelanda. Considerato che nella reiniezione profonda a Rotokawa (2-2,5 km) la differenza di temperatura tra il fluido reiniettato e la formazione geologica che lo riceve è di circa  $200\text{ }^\circ\text{C}$ , Bromley (2014) ritiene che i microterremoti registrati in prossimità dei pozzi di reiniezione siano innescati da stress termici transienti dovuti alla contrazione da raffreddamento delle superfici delle fratture.

È interessante rilevare che nelle conclusioni della relazione della Commissione scientifica internazionale ICHESE (2014) insediata dal Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri per valutare se la crisi sismica dell'Emilia Romagna del 2012 potesse essere stata innescata da attività di sfruttamento o di utilizzo di reservoir di idrocarburi o geotermici (Casaglia-Ferrara), viene riportato che *"effetti geo-meccanici dovuti alle variazioni termiche sono stati osservati in altri casi quando la differenza tra le temperature di iniezione ed estrazione è di almeno  $80\text{ }^\circ\text{C}$ ".* Il progetto Castel Giorgio – Torre Alfina prevede una differenza tra le temperature di iniezione e di estrazione di  $70\text{ }^\circ\text{C}$  (vedi Progetto Definitivo), nettamente inferiore al valore limite di  $80\text{ }^\circ\text{C}$  che deve essere superato per poter avere effetti geo-meccanici da raffreddamento (ICHESE, 2014).

Sempre facendo riferimento alle conclusioni della relazione ICHESE (2014) è interessante la descrizione del sistema geotermico di Ferrara (Casaglia) che presenta numerose analogie con quello di Torre Alfina. In entrambi i siti, il serbatoio geotermico è un acquifero confinato in calcari Mesozoici fratturati che formano un alto strutturale. Anche le profondità di estrazione e di reiniezione del fluido (tra 1000 e 2000 metri) sono simili e simili sono le distanze tra pozzi produttivi e reiniettori (circa 1 km).

A Casaglia dal 1995 al 2012 sono stati estratti ed iniettati in totale 36M m<sup>3</sup> di acqua; il volume è quindi bilanciato complessivamente, come è previsto anche nel progetto Torre Alfina. La temperatura del fluido geotermico di Casaglia è di 100 °C ed è rimasta costante dal 1990 (inizio della produzione) e le pressioni di produzione/reiniezione non hanno presentato variazioni significative. La temperatura del fluido geotermico di Torre Alfina è leggermente superiore (140 °C) e la modellizzazione fisico-numerica del campo realizzata con i parametri estrazione – reiniezione di progetto (Allegato 3 del Progetto Definitivo) indica che non sono da attendersi variazioni significative di temperatura e pressioni.

Ebbene, dall'inizio della produzione nel 1990 ad oggi, non è stata registrata alcuna particolare sismicità associata allo sfruttamento del sistema geotermico di Ferrara; in particolare la commissione ICHESE esclude che l'attività geotermica di Ferrara possa aver causato la crisi sismica del 2012.

Tornando alla sismicità dei campi geotermici della Nuova Zelanda, Bromley (2014) riferisce che, come a Castel Giorgio, in molti casi la permeabilità del serbatoio è alta, tanto da non richiedere pompaggio per la reiniezione e che quindi l'aumento di pressione è basso nel settore dove avviene la reiniezione. Ciò nonostante, transienti di pressione che si propagano attraverso un reticolato di fratture interconnesse potrebbero essere responsabili per l'innescamento di microsismicità se le rocce del serbatoio fossero già criticamente stressate per cause naturali.

In merito alla definizione di sismicità indotta e sismicità innescata, si ritiene utile riprodurre di seguito una parte delle Conclusioni della relazione ICHESE (2014).

*“ Nella letteratura scientifica viene spesso adottata una distinzione dei terremoti nelle seguenti categorie:*

*- **Terremoti tettonici**, che sono prodotti dai sistemi di sforzo naturali, dove lo sforzo tettonico ha superato lo sforzo di attrito esistente e la regione era “matura” da un punto di vista sismico.*

*- **Terremoti antropogenici**, nei quali l'attività umana ha avuto un qualche ruolo nel portare il sistema al punto di rottura:*

*a) **Terremoti indotti**, nei quali uno sforzo esterno, prodotto dalle attività antropiche, è sufficientemente grande da produrre un evento sismico in una regione che non era necessariamente sottoposta a un campo di sforzi tale da poter generare un terremoto in un futuro ragionevolmente prossimo (in senso geologico). Cadono in questa categoria i terremoti prodotti da procedimenti di stimolazione termica o idraulica di una roccia, quali la Fratturazione Idraulica (Fracking) e gli Enhanced Geothermal Fields.*

*b) **Terremoti innescati**, per i quali una piccola perturbazione generata dall'attività umana è sufficiente a spostare il sistema da uno stato quasi-critico ad uno stato instabile. L'evento sismico sarebbe comunque avvenuto prima o poi, ma probabilmente in tempi successivi e non precisabili. In altre parole, il terremoto è stato anticipato. In questo caso lo sforzo perturbante “aggiunto” è spesso molto piccolo in confronto allo*

*sforzo tettonico pre-esistente. La condizione necessaria perché questo meccanismo si attivi è la presenza di una faglia già carica per uno sforzo tettonico, vicina ad un sito dove avvengono azioni antropiche che alterano lo stato di sforzo, dove vicina può voler dire anche decine di chilometri di distanza a seconda della durata e della natura dell'azione perturbante. In alcuni casi queste alterazioni possono provocare l'attivazione della faglia già carica. E' importante ricordare che, poiché in questo caso le operazioni tecnologiche attivano solamente il processo di rilascio dello sforzo tettonico, la magnitudo dei terremoti innescati può essere grande, dello stesso ordine di quella dei terremoti tettonici, e dipenderà dall'entità della deformazione elastica accumulata sulla faglia a causa del carico tettonico.*

*Numerosi rapporti scientificamente autorevoli descrivono casi ben studiati nei quali l'estrazione e/o l'iniezione di fluidi in campi petroliferi o geotermici è stata associata al verificarsi di terremoti, a volte anche di magnitudo maggiore di 5. E' difficile, a volte impossibile, utilizzare il termine provata per questi casi. I casi riportati sono solo una piccola percentuale di tutti i casi esistenti di estrazione ed iniezione di fluidi, e si riferiscono in gran parte all'aumento di pressione di carico legato a serbatoi molto grandi e a iniezioni di grandi volumi di fluido (in genere acqua di processo) nella roccia circostante, non nello stesso serbatoio in cui avviene l'estrazione, durante operazioni per recupero avanzato di idrocarburi o per tenere costante la pressione. Esistono comunque alcuni casi in cui l'attività sismica è stata associata a re-iniezione di acqua di processo nello stesso serbatoio dal quale è stato estratto olio o gas.*

*Le principali conclusioni che si possono trarre dai casi riportati sono:*

- Estrazioni e/o iniezioni legate allo sfruttamento di campi petroliferi possono produrre, in alcuni casi, una sismicità indotta o innescata;*
- La maggior parte dei casi documentati in cui una attività sismica è stata associata a operazioni di sfruttamento di idrocarburi è relativa a processi estrattivi da serbatoi molto grandi o a iniezione di acqua in situazioni in cui la pressione del fluido non è bilanciata;*
- Il numero di casi documentati di sismicità di magnitudo medio-alta associabile a iniezione di acqua nello stesso serbatoio da cui ha avuto luogo l'estrazione di idrocarburi è una piccola percentuale del numero totale;*
- La sismicità indotta e, ancor più, quella innescata da operazioni di estrazione ed iniezione sono fenomeni complessi e variabili da caso a caso, e la correlazione con i parametri di processo è ben lontana dall'essere compresa appieno;*
- La magnitudo dei terremoti innescati dipende più dalle dimensioni della faglia e dalla resistenza della roccia che dalle caratteristiche della iniezione;*
- Ricerche recenti sulla diffusione dello sforzo suggeriscono che la faglia attivata potrebbe trovarsi anche a qualche decina di chilometri di distanza e a qualche kilometro più in profondità del punto di iniezione o estrazione, e che l'attivazione possa avvenire anche diversi anni dopo l'inizio dell'attività antropica;*
- La maggiore profondità focale di alcuni terremoti rispetto all'attività di estrazione associata è stata interpretata come una evidenza diretta del fatto che l'estrazione o l'iniezione di grandi volumi di fluidi può indurre deformazioni e sismicità a scala crostale;*
- Esistono numerosi casi di sismicità indotta da operazioni di sfruttamento dell'energia geotermica. La maggior parte di essi è legata allo sviluppo di Enhanced Geothermal Systems, nei quali vengono provocate fratture in rocce ignee impermeabili per produrre delle zone permeabili. Esistono anche diversi casi di*

*terremoti associati all'utilizzazione tradizionale dell'energia geotermica. I terremoti prodotti sono di magnitudo medio-bassa e a distanze non più grandi di alcuni chilometri dai pozzi di estrazione o iniezione.*

*- L'esame di tutta la letteratura esistente mostra che la discriminazione tra la sismicità indotta o innescata e quella naturale è un problema difficile, e attualmente non sono disponibili soluzioni affidabili da poter essere utilizzate in pratica”.*

Da quanto finora detto, si può concludere che è escluso che il progetto Castel Giorgio – Torre Alfina possa produrre sismicità indotta, mentre non si può escludere che terremoti di magnitudo medio-bassa possono essere innescati dalla reiniezione dei fluidi, ove esistano faglie già cariche e “favorevolmente” orientate in prossimità del sito. In ogni caso, come risulta dalla rassegna mondiale di Bromley (2012) non sono da attendersi terremoti di magnitudo elevata in un sistema idrotermale naturale come quello di Castel Giorgio - Torre Alfina.

Alcuni dati interessanti sulla sismicità indotta in sistemi EGS sono stati pubblicati da Gischig e Wiemer (2013), secondo i quali la sismicità sembra in relazione più con il volume del fluido iniettato che con la pressione di iniezione ed è fortemente dipendente dalla profondità dell'iniezione (Fig.5). Considerato che a Castel Giorgio - Torre Alfina la profondità di reiniezione del fluido geotermico è inferiore a 2,5 km di profondità (vedi Progetto Definitivo), risulterebbe dalla Fig.5 che l'eventuale sismicità associata dovrebbe essere di bassa magnitudo (<2) e bassa pericolosità (< III grado EMS).

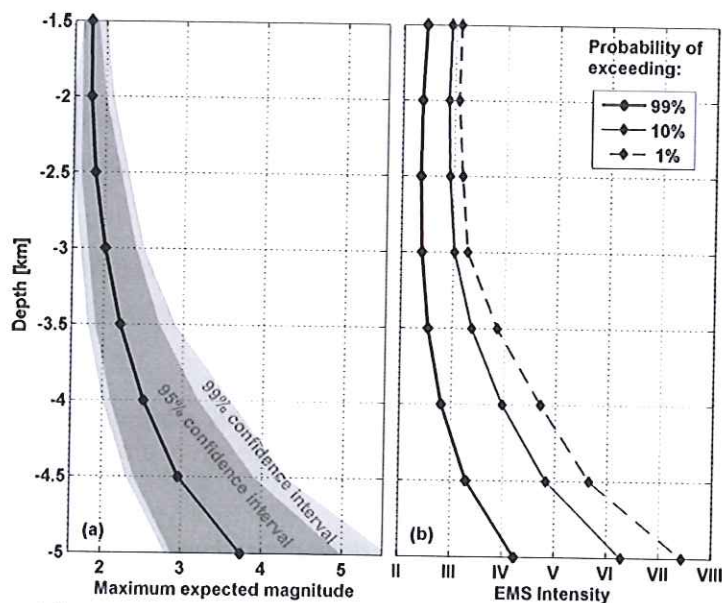


Figura 5. Dipendenza dalla profondità della iniezione di fluido della magnitudo massima attesa, con intervalli di confidenza del 95 e 99 percento (a) e della pericolosità sismica espressa come intensità EMS, con una probabilità di eccedenza del 99,10 e 1 percento (b) ottenuta da 1000 applicazioni del modello di Gischig e Wiemer (2013).

In relazione, infine, alla possibilità di valutare la pericolosità sismica della reiniezione di fluido geotermico, peraltro sempre in progetti EGS, si ricorda che Shapiro et al. (2013) e Dinske e Shapiro (2013) hanno introdotto l'indice sismogenico

$$\Sigma = \log_{10} N_{\geq M}(t) - \log_{10} V_1(t) + bM \quad (1)$$

dove  $N$  è il numero di terremoti con magnitudo superiore ad un dato valore  $M$ ,  $V_1(t)$  è il volume cumulativo del fluido iniettato e  $b$  è il valore  $b$  della legge magnitudo-frequenza di Gutenberg-Richter per gli eventi registrati dopo l'inizio dell'iniezione di fluido. Secondo gli autori citati, l'indice sismogenico fornisce, insieme con il parametro  $b$  della Gutenberg-Richter, uno strumento per prevedere il numero di terremoti con una magnitudo superiore a  $M$ , che verranno probabilmente generati durante un processo di iniezione di fluidi. L'equazione (1) è valida nell'assunzione che in ogni dato sito, l'indice sismogenico e il valore  $b$  siano costanti (Dinske e Shapiro, 2013); ma questa assunzione è contraddetta dalle misure sulla sismicità indotta registrata nell'esperimento EGS di Basilea del 2006, dove è stato osservato che il valore  $b$  variava con la distanza dal punto di iniezione, in particolare aumentava fino a circa 250 m e poi diminuiva per distanze maggiori (Bachmann et al., 2012).

In ogni caso, la stima dell'indice sismogenico è possibile solo nel corso di un esperimento di reiniezione, quando si conosce il volume di fluido iniettato nel tempo, e la rete microsismica locale fornisce il numero degli eventi, la loro magnitudo e i dati consentono di calcolare il valore  $b$  di Gutenberg-Richter.

Considerato che più grande è l'indice sismogenico, più alta è la probabilità di indurre un terremoto di magnitudo significativa, si ritiene che lo studio dell'eventuale sismicità associata alle perdite di circolazione nel serbatoio che si verificheranno durante la perforazione dei pozzi profondi e durante le stesse prove di iniezione, consentiranno una valutazione precoce della relazione Gutenberg-Richter e dell'indice sismogenico e potranno anche suggerire la più adeguata strategia di reiniezione per limitarne gli eventuali effetti.

## 6.1 TEST PRELIMINARI DI VALUTAZIONE DEL COMPORTAMENTO DEI POZZI

Come si è visto dalla rassegna riportata al precedente paragrafo 3, ai tempi dell'esplorazione profonda eseguita dall'ENEL furono eseguite prove di produzione dal pozzo A14 con reiniezione nel pozzo A4. Durante queste prove non fu rilevata alcuna microsismicità dalla rete di monitoraggio all'uopo predisposta.

A tutto ciò si deve aggiungere che la perforazione dei pozzi A4 e A14 era sicuramente avvenuta in perdita di circolazione, che implica iniezione di acqua nel serbatoio con portata prossima a quella con cui era stata fatta la reiniezione del fluido geotermico e anche durante tali fasi non era stata rilevata alcuna sismicità anomala.

Tutto ciò trova spiegazione nel fatto, peraltro ben conosciuto, che i pozzi A4 e A14 interessano zone di altissima permeabilità del serbatoio. Infatti la pressione del fluido geotermico in formazione è tale per cui il livello di acqua in pozzo, in condizioni di equilibrio statico, si posiziona intorno a 170-200m dal piano campagna e come rilevato da Batini et al.(1980b), la pressione di testa pozzo è sempre risultata zero durante le prove a conferma dell'altissima permeabilità della formazione serbatoio.

Le condizioni del serbatoio geotermico sono tali per cui la sua perforazione avverrà, almeno da una certa profondità, in perdita di circolazione. Ciò è conseguenza diretta del fatto che la profondità del serbatoio, nelle zone selezionate per la perforazione dei pozzi produttivi e reiniettivi, fa sì che il fluido si trovi in condizioni "sotto pressione", come dimostra la presenza di livello statico di acqua in pozzo a circa 200 metri in entrambi i pozzi A4 e A14.

Ciò significa che durante la perforazione del serbatoio si avrà già una prima risposta al comportamento dei pozzi riguardo l'eventuale attivazione di microsismicità perché la portata di acqua utilizzata per la perforazione assumerà un valore di circa il 50% di quella che caratterizzerà la successiva fase di reiniezione.

Inoltre, durante la perforazione, come descritto nello SIA, sono previste prove di caratterizzazione iniettiva per via idraulica dei singoli pozzi. Durante queste prove, utili anche per stabilire la fine delle operazioni di perforazione, si prevede di impiegare una portata di acqua prossima al valore della reiniezione nei singoli pozzi.

Pertanto, la risposta del campo, rilevata attraverso la rete di monitoraggio microsismica dedicata, fornirà durante la perforazione in perdita di circolazione e durante i test di caratterizzazione iniettiva/produttiva dei pozzi, un'informazione efficace del suo comportamento ai fini della microsismicità indotta.

Il fatto che la sismicità indotta rilevata ai tempi delle prove nel pozzo RA1 (vedi paragrafo 3) sia stata rilevata con valori di portata assolutamente confrontabili con quelli di perforazione del serbatoio, conferisce particolare valore e significatività al programma suddetto. Per maggior chiarezza, si osserva che le condizioni del serbatoio e delle perforazioni nell'area dei pozzi A4 e A14 non sono le stesse che si ebbero nel pozzo RA1 sotto due aspetti:

- uno, legato alla minore permeabilità del serbatoio; in effetti l'iniettività riscontrata nel pozzo RA1 risultò decisamente inferiore a quella dei pozzi A4, A14 e vari altri perforati nell'altipiano di Torre Alfina; una stima delle condizioni di iniezione porta a ritenere che questi ultimi siano stati caratterizzati da una iniettività almeno 10 volte superiore a quella rilevata in RA1; le stesse prove di stimolazione per fratturazione durante le quali fu rilevata attivazione microsismica in RA1 furono ritenute necessarie per incrementare l'iniettività del pozzo ritenuta del tutto insufficiente;
- due, la testa pozzo di RA1 era posta a circa 290 metri slm mentre la quota dei pozzi A4 e A14 è a circa 535 metri s.l.m.; ciò significa che, interessando lo stesso serbatoio, il pozzo RA1 non poteva essere oggetto del fenomeno della perdita di circolazione; mancarono dunque le condizioni per una rilevazione preliminare della sensibilità dell'area al fenomeno della sismicità indotta.

In conclusione, sussistono le condizioni operative per avere una verifica della suscettibilità sismica già in fase di perforazione e caratterizzazione dei pozzi e il programma delle prove di caratterizzazione dei pozzi, comunque previsto e riportato nel Progetto Definitivo, consente di rispondere pienamente a tale esigenza.



## Riferimenti bibliografici.

Amici della Terra, Firenze – Onlus (2008). *“La risorsa geotermica per usi elettrici in Italia: Energia, Ambiente e Accettabilità sociale”*.

Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale ARPAT sito web : [www.arpat.toscana.it](http://www.arpat.toscana.it)

Bachmann C. E., Wiemer S., Goertz-Allmann B. P., Woessner J. (2012). Influence of pore-pressure on the event-size distribution of induced earthquakes. *Geophys.Res.Lett.* vol. 39.

Batini F., C. Bufe, G.M. Cameli, R. Console, A. Fiordelisi (1980a). *“Seismic monitoring in Italian geothermal areas 1. Seismic activity in the Larderello - Travale region”* . Second DOE - ENEL Workshop for Cooperative Research in Geothermal Energy, 20–23 October, Berkeley, California, U.S.A.

Batini, F., Cameli, G.M., Carabelli, E., Fiordelisi, A., (1980b). *“Seismic monitoring in Italian geothermal areas II: seismic activity in the geothermal fields during exploitation”*. In: Proceedings of Second DOE-ENEL Workshop on Cooperative Research in Geothermal Energy, Report LBL-11555, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA, USA, October 20–22, pp. 48–85.

Batini, F., R. Console, and G. Luongo (1985). *“Seismological study of the Larderello-Travale geothermal area”*. *Geothermics*, 14, 255.

Batini F., Fiordelisi A., Moia F. (1990) *“Main features of the seismicity in the Monte Amiata and Latera geothermal areas (Italy)”*. Proc. XXII Gen. Assoc. of the European Seismological Commission, Barcelona, pp. 649–654

Bromley C.,(2014). Seismicity and Subsidence: Examples of Observed Geothermal Deformation Synergies from New Zealand. PROCEEDINGS, Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering.

Bromley C.,(2012) *“ Geothermal Induced Seismicity: Summary of International Experience”*. IEA-GIA Environmental Mitigation Workshop Taupo, 15-16 June 2012.

Cappetti G., Romagnoli P. and Sabatelli F. (2010). *“Geothermal Power Generation in Italy 2005–2009 Update Report”*. Proceedings World Geothermal Congress Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.

Cladouhos T., Petty S., Foulger G., Julian B. and Fehler M. (2010) *“Injection Induced Seismicity and Geothermal Energy”*. GRC Transactions, Vol. 34.

Dinske C. Shapiro (2013). Seismotectonic state of reservoirs inferred from magnitudedistributions of fluid-induced seismicity. *J Seismol.*

Douglas J., Edwards B., Convertito V., Sharma N., Tramelli A., Kraaijpoel D., Cabrera B. M., Maercklin N., Troise C. Predicting Ground Motion from Induced Earthquakes in Geothermal Areas. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 103, No. 3, pp. 1875–1897.

Edwards B., and Douglas J. (2013). Selecting ground-motion models developed for induced seismicity in geothermal areas, *Geophysical Journal International*, 195(2), 1314–1322.

Evans K.F., Zappone A., Kraft T., Deichmann N., Moia F. (2012). *“A survey of the induced seismic responses to fluid injection in geothermal and CO<sub>2</sub> reservoirs in Europe”*. *Geothermics* 41, 30– 54.

Goertz-Allmann B. P., and Wiemer S. (2013). Geomechanical modeling of induced seismicity source parameters and implications for seismic hazard assessment, *Geophysics*, 78(1).

ICHESE (2014). Report on the Hydrocarbon Exploration and Seismicity in Emilia Region. Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 213pp.

Király E., Gischig V., Karvounis D., Wiemer S. (2014). Validating Models to Forecasting Induced Seismicity Related to Deep Geothermal Energy Projects. PROCEEDINGS, Thirty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering.

Moia F. (2008). *“Individuazione ed applicazione di metodologie di monitoraggio di possibili fughe di CO<sub>2</sub> dai serbatoi di stoccaggio”*. Rapporto CESI, Area Produzione e Fonti Energetiche.

Rapporto Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) (2001). *“Valutazione della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle emanazioni gassose nell’area amiatina in relazione all’utilizzazione dei campi geotermici da parte dell’Erga”*.

Romagnoli P., Arias A., Barelli A., Cei M., Casini M. (2010) *“An updated numerical model of the Larderello-Travale geothermal system, Italy”*. *Geothermics* 39, Issue 4, 292–313.

Shapiro S. A. and C. Dinske (2009). *“Scaling of seismicity induced by nonlinear fluid-rock interaction”*. *J. Geophys. Res.* 114.

Shapiro S., Dinske C. and Kummerow J. (2007). *“Probability of a given-magnitude earthquake induced by a fluid injection”*. *Geophys. Res. Lett.* 34, 2007.

Shapiro S. A., Kruger O. S., Dinske, C. (2013). Probability of inducing given-magnitude earthquakes by perturbing finite volumes of rocks, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(7), 3557–3575.

Wang X. and Ghassemi A. (2012). A 3d thermal-poroelastic model for geothermal reservoir stimulation. *GRC Transactions*, Vol. 36.

Allegato 3  
alle risposte A.1) c, d, e



**Istituto Nazionale di  
Geofisica e Vulcanologia**

## **Sismicità storica e recente dell'area geotermica di Torre Alfina**

Rapporto per ITW & LKW Geotermia Italia S.p.A., Aprile 2013



# Indice

|  |               |
|--|---------------|
| <b>1. Premessa</b>   | <b>pag. 4</b> |
| <b>2. Analisi della sismicità storica e recente dell'area geotermica di Torre Alfina (Comuni di Acquapendente, Castel Giorgio e Castel Viscardo)</b> | <b>4</b>      |
| - <b>2.1 Terremoti risentiti nell'area di Torre Alfina</b>   | <b>8</b>      |
| - <b>2.2 Descrizioni dei principali eventi storici avvenuti nell'area compresa tra Acquapendente, Castel Giorgio e Castel Viscardo</b>               | <b>11</b>     |
| - <i>Evento di Acquapendente 1 Novembre 1755</i>   | <i>11</i>     |
| - <i>Evento di San Lorenzo Nuovo 11/13 Agosto 1888</i>   | <i>12</i>     |
| - <i>Periodo sismico del 1920 nel Viterbese (risentimenti ad Acquapendente)</i>  | <i>13</i>     |
| - <i>Periodo sismico svoltosi dal 29 Novembre al 4 Dicembre 1921</i>   | <i>13</i>     |
| - <i>Evento di Acquapendente del 9 Aprile 1924</i>   | <i>13</i>     |
| - <i>Evento di Castel Giorgio 6 dicembre 1957</i>  | <i>14</i>     |
| - <b>2.3 Descrizioni dei principali eventi risentiti nell'area, con relativa descrizione</b>   | <b>16</b>     |
| - <i>Evento di Civita Bagnoregio 6 Novembre 1695</i>   | <i>16</i>     |
| - <i>Evento di Radicofani del 5 ottobre 1777</i>   | <i>18</i>     |
| - <i>Evento di Città della Pieve del 9 maggio 1861</i>   | <i>20</i>     |
| - <i>Evento di Santa Fiora 12 febbraio 1905</i>  | <i>20</i>     |
| - <i>Evento di Avezzano del 13 gennaio 1915</i>  | <i>21</i>     |
| - <i>Evento di Piancastagnaio del 10 settembre 1919</i>  | <i>21</i>     |
| - <i>Evento di Abbadia S.Salvatore dell'8 gennaio 1926</i>   | <i>21</i>     |
| - <i>Evento di Onano del 15 giugno 1936</i>  | <i>21</i>     |
| - <i>Evento di Tuscania del 6 febbraio 1971</i>  | <i>21</i>     |
| - <i>Evento di Valnerina del 19 settembre 1979</i>   | <i>22</i>     |
| - <i>Crisi sismica del febbraio 1992</i>   | <i>22</i>     |
| - <i>Evento di Gualdo Tadino del 5 giugno 1993</i>   | <i>22</i>     |
| - <i>Crisi sismica umbro-marchigiana del 1997-1998</i>   | <i>22</i>     |
| - <i>Evento del M. Amiata del 1 aprile 2000</i>  | <i>22</i>     |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>3. Sismicità strumentale</b>  | <b>23</b> |
| - <b>3.1 Le reti sismiche di monitoraggio nel territorio di Torre Alfina</b> | <b>23</b> |
| - <b>3.2 L'attività sismica tra il 1984 e il 2013</b>                        | <b>24</b> |
| - <b>3.2.1 Lo sciame sismico di Castel Giorgio del 1992</b>                  | <b>30</b> |
| <b>4. Meccanismi focali</b>  | <b>35</b> |
| <b>5. Conclusioni</b>  | <b>36</b> |
| <b>6. Riferimenti bibliografici</b>  | <b>38</b> |

## **1. Premessa**

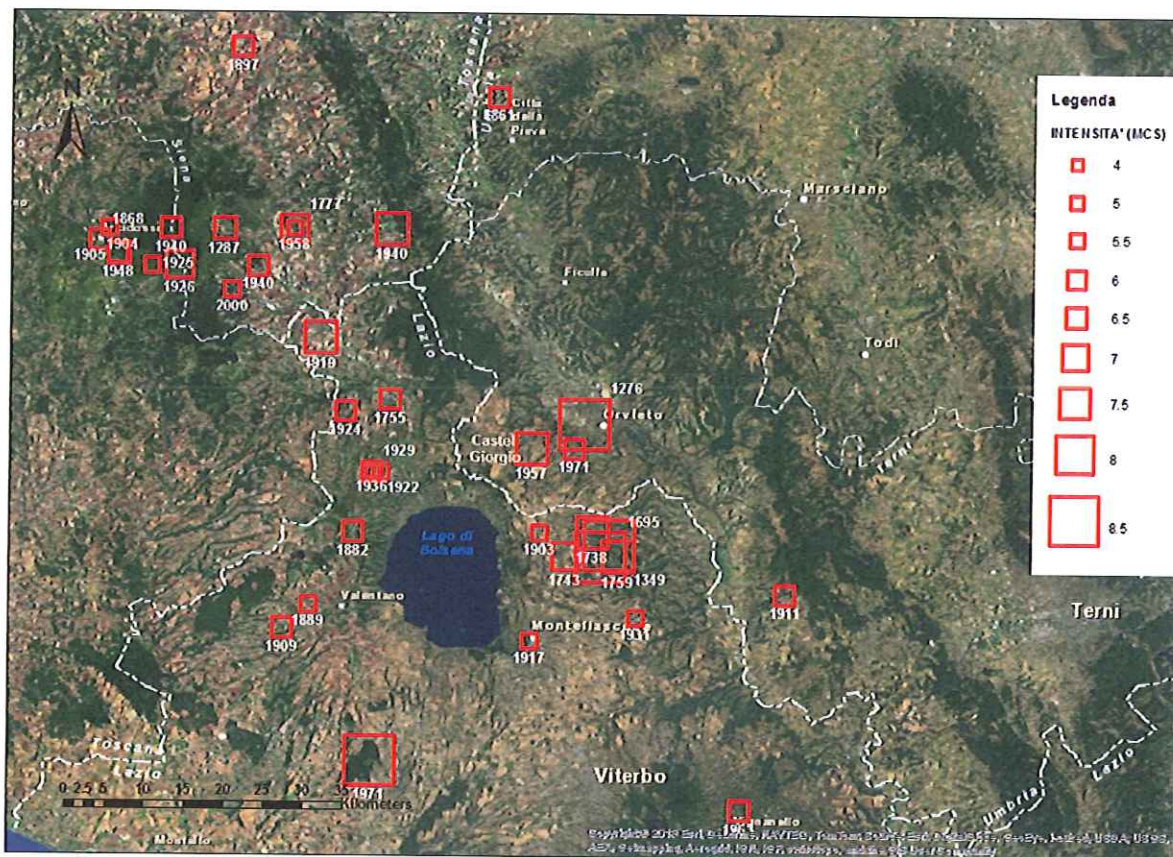
Il presente studio sulla sismicità storica e recente dell'area geotermica di Torre Alfina è stato svolto nell'ambito della convenzione stipulata da INGV-Sezione Roma 1 con ITW & LKW Geotermia Italia SpA ed è stato realizzato dai dr. Alessandro Gattuso, Nicola Pagliuca, Antonio Rovelli e Maria Luisa Carapezza. Nella stessa Convenzione è stato anche stabilito che l'INGV svolgerà attività di monitoraggio sismico e geochimico nella zona geotermica di Castel Giorgio-Torre Alfina, realizzando una rete microsismica dedicata, installando strumenti per il controllo della concentrazione di gas in aria e monitorando le emissioni di gas e la composizione chimica dell'acquifero nelle vulcaniti, nei dintorni dei pozzi.

## **2. Analisi della sismicità storica e recente dell'area geotermica di Torre Alfina (Comuni di Acquapendente, Castel Giorgio e Castel Viscardo)**

Il catalogo sismico nazionale più aggiornato è il Catalogo parametrico dei terremoti italiani 2011, CPTI11 (Rovida et al., 2011), che deriva dai precedenti Cataloghi Parametrici dei Terremoti Italiani (Gruppo di lavoro CPTI, 2004 e CPTI, 1999) e dal Database macrosismico italiano DBMI11 (Locati et al., 2011). Questo catalogo è stato preceduto da altre raccolte, tuttora fonti di informazioni utili, come il Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (CFTI, Boschi et al., 1995, 1997, 2000; CFTI4Med, Guidoboni et al., 2007), i cataloghi NT del GNDT (Camassi e Stucchi, 1997) ed anche il meno recente catalogo del Progetto Finalizzato Geodinamica (Postpischl, 1985). Sono inoltre utili le informazioni riportate in alcuni studi specifici (De Panfilis, 1959, 1969; Guidoboni e Comastri, 2005; Monachesi et al., 1995; Monachesi e Stucchi, 1997; Valensise e Pantosti, 2001; DISS, 2010). I dati riportati in questa relazione derivano principalmente dal catalogo CPTI11, con alcune integrazioni prese dagli altri cataloghi e lavori citati sopra.

Dall'analisi dei cataloghi storici presenti in letteratura si evince come l'area geotermica di Torre Alfina (Fig. 1) sia stata interessata in passato da alcuni eventi sismici di intensità sufficiente a provocare un danneggiamento nelle strutture abitative come dimostra l'estrazione della sismicità storica per eventi con intensità  $I_0 \geq 5$ , per un raggio di 50 km dal Comune di Castel Giorgio (Tab. 1). La magnitudo momento riportata in Tab.1 corrisponde al parametro  $M_w$  del catalogo CPTI11, che è una media pesata di varie magnitudo, come descritto nel catalogo. I valori di intensità macrosismica epicentrale ( $I_0$ ), tratti da CPTI11, sono espressi in unità MCS (Mercalli-Cancani-Sieberg).

Va tenuto presente che il territorio in esame è esposto anche agli effetti provocati dai terremoti forti che avvengono in zone sismiche relativamente vicine, situate in Lazio, Toscana, Umbria e Marche, come risulta dall'esame della Tab.1.



**Fig. 1.** Mappa della sismicità storica dell'area di Torre Alfina e delle zone limitrofe, estratta dal DISS (2010) e dal catalogo storico DBMI11 (Locati et al., 2011), modificata. Gli eventi sismici sono indicati con riquadri in colore rosso le cui dimensioni sono proporzionali all'intensità del terremoto.

Nella Fig. 1 è indicata la posizione epicentrale delle scosse avvenute nell'area, con dimensione dei simboli proporzionale all'intensità del terremoto.

In Fig. 1 sono riportati anche altri epicentri di scosse con  $I_0 > 5$ , avvenute fuori dell'area in esame, sia per evidenziare la possibile estensione delle strutture sismogenetiche sia per fornire informazioni su scosse che, per quanto poco intense, possono provocare danni significativi se l'epicentro è vicino a centri abitati o/e la struttura locale favorisce l'amplificazione degli scuotimenti.



Si può notare che i terremoti tendono a concentrarsi in alcune zone, rispetto all'area di Torre Alfina:

- 1) Una zona a NW, associata al complesso vulcanico del Monte Amiata e all'adiacente bacino di Radicofani, corrisponde alla parte sud-occidentale della Toscana;
- 2) l'area propria dei Vulsini, a ridosso del lago di Bolsena, che presenta due zone a sensibilità elevata, la prima ad Est del Lago di Bolsena (comprendente i comuni di Bagnoregio, Celleno e Lubriano), la seconda ad Ovest di Viterbo (comune di Tuscania).
- 3) Un settore più distante da Torre Alfina e associato all'Appennino, con particolare riguardo al settore Umbro-Marchigiano (non riportato in mappa);

La Tab.1 mette in evidenza che solo 4 eventi storici, avvenuti tra il 1276 ed il 1743 e con epicentro rispettivamente nell'Orvietano, in una zona genericamente indicata come Viterbese-Umbria, a Civita Bagnoregio e a Bagnoregio, hanno una magnitudo ( $M_w$ ) superiore a 5.5, cioè confrontabile, ad esempio, con quella della scossa che nel 1997 ha colpito l'Umbria e le Marche ( $M_w$  tra 5.5 e 6.0).

La sismicità storica è distribuita nel tempo in modo irregolare e sono pochi gli eventi riportati prima del 1890, periodo dal quale in Italia il servizio di rilevamento dei fenomeni sismici ha subito un notevole miglioramento. Tant'è che per "epoca storica" dei terremoti si intende quella precedente alla data dalla quale sono disponibili registrazioni strumentali (approssimativamente dal 1900 in poi).

Infatti, i cataloghi sismici sopra citati riportano localizzazioni epicentrali e magnitudo degli eventi sismici sul territorio nazionale a partire dalle più antiche notizie storiche reperibili, fino ai nostri giorni. La magnitudo dei terremoti precedenti al 1975 è quasi esclusivamente macrosismica (cioè ricavata dall'intensità epicentrale attraverso una formula di correlazione standard).

Pertanto, se si escludono i dati strumentali degli ultimi 30 anni, i parametri dei terremoti riportati nei cataloghi, come la posizione dell'epicentro e la magnitudo, sono dedotti dalle intensità macrosismiche. Questo perché la disponibilità di dati strumentali adeguati esiste solo per gli ultimi decenni del secolo scorso. Infatti è solo dopo i terremoti catastrofici del Friuli e dell'Irpinia che si assiste alla riorganizzazione dell'Istituto Nazionale di Geofisica ed alla creazione di una efficiente rete sismometrica nazionale. Per i terremoti più recenti, invece, le coordinate epicentrali e le magnitudo sono quelle misurate strumentalmente attraverso i sismogrammi della rete sismica nazionale centralizzata (<http://terremoti.ingv.it/it/reti-di-monitoraggio.html>).

*Tab. 1. Elenco dei terremoti storici con  $I_0 > 5$  avvenuti in un raggio di 50 km dal Comune di Castel Giorgio dopo l'anno 1000.*

| Data (a/m/g) | Luogo                   | Mw          | $I_0$ | Fonti                           |
|--------------|-------------------------|-------------|-------|---------------------------------|
| 1276/05/22   | ORVIETANO               | 5.57        | 8-9   | CPTI 11                         |
| 1287         | ABBADIA S. SALVATORE    | 4.93 ± 0.34 | 6.5   | CPTI 11                         |
| 1349/09/09   | VITERBESE-UMBRIA        | 5.57        | 8-9   | CFTI 4 MED (Non parametrizzato) |
| 1695/06/11   | CIVITA BAGNOREGIO       | 5.67 ± 0.25 | 8-9   | CPTI 11                         |
| 1738/07/19   | BAGNOREGIO              | 5.37 ± 0.30 | 7.5   | DBMI 11 – DOM (ENEL 1995).      |
| 1743/01/21   | BAGNOREGIO              | 5.57        | 7     | CFTI 4 MED                      |
| 1755/11/01   | ACQUAPENDENTE           | 5.03 ± 0.33 | 6-7   | (DBMI 11) DOM (ENEL, 1995)      |
| 1759/06/14   | BAGNOREGIO              | 4.63 ± 0.13 | 7.5   | (DBMI 11) DOM (ENEL, 1995)      |
| 1777/10/05   | RADICOFANI              | 5.37 ± 0.30 | 7     | (DBMI 11) DOM (ENEL, 1995)      |
| 1819/05/26   | TARQUINIA               | 5.14 ± 0.34 | 7.0   | CPTI 11, ENEL, 1995             |
| 1861/05/09   | CITTA' DELLA PIEVE      | 5.03 ± 0.33 | 6-7   | (DBMI 11) DOM (ENEL, 1995)      |
| 1868/06/17   | ARCIDOSO                | 4.51 ± 0.34 | 6-7   | CPTI 11, ENEL, 1995             |
| 1877/12/23   | CAPRANICA               | 4.51 ± 0.36 | 6     | CPTI 11 , Dell'Olio & M., 1980. |
| 1882/01/13   | LATERA                  | 4.83 ± 0.26 | 6.0   | (DBMI 11) DOM (ENEL, 1995)      |
| 1889/07/21   | ISCHIA DI CASTRO        | 4.63 ± 0.13 | 5.5   | (DBMI 11) DOM (ENEL, 1995)      |
| 1897/11/15   | PIENZA                  | 4.72 ± 0.34 | 6     | CPTI11, Postpischl, 1985        |
| 1901/01/19   | ORVIETO                 | 4.30 ± 0.34 | 5     | CPTI 11, ENEL, 1995             |
| 1901/06/19   | ATTIGLIANO              | 4.72 ± 0.34 | 6     | CPTI11, Postpischl, 1985        |
| 1902/12/17   | SANTA FIORA             | 4.86 ± 0.33 | 6-7   | CPTI 11, ENEL, 1995             |
| 1903/06/21   | BAGNOREGIO              | 4.51 ± 0.34 | 5-6   | CPTI 11, ENEL, 1995             |
| 1904/09/07   | ARCIDOSO                | 4.51 ± 0.34 | 5-6   | CPTI11, Postpischl, 1985        |
| 1905/02/12   | SANTA FIORA             | 4.66 ± 0.29 | 6     | CPTI 11, ENEL, 1995             |
| 1909/09/20   | VALENTANO               | 4.72 ± 0.34 | 6     | CPTI11, Postpischl, 1985        |
| 1911/01/18   | ATTIGLIANO              | 4.72 ± 0.34 | 6     | CPTI11, Postpischl, 1985        |
| 1917/10/14   | MONTEFIASCONE           | 4.34 ± 0.29 | 5-6   | CPTI 11, ENEL, 1995             |
| 1919/09/10   | PIANCASTAGNAIO          | 5.32 ± 0.18 | 7-8   | CPTI 11, ENEL, 1995             |
| 1922/03/27   | GROTTE DI CASTRO        | 4.38 ± 0.47 | 5-6   | CPTI 11, ENEL, 1995             |
| 1924/04/09   | ACQUAPENDENTE           | 4.63 ± 0.13 | 6-7   | DBMI 11 DOM (ENEL, 1995)        |
| 1925/09/03   | ABBADIA S. SALVATORE    | 4.51 ± 0.34 | 5-6   | CPTI11, Postpischl, 1985        |
| 1926/01/08   | ABBADIA<br>S. SALVATORE | 4.97 ± 0.15 | 7     | DBMI 11 DOM (ENEL, 1995)        |
| 1931/05/13   | CELLENO                 | 4.63 ± 0.13 | 5.5   | DBMI 11 DOM (ENEL, 1995)        |
| 1936/06/15   | ONANO                   | 4.63 ± 0.13 | 4-5   | DBMI 11 DOM (ENEL, 1995)        |
| 1940/02/04   | ABBADIA                 | 4.72 ± 0.34 | 6     | CPTI11, Postpischl, 1985        |
| 1940/06/19   | RADICOFANI              | 4.83 ± 0.15 | 6.0   | DBMI 11 DOM (ENEL, 1995)        |
| 1940/10/16   | RADICOFANI              | 5.30 ± 0.07 | 7-8   | DBMI 11 DOM (ENEL, 1995)        |
| 1948/11/03   | MONTE AMIATA            | 5.03 ± 0.33 | 6.5   | DBMI 11 DOM (ENEL, 1995)        |

|             |               |             |     |   |
|-------------|---------------|-------------|-----|---|
| 1957/12/06  | CASTELGIORGIO | 4.93 ± 0.21 | 7-8 | CPTI 11, ENEL, 1995                             |
| 1958/05//30 | RADICOFANI    | 4.63 ± 0.13 | 5   | DBMI 11, DOM(Dell'Olio & M., 1980)              |
| 1963/09/02  | VIGNANELLO    | 4.72 ± 0.34 | 6.0 | CPTI11, Postpischl, 1985                        |
| 1971/02/06  | TUSCANIA      | 4.80 ± 0.14 | 8-9 | CPTI 11, ENEL, 1995                             |
| 1971/03/02  | ORVIETO       | 4.59 ± 0.28 | 6.0 | CPTI11, Postpischl, 1985                        |
| 2000/04/01  | MONTE AMIATA  | 4.57 ± 0.09 | 5-6 | CPTI 11 Boll.Macro. ING. Castello et al., 2006. |

(Da cataloghi CPTI 11 e DBMI 11).  $I_0$ : intensità MCS all'epicentro.

La scala delle intensità, i cui valori vengono riportati per i terremoti della Tab. 1, non ha basi matematiche, ma è stimata, dopo il terremoto, attraverso rilievi dei danni sul terreno e interviste alle persone. Il valore di intensità assegnato a uno specifico luogo è una misura che, per i non specialisti, ha più significato della magnitudo, riferendosi agli effetti realmente risentiti nel posto.

C'è anche da aggiungere che l'intensità sismica è una stima degli effetti di un terremoto e non dipende solo dalla magnitudo ma anche ovviamente dalla distanza dell'area considerata dall'epicentro e dalle condizioni geologiche locali. Inoltre, l'aumento del grado di intensità corrisponde a un aumento dello scuotimento superficiale ed è quindi legato alle accelerazioni locali del suolo e alla loro durata. In ogni caso il valore  $I_0$  riportato nella Tab.1 si riferisce all'intensità stimata all'epicentro del terremoto.

## 2.1 Terremoti risentiti nell'area di Torre Alfina

Gli eventi che hanno prodotto i maggiori risentimenti nei Comuni dell'area in esame (Acquapendente, Castel Giorgio, Castel Viscardo) sono riportati nelle Tab. 2, 3 e 4 (<http://emidius.mi.ingv.it>, Locati et al., 2011).

Questi sono stati causati essenzialmente da eventi con epicentro nell'Appennino Umbro-Marchigiano, nel Fucino, nell'area di Radicofani, dell' Amiata, di Bagnoregio e da alcuni eventi propri dell'area in questione avvenuti in prossimità di Castel Giorgio e di Acquapendente. Gli epicentri di alcuni di questi eventi distano più di 50 km da Castel Giorgio e quindi non figurano nella Tab.1.

Queste tabelle vengono riportate in quanto è utile confrontare quali eventi hanno prodotto risentimenti nei comuni di interesse. C'è da dire che talvolta nei cataloghi sismici e nella documentazione storica, non c'è notizia di danni o risentimenti (in particolare se lievi) causati in una certa zona da terremoti, anche forti, con epicentro in un'altra zona. Va detto tuttavia, che l'aggiornamento dei cataloghi della sismicità storica è costante e che, di volta in volta, emergono nuove fonti che possono migliorare il quadro delle conoscenze per una data regione.

Altro aspetto da sottolineare è che le magnitudo (macrosismiche) degli eventi precedenti al 1975

potrebbero essere sovrastimate rispetto a quelle strumentali, in quanto la formula di correlazione utilizzata, valida mediamente sul territorio nazionale, non tiene conto della piccola profondità tipica degli eventi in zone vulcaniche e geotermiche quale quella in esame.

Tab. 2. Risentimenti sismici ad Acquapendente.

| I[MCS] | Data<br>aa/mm/gg hh:mm | Area epicentrale            | Np   | Io  | Mw         |
|--------|------------------------|-----------------------------|------|-----|------------|
| 6-7    | 1695/06/11 02:30       | CIVITA DI BAGNOREGIO        | 50   | 8-9 | 5.67 ±0.25 |
| 6-7    | 1755/11/01 17:00       | ACQUAPENDENTE               | 2    | 6-7 | 4.51 ±0.34 |
| 5-6    | 1777/10/05 15:45       | RADICOFANI                  | 11   | 7   | 5.04 ±0.53 |
| 5      | 1861/05/09 01:53       | CITTA' DELLA PIEVE          | 28   | 6-7 | 4.92 ±0.40 |
| 4      | 1873/03/12 20:04       | MARCHE MERIDIONALI          | 196  | 8   | 5.95 ±0.10 |
| 4      | 1905/02/12 08:28       | SANTA FIORA                 | 61   | 6   | 4.66 ±0.29 |
| 5      | 1920/05/10             | ACQUAPENDENTE               |      | 5   |            |
| 5      | 1915/01/13 06:52       | AVEZZANO                    | 1041 | 11  | 7.00 ±0.09 |
| 6-7    | 1919/09/10 16:57       | PIANCASTAGNAIO              | 67   | 7-8 | 5.32 ±0.18 |
| 5-6    | 1924/04/09 14:49       | ACQUAPENDENTE               | 7    | 6-7 | 4.35 ±0.52 |
| 3      | 1926/01/08 09:14       | ABBADIA S. SALVATORE        | 24   | 7   | 4.90 ±0.27 |
| 4      | 1936/06/15 14:45       | ONANO                       | 9    | 4-5 | 3.91 ±0.43 |
| 4      | 1940/06/19 14:10       | RADICOFANI                  | 28   | 6   | 4.77 ±0.28 |
| 5-6    | 1940/10/16 13:17       | RADICOFANI                  | 106  | 7-8 | 5.26 ±0.14 |
| 5-6    | 1957/12/06 04:54       | CASTEL GIORGIO              | 63   | 7-8 | 4.93 ±0.21 |
| 3      | 1958/05/30 06:26       | RADICOFANI                  | 18   | 5   | 4.28 ±0.41 |
| 3      | 1979/09/19 21:35       | VALNERINA                   | 694  | 8-9 | 5.86 ±0.09 |
| 2-3    | 1993/06/05 19:16       | GUALDO TADINO               | 326  | 6   | 4.74 ±0.09 |
| 4-5    | 1997/09/26 00:33       | APPENNINO UMBRO-MARCHIGIANO | 760  |     | 5.70 ±0.09 |
| 4      | 1997/09/26 09:40       | APPENNINO UMBRO-MARCHIGIANO | 869  | 8-9 | 6.01 ±0.09 |
| 3-4    | 1997/10/03 08:55       | APPENNINO UMBRO-MARCHIGIANO | 490  |     | 5.25 ±0.09 |
| 4      | 1997/10/06 23:24       | APPENNINO UMBRO-MARCHIGIANO | 437  |     | 5.46 ±0.09 |
| 2-3    | 1997/10/14 15:23       | APPENNINO UMBRO-MARCHIGIANO | 786  | 7-8 | 5.65 ±0.09 |
| 3      | 1998/04/05 15:52       | APPENNINO UMBRO-MARCHIGIANO | 395  | 6   | 4.81 ±0.09 |
| 5      | 2000/04/01 18:08       | MONTE AMIATA                | 66   | 5-6 | 4.57 ±0.09 |

**Area epicentrale:** area geografica in cui sono stati riscontrati gli effetti maggiori del terremoto. **Np:** numero di punti, cioè numero di osservazioni macrosismiche disponibili per il terremoto; **I:** Intensità macrosismica stimata a Acquapendente espressa in scala MCS; **I<sub>0</sub>:** Intensità macrosismica epicentrale, da CPT11, espressa in scala MCS; **M<sub>w</sub>:** Magnitudo momento, da CPT11.

Tab. 3. Risentimenti sismici a Castel Giorgio.

| I[MCS] | Data<br>a/m/g h:m | Area epicentrale            | Np  | Io  | Mw         |
|--------|-------------------|-----------------------------|-----|-----|------------|
| 7-8    | 1957/12/06 04:54  | CASTEL GIORGIO              | 63  | 7-8 | 4.93 ±0.21 |
| 4      | 1979/09/19 21:35  | VALNERINA                   | 694 | 8-9 | 5.86 ±0.09 |
| 5      | 1993/06/05 19:16  | GUALDO TADINO               | 326 | 6   | 4.74 ±0.09 |
| 3-4    | 1997/09/26 00:33  | APPENNINO UMBRO-MARCHIGIANO | 760 |     | 5.70 ±0.09 |
| 4-5    | 1997/09/26 09:40  | APPENNINO UMBRO-MARCHIGIANO | 869 | 8-9 | 6.01 ±0.09 |
| 4-5    | 1997/10/03 08:55  | APPENNINO UMBRO-MARCHIGIANO | 490 |     | 5.25 ±0.09 |
| 4-5    | 1997/10/14 15:23  | APPENNINO UMBRO-MARCHIGIANO | 786 | 7-8 | 5.65 ±0.09 |
| 5      | 2000/04/01 18:08  | MONTE AMIATA                | 66  | 5-6 | 4.57 ±0.09 |

**Area epicentrale:** area geografica in cui sono stati riscontrati gli effetti maggiori del terremoto. **Np:** numero di punti, cioè numero di osservazioni macrosismiche disponibili per il terremoto; **I:** Intensità macrosismica stimata a Castel Giorgio espressa in scala MCS; **I<sub>0</sub>:** Intensità macrosismica epicentrale, da CPT11, espressa in scala MCS; **M<sub>w</sub>:** Magnitudo momento, da CPT11.

Tab.4. Risentimenti sismici a Castel Viscardo.

| I[MCS] | Data<br>a/m/g h:m | Area epicentrale            | Np  | Io  | Mw         |
|--------|-------------------|-----------------------------|-----|-----|------------|
| 7-8    | 1957/12/06 04:54  | CASTEL GIORGIO              | 63  | 7   | 4.93 ±0.21 |
| 4      | 1979/09/19 21:35  | VALNERINA                   | 694 | 8-9 | 5.86 ±0.09 |
| 4      | 1984/04/29 05:02  | GUBBIO/VALFABBRICA          | 709 | 7   | 5.65 ±0.09 |
| 4-5    | 1997/09/26 00:33  | APPENNINO UMBRO-MARCHIGIANO | 760 |     | 5.70 ±0.09 |
| 4      | 1997/09/26 09:40  | APPENNINO UMBRO-MARCHIGIANO | 869 | 8-9 | 6.01 ±0.09 |
| 3-4    | 1997/10/03 08:55  | APPENNINO UMBRO-MARCHIGIANO | 490 |     | 5.25 ±0.09 |
| 4      | 1997/10/06 23:24  | APPENNINO UMBRO-MARCHIGIANO | 437 |     | 5.46 ±0.09 |
| 2-3    | 1997/10/14 15:23  | APPENNINO UMBRO-MARCHIGIANO | 786 | 7-8 | 5.65 ±0.09 |
| 3      | 1998/04/05 15:52  | APPENNINO UMBRO-MARCHIGIANO | 395 | 6   | 4.81 ±0.09 |
| 5      | 2000/04/01 18:08  | MONTE AMIATA                | 66  | 5-6 | 4.57 ±0.09 |

**Area epicentrale:** area geografica in cui sono stati riscontrati gli effetti maggiori del terremoto. **Np:** numero di punti, cioè numero di osservazioni macrosismiche disponibili per il terremoto; **I:** Intensità macrosismica stimata a Castel Viscardo espressa in scala MCS; **I<sub>0</sub>:** Intensità macrosismica epicentrale, da CPT11, espressa in scala MCS; **M<sub>w</sub>:** Magnitudo momento, da CPT11.

Dalla Tab. 2 risulta che i principali eventi storici che hanno interessato Acquapendente, oltre a quelli con epicentro locale del 1755 (I= 6-7) e del 1924 (I= 5-6), sono quelli del 1695 (I= 6-7) e del 1919 (I= 6-7). L'evento di Castel Giorgio del 1957 è risultato fortemente attenuato ad Acquapendente (I= 5-6). Anche la crisi sismica umbro-marchigiana del 1997 è stata risentita in modo fortemente attenuato (I<sub>max</sub>

= 4-5). Si osserva una discrepanza per l'intensità riportata per l'evento del 1924 che dovrebbe essere uguale a quella epicentrale.

Dalla Tab. 3 risulta che il più forte terremoto che ha interessato Castel Giorgio è quello del 1957 con epicentro nella stessa zona ( $I= 7-8$ ). La crisi sismica umbro-marchigiana del 1997 è stata risentita, come ad Acquapendente, fortemente attenuata ( $I_{\max}= 4-5$ ).

Castel Viscardo ha risentito fortemente dell'evento di Castel Giorgio del 1957 ( $I= 7-8$ ) e in misura apparentemente minore della crisi sismica umbro-marchigiana del 1997 ( $I= 3-4$ ).

## **2.2 Descrizioni dei principali eventi storici avvenuti nell'area compresa tra Acquapendente, Castel Giorgio e Castel Viscardo.**

### **- Evento di Acquapendente 1 Novembre 1755 ( $I_0=6-7$ - $M_w=4.51\pm 0.34$ )**

L'analisi delle fonti utilizzate dai principali repertori sismologici non consente di definire con precisione né la data né gli effetti di questo evento. Dell'Olio e Molin (1980) riportano un terremoto accaduto il 18 novembre 1755 con un'intensità stimata al VII MCS a Acquapendente e Grotte di Castro. Le fonti di Dell'Olio e Molin non sono citate esplicitamente, ma gli unici testi tra quelli elencati che trattano di questo evento sono Baratta (1901), De Rossi (1889) e Perrey (1848). Solo nell'Archivio Parrocchiale di Grotte di Castro, all'interno del libro di spese, è stato rinvenuto un documento che ricorda il terremoto (AP Grotte di Castro, 1755). Il documento chiarisce la data del terremoto e smentisce la presenza di danni a Grotte di Castro:

*"[...] Sab. primo giorno di Novembre [...] circa le ore 22 [15.30 ca Emt] s'incominciò a sentire il tremuoto, il quale continuò a sentirsi fino alle ore undici [4.30 ca Emt] del dì seguente; ma in tante volte interpolatamente, che si contarono circa a trenta, ora però con maggiore, ora con minor veemenza e fu tale lo spavento del popolo tutto che la maggior parte uscì fuori dalle proprie case, [...] In tale occasione circa le ore 23 del predetto giorno prima del mese fu scoperta la prodigiosa statua di questa nostra vergine [...] Nell'atto poi che si cuopriva la detta immagine, ne fu sentita una scossa più violenta tanto che diede maggior motivo al popolo di ravvivare le sue preghiere [...] e per misericordia [...] questa nostra terra non ne ricevette alcun pregiudizio".*

Si trattò di una serie di eventi, iniziati nel pomeriggio del 1 novembre e terminati nella notte tra l'1 e il 2 novembre. Il più forte avvenne al termine della funzione religiosa cominciata alle 16.36 (Emt), quindi probabilmente verso le 18.

Per quanto riguarda gli effetti, la fonte ricorda esplicitamente che a Grotte di Castro non si verificarono danni (*"non ne ricevette alcun pregiudizio"*). L'intensità a Grotte di Castro è quindi stimata come pari a IV-V MCS.

La ricerca condotta da Monachesi et al. (1995) non ha fornito evidenze di effetti in nessun'altra località. Per quanto riguarda Acquapendente le uniche notizie disponibili restano quelle del periodico Bologna. Il resoconto presente in questo periodico risulta però smentito per quanto riguarda la località di Grotte di Castro, dato che le informazioni recuperate consentono di affermare che non avvenne nessun danneggiamento agli edifici. Per Acquapendente non sono state rinvenute nuove informazioni, tuttavia il silenzio di tutte le fonti documentarie consultate e la smentita relativa alla vicina località di Grotte di Castro invitano quanto meno a considerare con cautela la testimonianza del periodico Bologna e ad assegnare un valore di intensità che rifletta questa incertezza (VI-VII MCS).

**- Evento di San Lorenzo Nuovo 11-13 Agosto 1888 (De Panfilis et al., 1959; 1969; Bollettino del Vulcanismo Italiano, 1888)**

Si tratta di un lungo periodo sismico costituito da numerose scosse non molto intense susseguitesi dall'11 Agosto al 18 Settembre 1888 nell'area compresa tra Grotte di Castro, San Lorenzo Nuovo e Acquapendente (De Panfilis et al., 1959).

Il Bollettino del vulcanismo Italiano così descrive l'evento: *"I terremoti ivi cominciati l'11, e ricominciati con qualche energia il 30 Agosto, sono tutti generalmente ondulatori fra il NNW e SSE, estendendosi su questa linea con qualche intensità da Capodimonte sulle rive del lago di Bolsena fino ad Acquapendente. Su questa linea formante l'asse maggiore dell'area ellittica scossa, i paesi più tormentati dalla forza degli urti e da rombi sotterranei frequenti, sono San Lorenzo Nuovo e Grotte di Castro [...] nessun danno ha seguito gli urti sismici, che ragionevolmente hanno assai spaventato gli abitanti di Grotte di Castro e di San Lorenzo Nuovo determinando i rispettivi sindaci a chiedere al R. Governo l'invio sul luogo di chi potesse scientificamente esaminare il fenomeno. Il primo risultato di tale esame fu confortante, dimostrando come l'arte edilizia possa efficacemente paralizzare moltissimo gli effetti del terremoto. La relativa ed evidente gravità delle scosse principali dell'11 e del 30 Agosto, non produsse neppure una lesione nei muri principale degli edifici, né a San Lorenzo Nuovo né alle Grotte"*.

- **Periodo sismico del 1920 nel Viterbese (risentimenti ad Acquapendente)**

Si tratta di una serie di scosse modeste, con un massimo di V grado, sentite tutte specialmente ad *Acquapendente* e nel vicinissimo paese di *Proceno* nella mattina del 10 Maggio 1920 (De Panfilis, 1959). Agamennone G. (1921) descrive: *“Le varie scosse furono sensibilmente avvertite ad Acquapendente e a Proceno, con rispettive adiacenze. Durante lo stesso giorno si parlò di altri piccoli movimenti, ma non avvertiti dalla maggioranza della popolazione. Tutte le scosse furono ondulatorie con direzione predominante NW a SE, e le più forti furono accompagnate da un rombo sotterraneo, d'intensità corrispondente alla forza delle scosse. Fu notato un intorbidamento nelle pubbliche fontane dopo l'avvenimento di questi moti sismici [...] per il fatto che il terremoto fu maggiormente sentito ad Acquapendente e a Proceno parrebbe potersi concludere che l'epicentro è stato nei pressi di Acquapendente e forse alquanto W; che probabilmente la scossa ha ivi raggiunto tutt'al più il V grado della scala Mercalli; che la profondità del focolare sismico dev'essere stata poco notevole, se il movimento non fu più percepito dalle persone ad una decina di Km di distanza dall'epicentro, non giunse a far funzionare i sismografi di M.Fiascone (27 km), né fu capace di perturbare i sismografi di Roma (130 km)”*.

- **Periodo sismico svoltosi dal 29 Novembre al 4 Dicembre 1921 (De Panfilis, 1959; 1969)**

Si tratta di un periodo sismico che va dal 29 Novembre al 4 Dicembre 1921, con due massimi di VII grado che causarono danni nei paesi di *Grotte di Castro* e *San Lorenzo Nuovo*. Una breve, ma molto forte ripresa dei fenomeni sismici si ebbe il 27 Marzo 1922 con cinque scosse di VI grado avvenute tutte nella stessa giornata. A causa delle poche informazioni, non è riportato in Tab. 2.

- **Evento di Acquapendente del 9 Aprile 1924 ( $I_0=5-6$   $M_w=4.35 \pm 0.52$ )**

Si tratta di un periodo sismico di breve durata (9 e 10 Aprile 1924), ma molto intenso, con due massimi di VII grado e tre scosse di VI che arrecarono danni negli abitati di *Acquapendente*, *San Lorenzo Nuovo* e *Grotte di Castro* (De Panfilis et al., 1959, 1969) (Fig. 2).



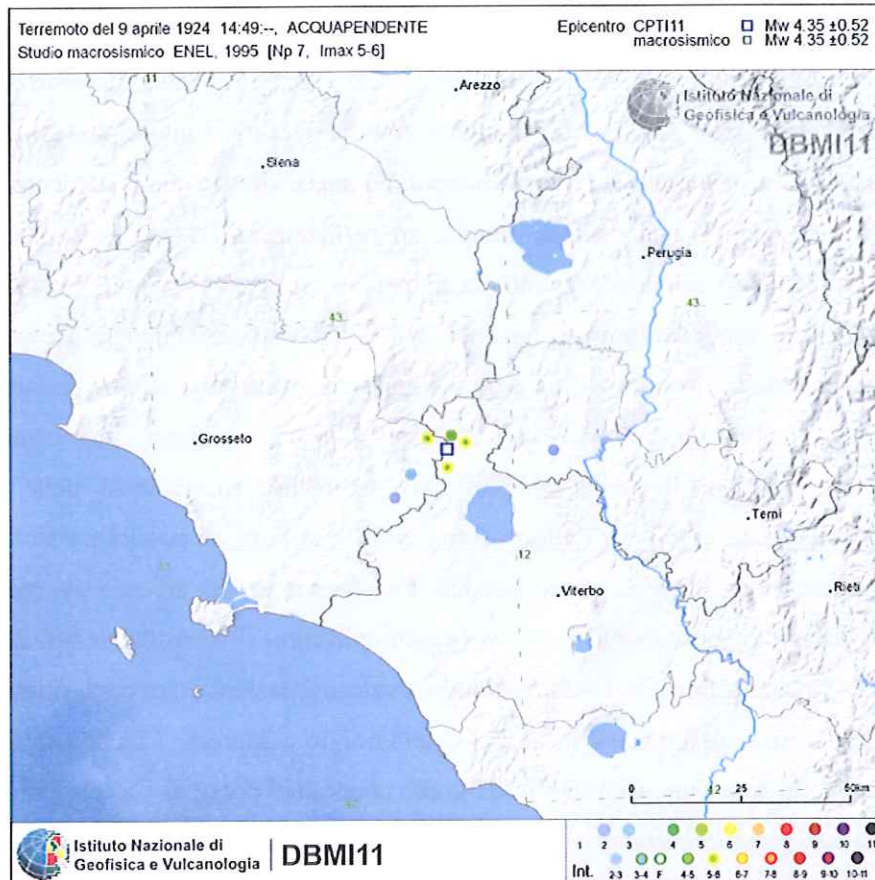


Fig. 2. Risentimenti del terremoto di Acquapendente del 9 aprile 1924,  $I_0=5-6$  -  $M_w=4.35 \pm 0.52$ . Il quadrato blu indica la localizzazione epicentrale.

- Evento di Castel Giorgio 6 dicembre 1957,  $I_0 =7-8$ ,  $M_w =4.93 \pm 0.21$  (De Panfilis et al., 1959, 1969) (Fig. 3)

Dal focolare sismico prossimo a Castel Giorgio, mai rivelato precedentemente da manifestazioni di notevole intensità, irraggiò alle 05h55m del 6 Dicembre 1957 un terremoto di VII-VIII grado che in detto paese produsse danni assai gravi: lesioni generali e di notevole entità si ebbero in quasi tutti gli edifici e, in molti di essi, quelle prodotte alle strutture murarie portanti furono di tale gravità da renderli pericolanti ed inabitabili. La scossa fu fortissima (VII grado) a Castel Viscardo, a S.Lorenzo Nuovo, a Bolsena, a Viceno (frazione di Castel Viscardo) e a Benano (frazione di Orvieto); in tutte queste località si verificarono crolli di comignoli e lesioni notevoli in numerosi edifici, sia pubblici che privati. L'area isosismica in cui il movimento tellurico si manifestò con intensità molto forte (VI grado) si estese alla città di Orvieto; alle sue frazioni di Torre S.Severo, Sugano, Canonica, Rocca Ripesena; ai comuni di Grotte di Castro, Acquapendente, Porano, Lubriano, Bagnoreggio e Civitella d'Agliano. In tali località,

si ebbero fenditure, generalmente leggere, in diversi prefabbricati e, di una certa gravità, solo in qualche edificio di vecchia ed irrazionale costruzione... Tra i fenomeni più caratteristici concomitanti alla scossa, va segnalato, oltre al forte rombo udito in varie località, l'intorbidamento delle sorgenti nella zona di Castel Giorgio, Castel Viscardo e Sugano. Fu anche riferito che la sorgente del Tione, nei pressi di Sugano, interruppe per qualche tempo, immediatamente dopo la scossa, l'erogazione dell'acqua. [...] Il violento sisma fu seguito da numerose repliche di minore intensità fino all'11 Dicembre. Tutte queste repliche furono registrate dall'Osservatorio sismico di Roma. Le notevoli intensità della terza e della decima replica aggravarono sensibilmente i danni prodotti della scossa principale. Le popolazioni di Castel Giorgio, Castel Viscardo e degli altri centri più colpiti abbandonarono le abitazioni in preda al più vivo sgomento, rifugiandosi nelle campagne in attendamenti sollecitamente apprestati dalle Autorità civili e militari. È possibile che le repliche non abbiano avuto origine da un identico centro sismico. Per la terza scossa ad esempio (quella delle 10h 16m 23s), fu evidente uno spostamento verso ovest dell'epicentro. Essa risultò infatti di VI-VII grado nelle cittadine di Acquapendente e S. Lorenzo Nuovo, ove causò lesioni di un certo rilievo in numerose case, e d'intensità inferiore nelle vicine località, Castel Giorgio compresa... La scossa fortissima delle 23h 56m 39s esplicò invece l'intensità di VI-VII grado ancora nel paese di Castel Giorgio e fu sentita meno fortemente nei paesi circostanti... L'8 Dicembre una replica di maggiore intensità si ebbe nei pressi di Castel Giorgio, valutata con intensità di VI-VII grado, causò nuovi danni e sensibili aggravamenti delle lesioni causate dalle scosse precedenti (De Panfilis et al., 1959).

È da credere che esso abbia provocato un risveglio del centro sismico di Acquapendente, poiché due intense scosse, avvenute rispettivamente alle 10h18m e alle 23"56m del 6 Dicembre, risultarono, di VI-VII grado ad Acquapendente e a San Lorenzo Nuovo mentre vennero sentite a Castel Giorgio con intensità molto inferiore.

Probabilmente dal centro di Castel Giorgio ebbe origine il breve e poco intenso periodo sismico iniziatosi alle 05h04m del 18 Agosto 1962 e conclusosi alle 22h30m circa del 20 Agosto. Si ebbero una decina di scosse quasi tutte di leggera e mediocre intensità. Solo due (09h58m del giorno 18 e 01h55m del giorno 19) di V grado furono avvertite nella zona di Castel Giorgio e Castel Viscardo e più leggermente a Orvieto, Montefiascone, San Lorenzo Nuovo, Proceno, e Acquapendente (De Panfilis et al., 1969).

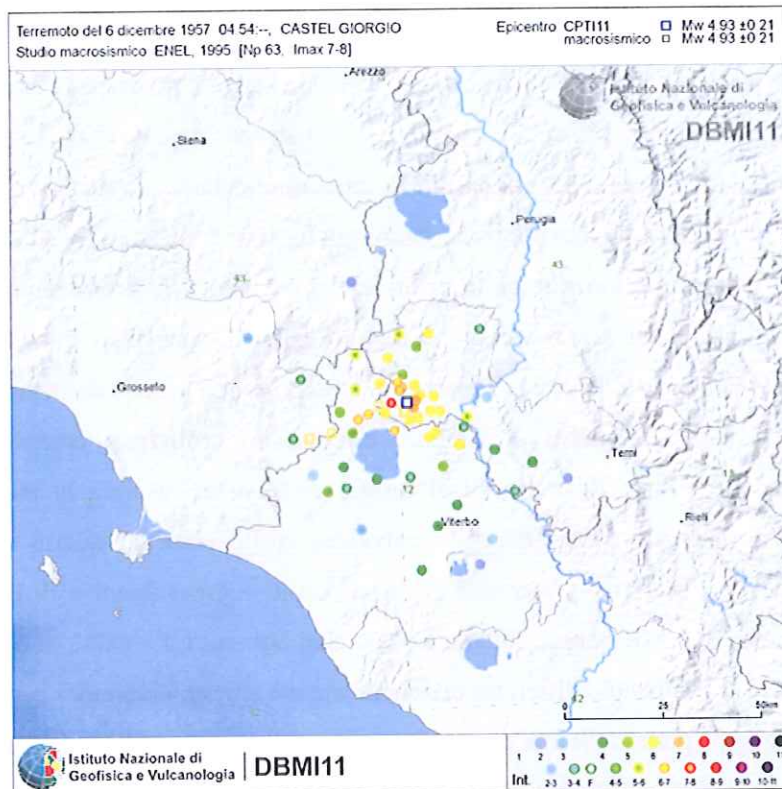


Fig. 3. Risentimenti del terremoto di Castel Giorgio del 1957. Il quadrato blu indica la localizzazione epicentrale. Risentimento nel comune di Castel Giorgio e Castel Viscardo I(MCS)= 7-8, comune di Acquapendente I(MCS)= 5-6.

### 2.3 Descrizioni dei principali eventi risentiti nell'area, con relativa descrizione

- Evento di Civita Bagnoregio 6 Novembre 1695,  $I_0 = 8-9$  -  $M_w = 5.67 \pm 0.25$  (Fig. 4)

La sequenza sismica ebbe inizio la mattina del 7 giugno, con due forti scosse, che indussero la popolazione di Bagnorea a lasciare le abitazioni; la seconda scossa causò un leggero danno a Orvieto; seguirono varie nuove scosse che si protrassero fino a tutto il giorno successivo. I giorni 9 e 10 giugno non furono percepite scosse, e le popolazioni rientrarono nelle proprie case. Alle ore 23:20 GMT del 10 giugno un fortissimo foreshock indusse la popolazione di Bagnorea a lasciare le case. Tre ore dopo, alle ore 2:20 GMT avvenne la scossa principale, seguita dopo circa un quarto d'ora da una nuova forte scossa. Nei giorni successivi la sequenza sismica si protrasse con frequenti nuove scosse leggere, che aggravarono comunque i danni facendo crollare parti già pericolanti di case a Bagnorea. Sono riportate nuove scosse fino al 15 luglio successivo. Il terremoto colpì il territorio vulsino, nella Tuscia laziale al confine con l'Umbria. La scossa principale, avvenuta il giorno 11 giugno 1695 alle ore 2:20 GMT,

causò la distruzione totale di Civita, l'originario insediamento di Bagnoregio, e crolli totali estesi alla maggior parte degli edifici a Roda, l'attuale Bagnoregio, insediamento posto circa 1 km a ovest di Civita. A Civita crollarono, tra l'altro, la cattedrale, il palazzo vescovile e il seminario, a Roda crollarono o subirono comunque danni gravissimi la chiesa collegiata e la maggior parte dell'edilizia ecclesiastica; anche gli edifici pubblici subirono danni gravissimi: è attestata la necessità di ricostruire il Monte di Pietà, il palazzo pretorio e quello priorale e il tribunale. Subì estese distruzioni anche la maggior parte dei casali e dei centri minori della diocesi di Bagnoregio e dell'area circostante, all'epoca amministrativamente divisa tra il governatorato di Viterbo e quello di Orvieto, e in gran parte infeudata a signori locali: gli edifici di Celleno e Lubriano crollarono completamente o quasi interamente; Ponzano subì distruzioni simili; ci furono crolli estesi a circa la metà degli edifici a Civitella d'Agliano, Grotte Santo Stefano e Roccalvecce; crollò circa un quarto del costruito a La Magione, San Michele in Teverina e Vetriolo; ci furono crolli e gravi danni a Bolsena, Graffignano, Castel Rubello, Porano, Rocca Ripensa, Sugano e Torre San Severo. La località di Montefiascone subì il crollo di alcune case e molti suoi edifici, tra cui anche alcune chiese, divennero pericolanti; a Orvieto fu danneggiata la maggior parte delle case, subì danni notevoli la cattedrale e alcune chiese divennero pericolanti. Ci furono infine danni non gravi a Viterbo e in alcuni altri insediamenti sia laziali sia umbri: Acquapendente, Assisi, Capodimonte, Caprarola, Castiglione in Teverina, Civita Castellana, Gradoli, Latera, Perugia, Ronciglione e Toscanella. Nonostante le estese distruzioni nel territorio della diocesi di Bagnoregio, ci furono pochi morti: ciò fu dovuto al fatto che tre ore prima della scossa principale una forte scossa aveva indotto le persone ad abbandonare le proprie case. La scossa principale fu sentita in una vasta area, compresa tra l'area perugina a nord, Tivoli a est, Roma e Frascati a sud e l'intera provincia di Viterbo a ovest-nordovest.

Le nuove e frequenti scosse avvenute nei giorni successivi aggravarono i danni a Civita e a Roda. Una forte scossa fu percepita a Montefiascone il 5 luglio 1695. Il lago di Bolsena si alzò di circa 4 metri (2 "picche") e allagò i terreni circostanti per una estensione di oltre 4 km ("3 miglia"). Presso Bagnorea furono osservate profonde fessurazioni, che, secondo alcune fonti, furono invase dalle acque fuoriuscite dal vicino lago di Bolsena.

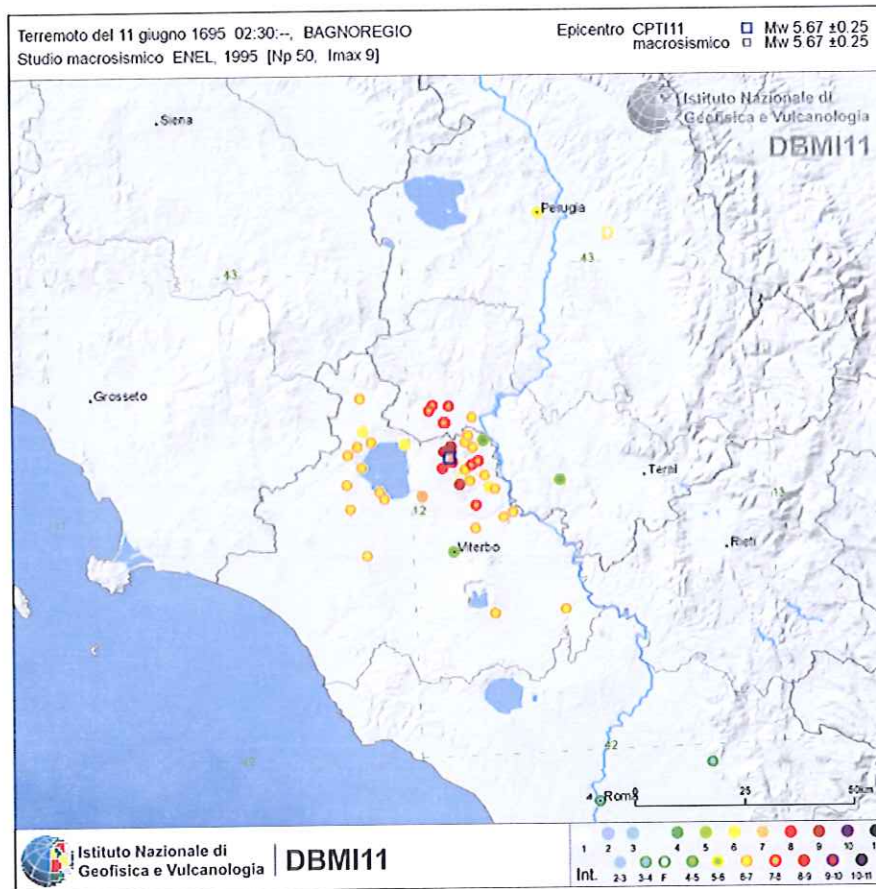
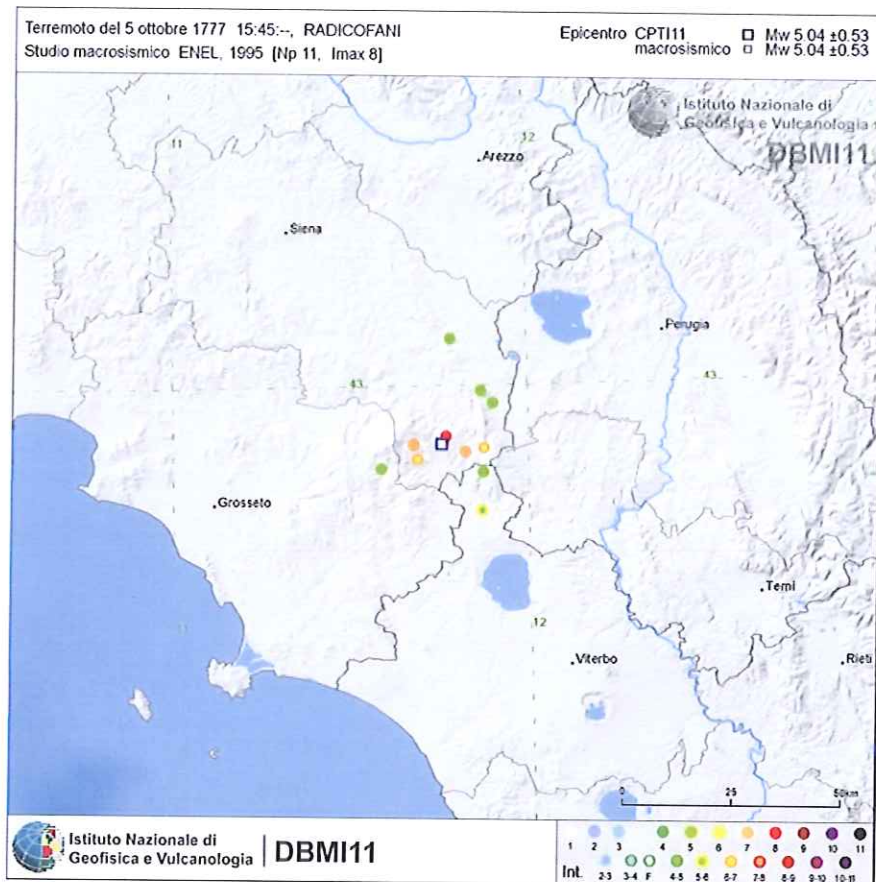


Fig. 4. Risentimenti del terremoto di Civita Bagnoregio del 1695. Il quadrato blu indica la localizzazione epicentrale. Risentimento nel comune di Acquapendente I(MCS)= 6-7. Dati non disponibili per Castel Giorgio e Castel Viscardo, Fonte DBMI11).

- **Evento di Radicofani del 5 ottobre 1777 (Fig. 5)**

I principali repertori sismologici che riportano l'evento sono Baratta (1901), Perrey (1848), Mercalli (1883) e De Rossi (1889).

Baratta (1901) riferisce di un lungo periodo sismico iniziatosi nel marzo 1776 e protrattosi per tutto il 1777; l'evento maggiore avvenne il 5 ottobre 1777 e provocò la sconnessione di case a Celle e a Badia San Salvatore, mentre i danni maggiori si ebbero a Radicofani. Le fonti di Baratta sono De Rossi (1889a) e Baratta (1895) che a sua volta utilizza Visconti (1778).



**Fig. 5.** Risentimenti del terremoto di Radicofani del 5 Ottobre 1777,  $I_0 = 8-9$  -  $M_w = 5.04 \pm 0.53$ . Il quadrato blu indica la localizzazione epicentrale. Risentimento nel comune di Acquapendente  $I(\text{MCS}) = 5-6$ .

De Rossi ricava le sue informazioni dal periodico Bologna (1777), che parla di danni a Radicofani e risentimento a Santa Fiora e Abbadia San Salvatore:

*"Firenze 14 ottobre. Abbiamo inteso da Radicofani, come il 5 del corrente, verso l'ore 5 pomeridiane, si sentì una gagliarda scossa di terremoto, che ha fatti de' danni notabili a quelle fabbriche. Continua la romba sotterranea a farsi sentire in varj luoghi di quelle montagne, e specialmente in S. Fiora, a Badia a S. Salvatore [ . . . ]. Quegli abitanti sono usciti dalle loro case, stando all'aria aperta sotto le tende"*. Visconti (1778) è la fonte più vicina all'evento. L'autore era infatti residente ad Abbadia San Salvatore e, nel gennaio 1778, tenne, all'Accademia delle Scienze di Siena, una relazione sul terremoto poi pubblicata nel Nuovo Magazzino Toscano nel 1778. In tale prolisso racconto Visconti descrive l'evento principale, accaduto "dopo un'ora in circa dall'ultima scossa", cioè circa le 16.45, che determina ad Abbadia San Salvatore i seguenti danni: *"le strade disseminate di sassi e tegole infrante, con le mura scommosse, slogate ed aperte, [...]"*.

Le sole altre località ricordate da Visconti sono Radicofani (che "restò danneggiato assai più" di Abbadia San Salvatore) e Celle sul Rigo, frazione di San Casciano dei Bagni, che avrebbe sofferto come Abbadia S. Salvatore.

Le fonti utilizzate da queste compilazioni sismologiche testimoniano un danneggiamento diffuso, ma non severo, a Abbadia San Salvatore, e un danno "maggiore" a Radicofani. Per questo evento è stata rinvenuta una sola testimonianza relativa per Acquapendente (ASRm, 1777). Si tratta di una lettera in cui i religiosi del Convento di S. Giuseppe dichiaravano che: "[...] nella caduta Domenica cinque del corrente, essendo accaduta una fiera scossa di terremoto, e replicata per ben due volte, hanno sofferto un danno sensibile riguardo al proprio Convento, che alla Cappella dell'Orto, con altri non pochi danni; [...]". Questa testimonianza relativa a due soli edifici non consente una precisa stima dell'intensità ad Acquapendente. Tuttavia la presenza di un danneggiamento sia pure limitato suggerisce di assegnare un valore d'intensità del V-VI.

Altri eventi, con epicentro a Radicofani, e risentiti nel comune di Acquapendente, sono avvenuti nel 1940 e nel 1958. Di seguito viene mostrata una tabella con la diversa intensità I(MCS) registrata nel comune di Acquapendente a seguito dei citati eventi sismici. Per quanto riguarda i comuni di Castel Giorgio e a Castel Viscardo, non sono disponibili dati di Intensità (MCS).

| I[MCS] | Data<br>aa/mm/gg hh:mm | Area epicentrale | Np  | Io  | Mw         |
|--------|------------------------|------------------|-----|-----|------------|
| 4      | 1940/06/19 14:10       | RADICOFANI       | 28  | 6   | 4.77 ±0.28 |
| 5-6    | 1940/10/16 13:17       | RADICOFANI       | 106 | 7-8 | 5.26 ±0.14 |
| 3      | 1958/05/30 06:26       | RADICOFANI       | 18  | 5   | 4.28 ±0.41 |

**Area epicentrale:** area geografica in cui sono stati riscontrati gli effetti maggiori del terremoto. **Np:** numero di punti, cioè numero di osservazioni macrosismiche disponibili per il terremoto; **I:** Intensità macrosismica stimata a Acquapendente espressa in scala MCS; **Io:** Intensità macrosismica epicentrale, da CPT11, espressa in scala MCS; **Mw:** Magnitudo momento, da CPT11.

- **Evento di Città della Pieve del 9 maggio 1861 ( $I_0=6-7$ ,  $M_w=4.92 \pm 0.40$ )**

Risentimento nel comune di Acquapendente  $I(MCS)=5$ , ND (non disponibile) per Castel Giorgio e Castel Viscardo (Fonte DBMI1).

- **Evento di Santa Fiora 12 febbraio 1905 ( $I_0=6-7$ ,  $M_w=4.66 \pm 0.29$ )**

Risentimento nel comune di Acquapendente  $I(MCS)=4$ , ND (non disponibile) per Castel Giorgio e

Castel Viscardo (Fonte DBMI11).

- **Evento di Avezzano del 13 gennaio 1915 ( $I_0=11$ ,  $M_w = 7 \pm 0.09$ )**

Risentimento nel comune di Acquapendente  $I(MCS)= 5$ , ND (non disponibile) per Castel Giorgio e Castel Viscardo (Fonte DBMI11).

- **Evento di Piancastagnaio del 10 settembre 1919 ( $I_0 = 7-8$ ,  $M_w = 5.32 \pm 0.18$ )**

Risentimento nel comune di Acquapendente  $I(MCS)= 6-7$ , ND (non disponibile) per Castel Giorgio e Castel Viscardo (Fonte DBMI11).

L'area degli effetti distruttivi comprende una decina di villaggi dell'area del monte Amiata, fra le province di Siena e di Grosseto; l'intera zona danneggiata si estende per circa 700 kmq. I danni più gravi furono riscontrati a Piancastagnaio, Celle sul Rigo, Montorio, Radicofani, San Casciano dei Bagni e San Giovanni delle Contee. Complessivamente a Piancastagnaio 8 case crollarono e 10 furono gravemente danneggiate; 40 case furono lesionate a San Casciano dei Bagni, 15 a Radicofani. Nei dintorni di Piancastagnaio crollarono diverse case coloniche sparse, causando un morto e una ventina di feriti. Cavasino et al.(1935) facendo riferimento anche alle notizie riportate dai giornali, ricordano alcune repliche avvenute lo stesso giorno della scossa principale e nella mattina di quello seguente. Varie cronache riportano una scossa avvertita alle ore 19 locali dell' 11 settembre 1919, che fece danni a Proceno, Castell'Azzara e a Piancastagnaio, lesionando anche alcuni edifici a Acquapendente; fu sentita a Siena, a Perugia e a Valentano.

- **Evento di Abbadia S.Salvatore dell'8 gennaio 1926 ( $I_0=7$ ,  $M_w= 4.90 \pm 0.27$ )**

Risentimento nel comune di Acquapendente  $I(MCS)= 3$ , ND (non disponibile) per Castel Giorgio e Castel Viscardo (Fonte DBMI11).

- **Evento di Onano del 15 giugno 1936 ( $I_0=4-5$ ,  $M_w= 3.91 \pm 0.43$ )**

Risentimento nel comune di Acquapendente  $I(MCS)= 4$ , ND (non disponibile) per Castel Giorgio e Castel Viscardo (Fonte DBMI11).

- **Evento di Tuscania del 6 febbraio 1971 ( $I_0=8-9$ ,  $M_w= 4.80 \pm 0.14$ )**

*"L'evento sismico che ha colpito il centro di Tuscania ed alcune località poste fra detto abitato e le pendici sud-occidentali dell'apparato vulcanico Vulsino, provocando ingenti danni materiali e la morte di ventidue persone, ha avuto inizio con la scossa del 6 Febbraio e si è protratto per alcuni giorni con*



*lievi e sporadiche scosse registrate strumentalmente, o avvertite da una parte della popolazione*". Secondo una ricostruzione delle isosisme del terremoto del 6 Febbraio 1971 di De Panfilis et al.(1972), "Studio del Terremoto di Toscana", risulterebbe un'intensità del IV grado tra i comuni compresi tra il lago di Bolsena e l'Orvietano, dove ricadono i comuni di Acquapendente, Castel Giorgio e Castel Viscardo. Dettagli sul terremoto vengono riportati anche da Console e Sonaglia (1972).

- **Evento di Valnerina del 19 settembre 1979 ( $I_0=8-9$ ,  $M_w= 5.86 \pm 0.09$ )**

Risentimento nel comune di Castel Giorgio I(MCS)= 4, Acquapendente I(MCS)= 3, ND (non disponibile) per Castel Viscardo (Fonte DBMI11).

- **Crisi sismica del febbraio 1992**

Da Corriere di Viterbo 9 Febbraio: *"La terra ha tremato più volte in tutto l'alto viterbese. Il terremoto è stato avvertito a Montefiascone, Bolsena, San Lorenzo Nuovo, Gradoli, Latera, Onano, Grotte di Castro, Torre Alfina, Acquapendente e Castel Giorgio"*.

Da Corriere dell'Umbria 9 Febbraio: *"Tanta paura ma fortunatamente nessun danno. Una scossa tellurica del quinto grado della scala Mercalli, seguito da un intenso sciame sismico, ha tenuto in apprensione gli abitanti dell'Orvietano e dell'alto Lazio"*.

- **Evento di Gualdo Tadino del 5 giugno 1993 ( $I_0=6$ ,  $M_w= 4.74 \pm 0.09$ )**

Risentimento nel comune di Acquapendente I(MCS)= 2-3, Castel Giorgio I(MCS)=5, ND (non disponibile) per Castel Viscardo (Fonte DBMI11).

- **Crisi sismica umbro-marchigiana del 1997-1998**

Risentimento nel comune di Acquapendente I(MCS)= 4-5, Castel Giorgio I(MCS)=3-5, Castel Viscardo I(MCS)= 3-5 (Fonte DBMI11).

- **Evento del M. Amiata del 1 aprile 2000 ( $I_0=5-6$ ,  $M_w= 4.57 \pm 0.09$ )**

Risentimento nel comune di Acquapendente I(MCS)= 5, Castel Giorgio I(MCS)=5, Castel Viscardo I(MCS)= 5 (Fonte DBMI11).

### 3. Sismicità strumentale

#### 3.1 Le reti sismiche di monitoraggio nel territorio di Torre Alfina

Lo scopo principale delle indagini sismiche condotte nel passato nell'area Vulsina-Monte Amiata con reti sismiche locali, è stato il controllo della microsismicità dei campi geotermici in sfruttamento o in esplorazione. Per questo, sin dalla fine degli anni '70, vennero realizzate dall'ENEL tre reti di monitoraggio per i campi geotermici dell'Amiata, di Latera e di Torre Alfina.

1. La rete sismica ENEL di Torre Alfina fu smantellata agli inizi degli anni '90. Era una rete di sensori sismici, realizzata a partire dagli anni '70, con caratteristiche strumentali tali da consentire la registrazione di eventi sismici con magnitudo minima prossima allo zero (Moia, 2008). Infatti, la configurazione di reti locali, ad alta densità, deve essere consona agli obiettivi preposti. Diversa è la rete di monitoraggio sismico nazionale, la quale benché implementata e rinnovata nel corso del tempo, non può registrare lo stesso livello di microsismicità di una rete locale.
2. La Rete Sismica Nazionale Centralizzata (RSNC) è una rete di sensori sismici, composta attualmente da circa 300 stazioni, deputata al monitoraggio dell'attività sismica in corso sul territorio nazionale, con la duplice finalità di fornire informazioni utili alla Protezione Civile per gli eventuali interventi di soccorso e di migliorare le conoscenze scientifiche sulla sismicità del territorio nazionale. La RSNC è gestita in tempo reale dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). In prossimità del territorio in esame sono attualmente operative 3 stazioni sismometriche (Fig. 6), ma un numero di stazioni di gran lunga maggiore è presente lungo la dorsale appenninica Umbro-Marchigiana.
3. La Rete Accelerometrica Nazionale (RAN): è una rete di monitoraggio accelerometrico distribuita sull'intero territorio nazionale che registra terremoti di media ed elevata intensità. La RAN è gestita dal Servizio Sistemi di Monitoraggio del Dipartimento della Protezione Civile (DPC). In prossimità dell'area in esame sono presenti 4 stazioni accelerometriche (Fig. 6).

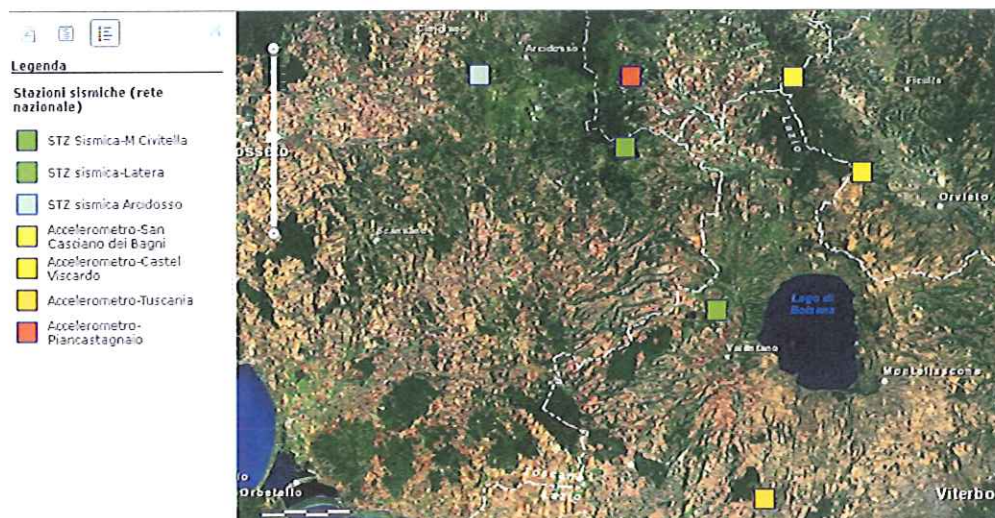


Fig. 6. Ubicazione nell'area di interesse delle stazioni sismiche della rete nazionale e delle stazioni accelerometriche del DPC .

### 3.2 L'attività sismica tra il 1984 e il 2013

Le informazioni sulla sismicità più recente (dal 1981), derivata da dati strumentali, sono più numerose e comprendono eventi con magnitudo più piccole rispetto ai cataloghi della sismicità storica. Questo tipo di dati è riportato da Castello et al. (2006) e dal bollettino della sismicità strumentale dell'INGV (<http://bollettinosismico.rm.ingv.it/>; <http://iside.rm.ingv.it>).

E' stata effettuata una selezione degli eventi del catalogo INGV, avvenuti tra il 1984 e il 2013 (16 febbraio) e ricadenti entro un raggio di 20 km dal Comune di Castel Giorgio. Essi sono circa 400.

L'istogramma di Fig. 7 mostra il numero di eventi della selezione sopracitata, suddivisi per anno, senza classi di magnitudo. Riguardo a questo istogramma si deve considerare che l'aumento della frequenza annuale di accadimento è dovuto al graduale potenziamento della rete sismografica nazionale negli ultimi 10 anni, che ha consentito la registrazione anche di terremoti di debole magnitudo, a differenza di quanto avveniva negli anni precedenti.

Si può anche notare facilmente come la sismicità, anziché distribuirsi uniformemente nel tempo, tenda a concentrarsi in periodi di attività intensa, separati tra loro da periodi di quiescenza o di attività ridotta. Una crisi sismica con molti eventi è avvenuta nel 1992 e di questa si parlerà in seguito.

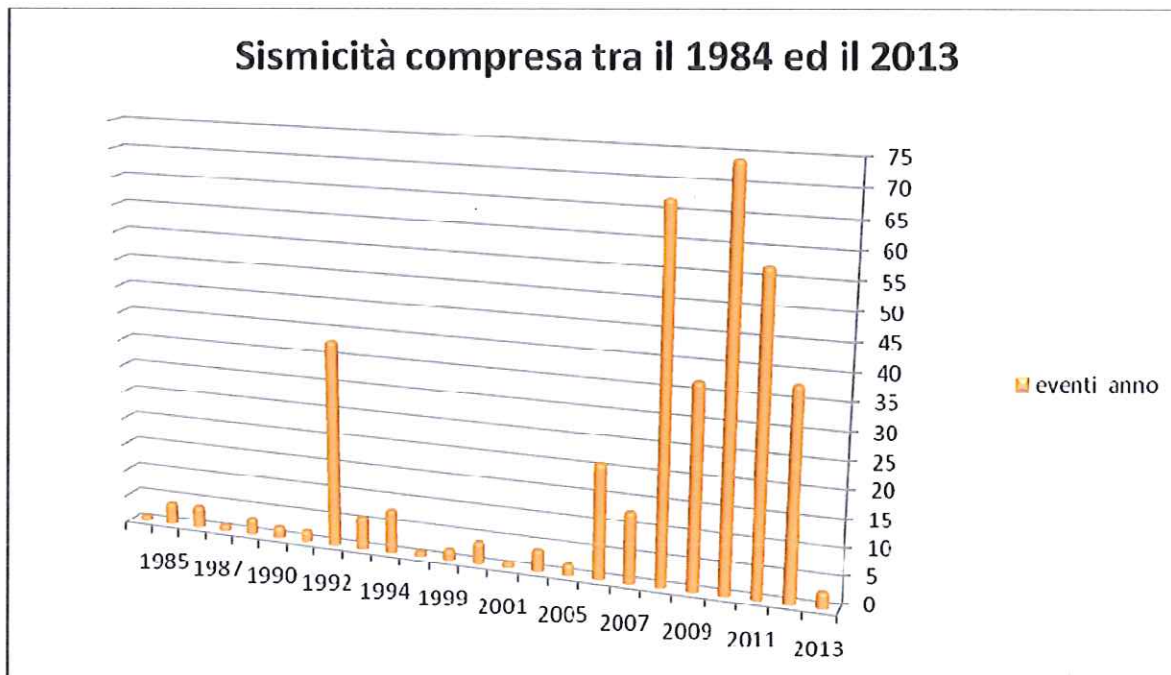


Fig. 7. Istogramma della sismicità strumentale per il periodo 1984-2013 registrata dalle stazioni delle rete sismica nazionale in un raggio di 20 km da Castel Giorgio (Fonti INGV: Bollettino Sismico Italiano; ISIDe; Catalogo CSI 1.1 da Castello et al., 2006).

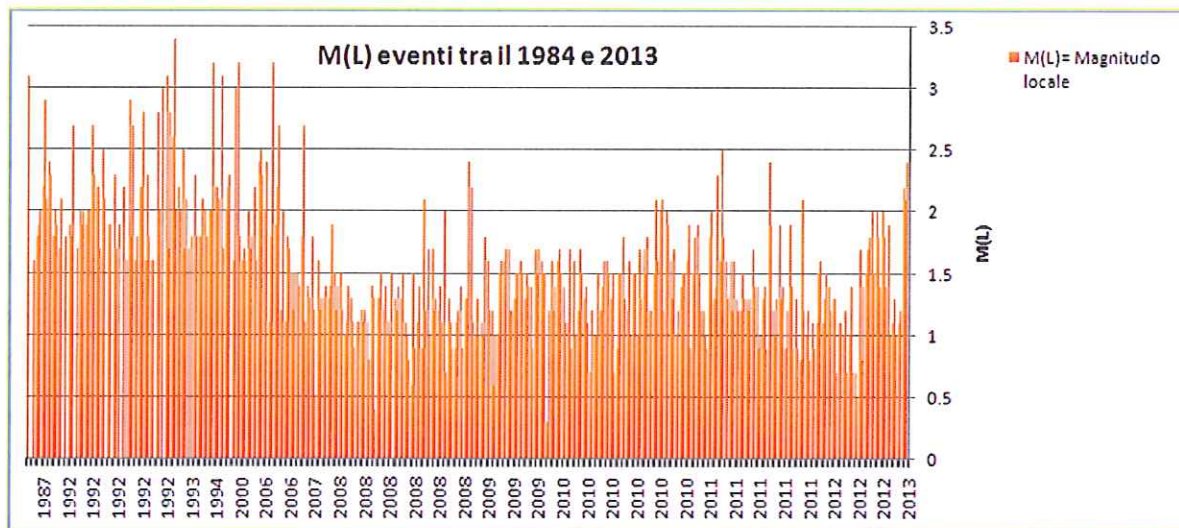
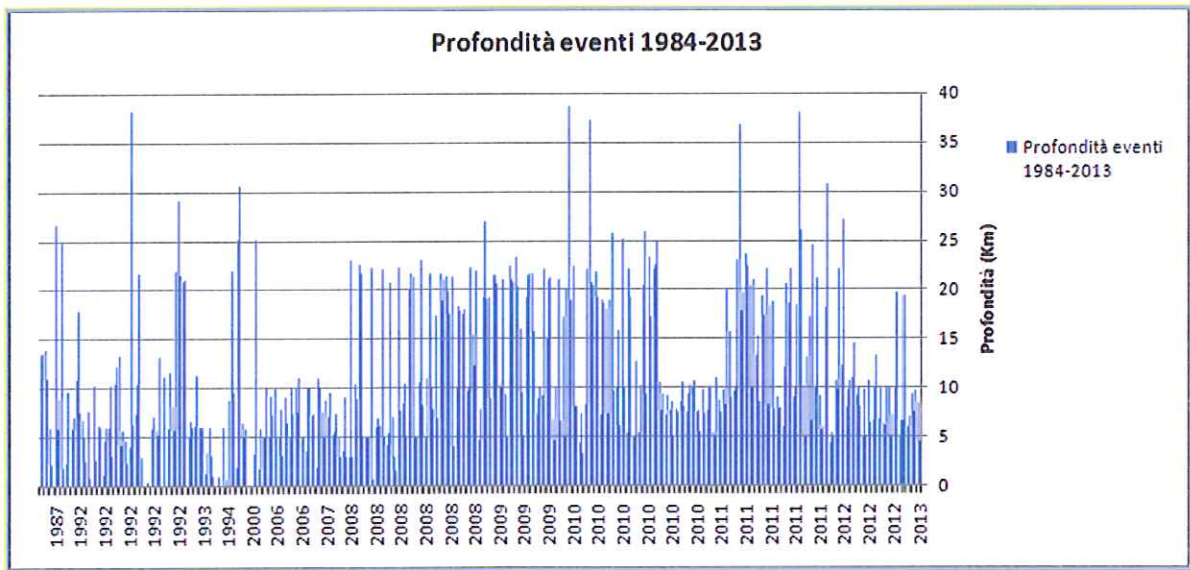
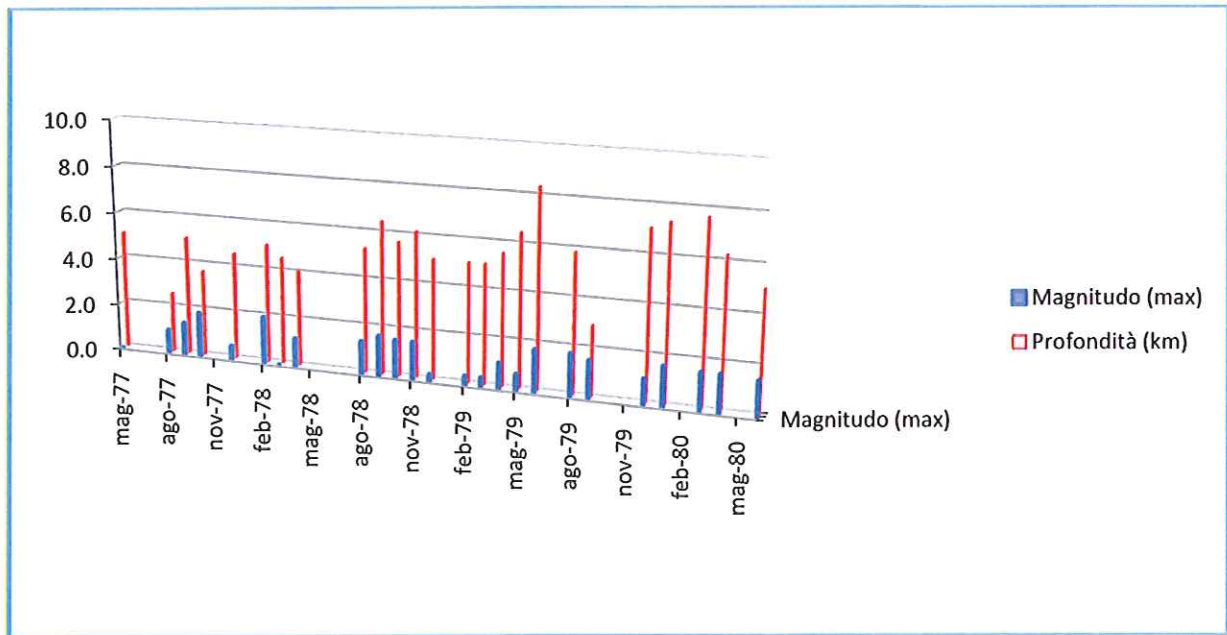


Fig. 8. Sismicità strumentale per il periodo 1984-2013. Distribuzione nel tempo della magnitudo locale ( $M_L$ ) massima registrata dalle stazioni della rete sismica nazionale in un raggio di 20 km da Castel Giorgio (Fonti INGV: Bollettino Sismico Italiano; ISIDe; Catalogo CSI 1.1 da Castello et al., 2006).



**Fig. 9.** Sismicità strumentale per il periodo 1984-2013. Distribuzione nel tempo della profondità ipocentrale (km) registrata dalle stazioni della rete sismica nazionale in un raggio di 20 km da Castel Giorgio (Fonti INGV: Bollettino Sismico Italiano; ISIDE; Catalogo CSI 1.1 da Castello et al., 2006).



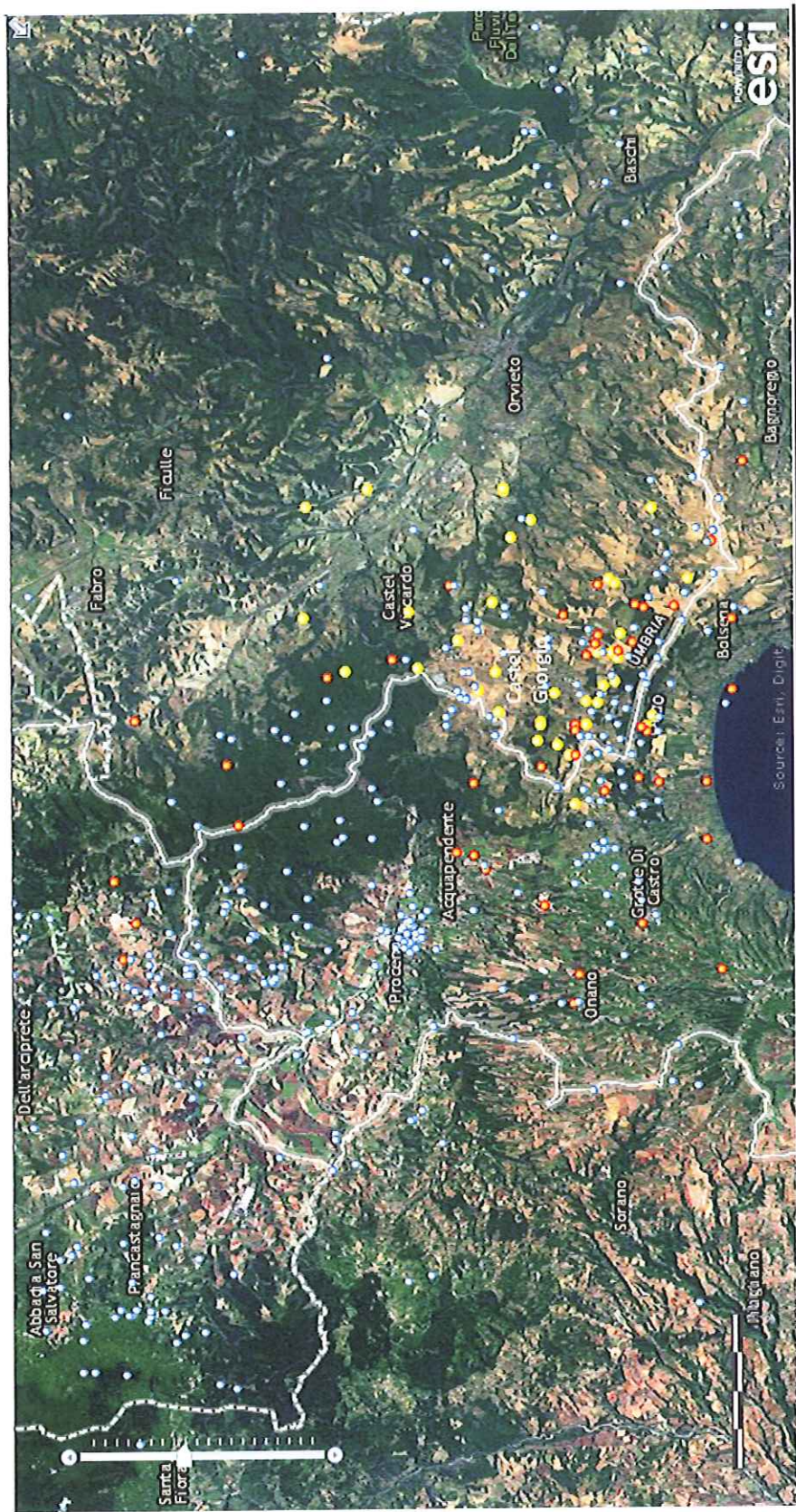
**Fig. 10.** Distribuzione degli eventi sismici, in funzione della profondità e della magnitudo locale ( $M_L$ ) registrati dalla rete Enel nel periodo 1977-1980 (Batini et al., 1980b).

In Fig. 8 è riportata la distribuzione nel tempo dei valori di magnitudo  $M_L$  (magnitudo locale) massima registrata. Come si può osservare non si supera mai il valore di 3.5 e solo pochissime scosse superano il valore 3. In Fig. 9 è riportata la distribuzione nel tempo della profondità ipocentrale. Pur considerando che solo la presenza di stazioni locali può consentire di stimare la profondità dell'evento con una precisione accettabile, si osservi come la maggior parte degli eventi ha profondità tra 5 e 20 km.

La distribuzione degli epicentri sismici nella zona in esame nel periodo 1984-2013 è mostrata in Fig. 11. Come prevedibile, rispetto alla mappa dei terremoti storici c'è una maggiore dispersione spaziale delle scosse. Occorre osservare che la zona di interesse non è ben collocata rispetto alla distribuzione delle stazioni della RSNC. Inoltre, la modesta profondità ipocentrale, tipica delle aree vulcaniche e geotermiche, spiega il fatto che alcuni di questi terremoti possano essere stati risentiti dalla popolazione nonostante la loro debole magnitudo che causa la mancata registrazione dell'evento, se non da stazioni sismiche locali. Secondo alcuni sismologi che hanno studiato la sismicità delle aree geotermiche, i terremoti vengono risentiti in superficie a partire da magnitudo 2 (Bommer et al., 2006). Dall'esame della Fig. 8 si dedurrebbe che negli ultimi 5 anni (2008-2013) una decina di scosse potrebbero essere state avvertite, mentre nel periodo 1992-1994 molte scosse devono essere state avvertite, almeno quelle con  $M_L > 2.5$ .

Come già detto, per un periodo di tempo compreso tra il 1977 ed il 1992 una rete sismica locale dell'Enel è stata operativa nella zona geotermica di Torre Alfina.

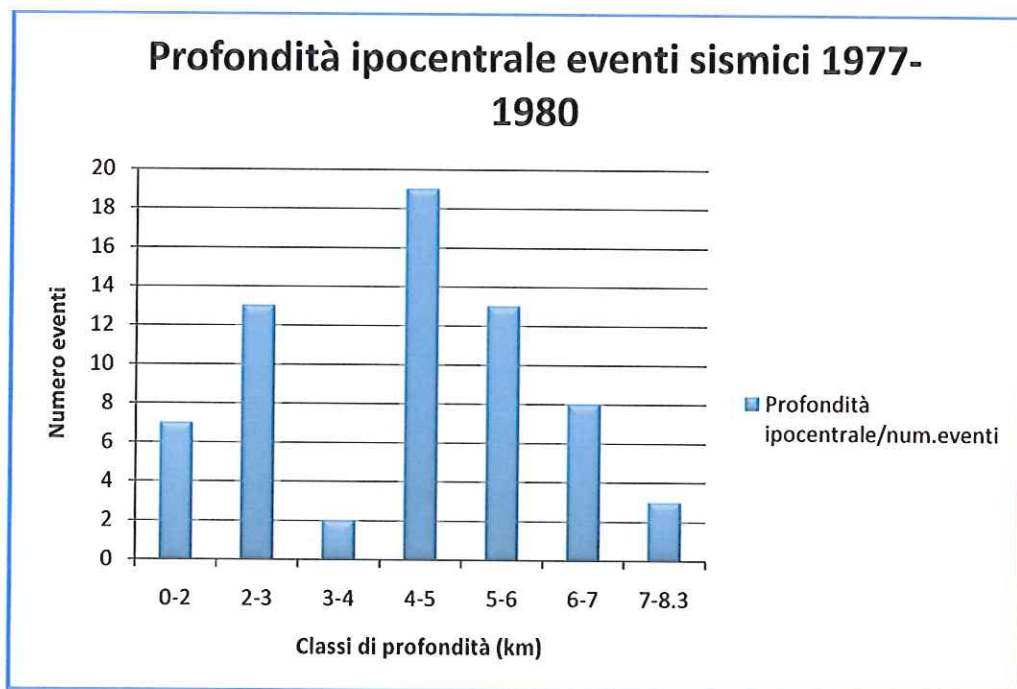
La magnitudo più alta registrata da questa rete nel periodo 1978-1986 è stata di 2.5-2.9 e caratterizza una piccola percentuale degli eventi locali registrati (Buonasorte et al., 1987). Anche dall'analisi delle sequenze temporali risulta che i periodi attivi (clusters) hanno una durata di pochi giorni o settimane. Queste caratteristiche sono tipiche della sismicità in molte aree italiane, e in particolar modo nelle aree vulcaniche e geotermiche.



**Fig. 11.** Terremoti registrati dalla rete di monitoraggio INGV nel periodo compreso tra il 1984 e 2013. Arancione: eventi compresi tra il 1984 e 2004; Giallo: eventi avvenuti nel 1992. Azzurro: eventi dal 2005 al 2013 (Fonti INGV: Bollettino Sismico Italiano; ISIDE; Catalogo CSI 1.1 da Castello et al., 2006).

Nella Fig.10 è mostrata la distribuzione nel tempo dei valori massimi di magnitudo e della profondità ipocentrale degli eventi locali registrati dalla rete sismica dell' Enel nel periodo 1977-80. Come può vedersi la magnitudo è rimasta sempre sotto il valore di 2, e la profondità massima supera di poco gli 8 km, mentre solo 7 eventi hanno una profondità inferiore a 2 km.

Nella Fig.12 è riportato l'istogramma delle profondità ipocentrali stimate nel periodo 1977-1980 dai dati della rete sismica dell' Enel nell'area di Torre Alfina (Batini et al., 1980b). Il campione è povero perché si riferisce solo ad un periodo di 4 anni. D'altra parte, le profondità ipocentrali stimate dai dati della rete sismica nazionale sono spesso molto imprecise e vengono talvolta prefissate in prossimità del valore stimato allo scopo di definire le coordinate epicentrali dell'evento.



**Fig.12.** Iistogramma delle classi di profondità ipocentrali per gli eventi registrati dalla rete Enel negli anni 1977-1980.

Dall'istogramma della Fig. 12 risulta evidente che la maggior parte degli eventi registrati (43) ha una profondità focale superiore a 4 km, con 22 eventi con profondità inferiore, 15 dei quali con profondità comunque superiore a 2 km.



Un'attività tipo sciame sismico caratterizza la zona dei Vulsini-Amiata, come è evidente dall'analisi dei dati microsismici registrati negli anni 1977-1992 dalla rete locale dell'ENEL-ISMES installata nelle aree geotermiche al confine Lazio-Umbria-Toscana (Buonasorte et al., 1987; Chiarabba et al., 1995a, 1995b).

Gli epicentri, distribuiti sulle aree geotermiche di Torre Alfina, Latera e dell'Amiata (Fig. 13) hanno carattere di cluster. In particolare un cluster è localizzato proprio in prossimità di Castel Giorgio, come conseguenza di uno sciame che è stato attivo soprattutto durante il febbraio 1992, con centinaia di eventi avvenuti in pochi giorni.

Gli ipocentri dei terremoti registrati sono affetti da grossa imprecisione; la maggior parte di essi sembra tuttavia confinata entro 5 km (Fig. 14). Nello stesso periodo, la rete sismica nazionale centralizzata dell'INGV ha registrato circa 60 scosse, come riportato in Tabella 5, i cui epicentri sono mostrati in Fig. 11.

### **3.2.1 Lo sciame sismico di Castel Giorgio del 1992.**

Da una selezione degli eventi del catalogo INGV, ricadenti entro un raggio di 20 km dal Comune di Castel Giorgio, si estraggono poco più di 60 eventi tutti concentrati tra il 7 e il 12 febbraio 1992 (Tab. 5) mentre la rete ENEL nello stesso periodo ne ha registrati centinaia.

In poco più di tre giorni furono registrate 31 scosse con  $M_L \geq 2$  (massimo  $M_L = 3.4$ ) la maggior parte delle quali probabilmente avvertite a Castel Giorgio. Per l'area di Torre Alfina le determinazioni ipocentrali dell'ENEL (3-7 km), sono da ritenersi più affidabili di quelle dell'INGV per la maggiore prossimità delle stazioni sismografiche, che per lo stesso motivo rilevano un maggior numero di eventi. Da notizie di stampa dell'epoca (corriere di Viterbo 9 Febbraio) gli eventi sismici vennero avvertiti nell'alto viterbese a ridosso del lago di Bolsena, nei Comuni di Montefiascone, Bolsena, San Lorenzo Nuovo, Gradoli, Latera, Onano, Grotte di Castro, Torre Alfina, Acquapendente e Castel Giorgio.

### Eventi sismici 1977-1992 con 20 km di raggio da Castel Giorgio

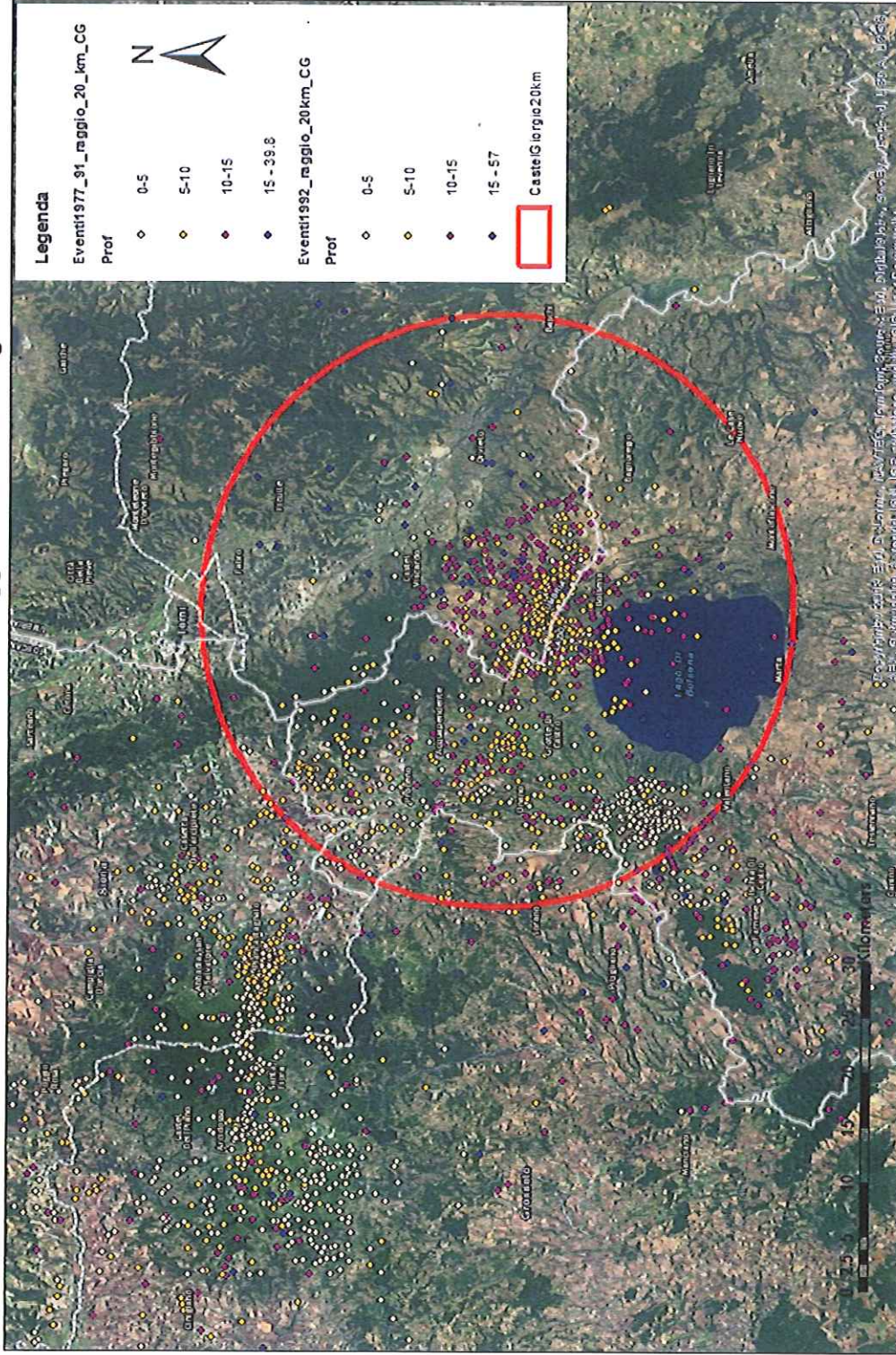
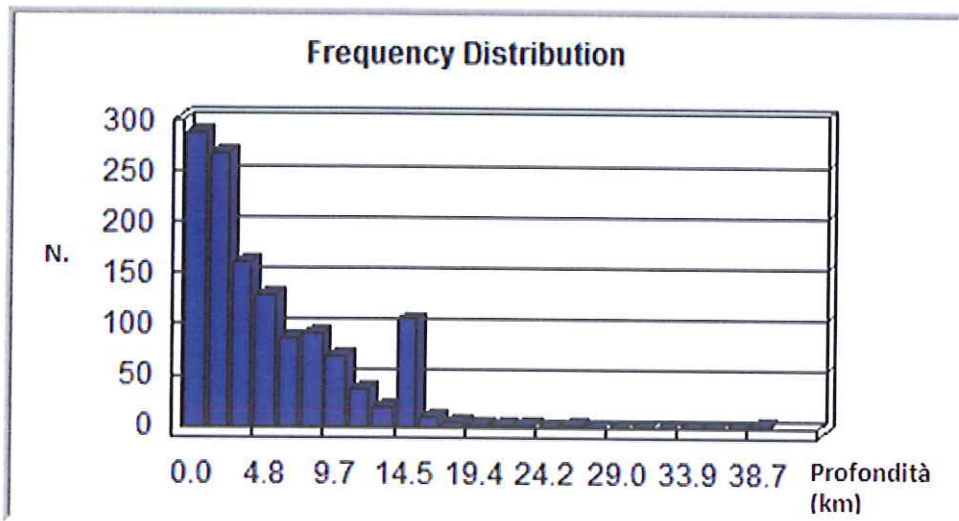


Fig. 13. Distribuzione degli epicentri dei terremoti registrati dalla rete Enel nel periodo 1977- 1992 distinti per profondità. Il cerchio rosso racchiude l'area con raggio = 20 km centrato su Castel Giorgio.



**Fig. 14.** Istogramma di frequenza delle profondità ipocentrali degli eventi registrati in un raggio di 20 km da Castel Giorgio nel periodo 1977-1991.

*Tab. 5. Parametri rilevati dalla rete sismica nazionale dell'INGV per i terremoti del 1992, avvenuti in un'area prossima a Castel Giorgio. Gli epicentri dei terremoti, sono visibili in Fig. 11.*

| Data | Lat.     | Long.    | Depth (km) | Magnitude | Magnitude Type | Rms (s) | Gap (°) | Erh(km) | Erz (km) | Nph |
|------|----------|----------|------------|-----------|----------------|---------|---------|---------|----------|-----|
| 1992 | 42n28.25 | 13e15.92 | 6.18       | 1.7       | MIREG          | 0.4204  | 223     | 0.7     | 99       | 10  |
| 1992 | 42n42.79 | 11e57.53 | 6.07       | 2.5       | MIREG          | 0.3553  | 122     | 1       | 7.9      | 28  |
| 1992 | 42n55.42 | 12e47.09 | 6.67       | 2         | MIREG          | 0.3015  | 136     | 0.7     | 15.6     | 18  |
| 1992 | 42n38.23 | 12e02.20 | 5.11       | 2.2       | MIREG          | 0.3053  | 134     | 1       | 4.8      | 17  |
| 1992 | 42n45.43 | 12e07.63 | 0.12       | 2         | MIREG          | 0.3657  | 213     | 0.6     | 1.7      | 9   |
| 1992 | 42n41.35 | 11e59.32 | 21         | 3.4       | MIREG          | 0.5902  | 97      | 0.2     | 0.2      | 94  |
| 1992 | 42n41.39 | 11e56.22 | 20.89      | 2.6       | MIREG          | 0.537   | 98      | 0.2     | 0.4      | 25  |
| 1992 | 42n41.64 | 11e57.11 | 21.53      | 2.8       | MIREG          | 0.5264  | 97      | 0.2     | 0.3      | 36  |
| 1992 | 42n36.32 | 11e58.83 | 29.09      | 1.7       | MIREG          | 0.265   | 309     | 9       | 1.4      | 6   |
| 1992 | 42n41.34 | 11e56.82 | 21.96      | 3.1       | MIREG          | 0.5444  | 97      | 0.2     | 0.2      | 63  |
| 1992 | 42n41.43 | 12e06.28 | 5.8        | -----     | -----          | 0.4123  | 304     | 99      | 99       | 6   |
| 1992 | 42n41.70 | 11e57.77 | 8.19       | 3         | MIREG          | 0.2621  | 125     | 1.1     | 4.5      | 39  |
| 1992 | 42n45.75 | 12e03.50 | 11.63      | 2         | MIREG          | 0.2058  | 218     | 1.8     | 8.2      | 12  |
| 1992 | 42n42.22 | 11e56.43 | 5.87       | 2.8       | MIREG          | 0.3039  | 124     | 0.8     | 5        | 35  |
| 1992 | 42n41.37 | 11e58.51 | 0.02       | -----     | -----          | 0.1221  | 239     | 1.1     | 2        | 6   |
| 1992 | 42n43.86 | 12e03.21 | 11.27      | 1.6       | MIREG          | 0.1904  | 295     | 99      | 99       | 8   |
| 1992 | 42n44.23 | 12e04.38 | 0          | 1.6       | MIREG          | 0.1521  | 226     | 3       | 7        | 5   |
| 1992 | 42n41.70 | 12e05.35 | 13.18      | 1.8       | MIREG          | 0.1725  | 222     | 1.9     | 99       | 11  |
| 1992 | 42n41.36 | 11e57.45 | 5.26       | 2.3       | MIREG          | 0.048   | 114     | 1.3     | 5.9      | 19  |
| 1992 | 42n33.99 | 11e58.18 | 5.78       | 1.6       | MIREG          | 0.159   | 311     | 99      | 99       | 6   |
| 1992 | 42n42.38 | 11e58.47 | 7.12       | 2.8       | MIREG          | 0.2263  | 123     | 1.2     | 4.7      | 30  |
| 1992 | 42n41.30 | 12e01.39 | 5.97       | 2.2       | MIREG          | 0.5286  | 125     | 0.3     | 1.3      | 17  |
| 1992 | 42n39.80 | 11e58.84 | 0          | 2.2       | MIREG          | 0.3171  | 233     | 3       | 4.7      | 13  |
| 1992 | 41n52.01 | 11e49.14 | 0.51       | 1.8       | MIREG          | 0.4422  | 310     | 5.6     | 7.7      | 8   |
| 1992 | 42n43.96 | 12e00.86 | 0          | 1.6       | MIREG          | 0.3941  | 229     | 2.4     | 7.1      | 6   |
| 1992 | 42n45.33 | 11e58.07 | 0.04       | 2.7       | MIREG          | 0.6585  | 118     | 1.1     | 3.1      | 29  |
| 1992 | 42n42.05 | 12e04.03 | 3          | 1.8       | MIREG          | 0.3105  | 223     | 2.1     | 4        | 10  |
| 1992 | 42n41.94 | 11e56.18 | 21.64      | 2.9       | MIREG          | 0.7563  | 96      | 0.2     | 0.2      | 42  |
| 1992 | 42n42.35 | 11e58.76 | 10.45      | 1.6       | MIREG          | 0.4039  | 233     | 4.1     | 9        | 10  |
| 1992 | 42n41.95 | 11e59.41 | 7.4        | -----     | -----          | 0.1827  | 233     | 2.3     | 6.6      | 10  |
| 1992 | 42n40.05 | 12e00.29 | 6.29       | 2.2       | MIREG          | 0.1744  | 129     | 1.1     | 6.2      | 18  |
| 1992 | 42n42.40 | 12e36.95 | 38.17      | -----     | -----          | 0.2105  | 192     | 99      | 99       | 6   |
| 1992 | 42n44.84 | 11e57.54 | 4.14       | 1.9       | MIREG          | 0.2333  | 227     | 2.1     | 6.7      | 11  |
| 1992 | 42n44.87 | 12e01.19 | 2.46       | 1.7       | MIREG          | 0.2362  | 227     | 2.1     | 4.8      | 10  |

|      |          |          |       |       |       |        |     |     |      |    |
|------|----------|----------|-------|-------|-------|--------|-----|-----|------|----|
| 1992 | 42n30.97 | 12e37.71 | 4.75  | 2.3   | MIREG | 0.2091 | 186 | 3.7 | 6.2  | 27 |
| 1992 | 41n47.65 | 14e15.70 | 5.82  | ----- | ----- | 0.459  | 302 | 99  | 99   | 7  |
| 1992 | 42n41.90 | 12e01.31 | 4.25  | 1.9   | MIREG | 0.1381 | 231 | 2.2 | 7    | 10 |
| 1992 | 42n41.19 | 12e04.52 | 13.3  | 1.9   | MIREG | 0.2373 | 228 | 1.8 | 99   | 10 |
| 1992 | 42n45.25 | 12e08.47 | 12.23 | ----- | ----- | 0.1793 | 218 | 3.1 | 13.6 | 7  |
| 1992 | 42n38.21 | 12e02.85 | 10.51 | 2.1   | MIREG | 0.4165 | 235 | 2.5 | 5.5  | 10 |
| 1992 | 42n43.25 | 11e56.27 | 3.13  | 2.5   | MIREG | 0.4603 | 121 | 0.9 | 5.1  | 22 |
| 1992 | 42n40.03 | 11e58.35 | 10.31 | 1.7   | MIREG | 0.2965 | 241 | 99  | 99   | 8  |
| 1992 | 42n40.75 | 12e02.25 | 5.98  | 2.2   | MIREG | 0.9535 | 234 | 3.2 | 7.1  | 16 |
| 1992 | 42n40.68 | 12e01.77 | 6.08  | 2.2   | MIREG | 0.3562 | 235 | 2.3 | 5.9  | 15 |
| 1992 | 42n41.36 | 11e58.36 | 4.62  | 2.3   | MIREG | 0.2939 | 210 | 3.5 | 13.7 | 17 |
| 1992 | 42n40.50 | 11e58.98 | 1.14  | 2.7   | MIREG | 0.1129 | 111 | 1   | 4.7  | 15 |
| 1992 | 42n44.57 | 12e01.51 | 6.09  | 2     | MIREG | 0.201  | 201 | 1.5 | 5.1  | 12 |
| 1992 | 42n45.48 | 12e17.74 | 6.15  | 2     | MIREG | 0.3987 | 303 | 5.6 | 99   | 6  |
| 1992 | 42n43.36 | 12e00.60 | 2.66  | 1.9   | MIREG | 0.1419 | 233 | 2.6 | 4.8  | 8  |
| 1992 | 42n42.32 | 11e58.10 | 10.33 | 2     | MIREG | 0.2542 | 238 | 2.4 | 4.5  | 14 |
| 1992 | 42n45.02 | 11e57.62 | 0.02  | 1.9   | MIREG | 0.1862 | 235 | 4.4 | 7.4  | 15 |
| 1992 | 42n48.86 | 12e08.03 | 0.93  | 2     | MIREG | 0.2572 | 207 | 1.5 | 3.2  | 11 |
| 1992 | 42n46.07 | 11e58.58 | 7.73  | 1.7   | MIREG | 0.2242 | 296 | 6.1 | 11.3 | 7  |
| 1992 | 42n59.21 | 13e15.64 | 2.5   | ----- | ----- | 0.2677 | 251 | 1.4 | 1    | 6  |
| 1992 | 42n53.16 | 12e41.80 | 4.93  | 2.7   | MIREG | 0.2236 | 168 | 1.2 | 2.6  | 22 |
| 1992 | 42n43.34 | 12e02.74 | 6.76  | 1.8   | MIREG | 0.4169 | 227 | 0.7 | 2.1  | 9  |
| 1992 | 42n49.97 | 14e19.16 | 7.53  | 1.9   | MIREG | 0.3223 | 321 | 1.6 | 2.2  | 8  |
| 1992 | 42n54.30 | 12e39.85 | 17.81 | ----- | ----- | 0.1397 | 178 | 0.6 | 1.6  | 8  |
| 1992 | 42n03.44 | 13e18.80 | 10.97 | 1.8   | MIREG | 0.1441 | 182 | 1.5 | 2.1  | 8  |
| 1992 | 42n52.42 | 12e39.72 | 7.09  | ----- | ----- | 0.2982 | 260 | 2.3 | 99   | 10 |
| 1992 | 42n13.97 | 13e12.87 | 5.83  | 2.1   | MIREG | 0.5387 | 114 | 0.6 | 3.7  | 20 |

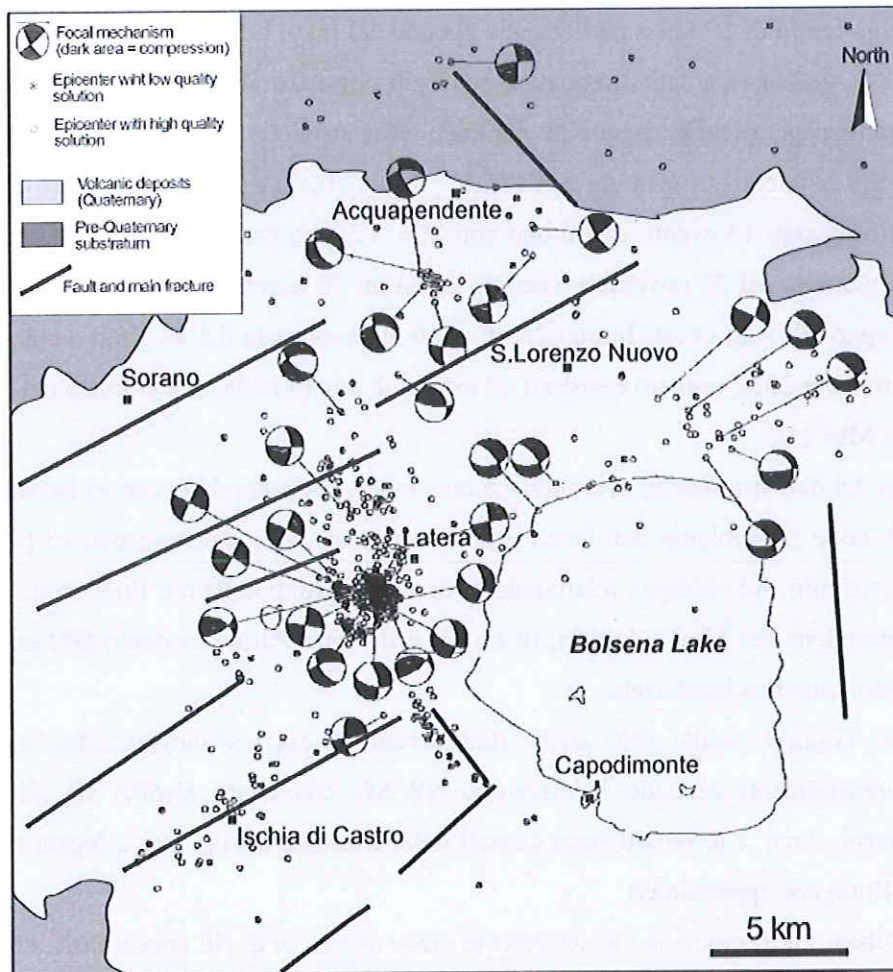
**Mlreg:** MI stimata dalla durata; **RMS:** root mean square dei residui in secondi; **Gap:** settore azimutale intorno all'epicentro non coperto da stazioni; **Erz e Erh:** errori statistici stimati di localizzazione sulle componenti verticale e orizzontali; **Nph:** numero di fasi usato nella localizzazione ipocentrale.

#### 4. Meccanismi Focali

I dati sismici registrati dalla rete Enel sono stati utilizzati anche per effettuare studi sui meccanismi focali dei terremoti. Questi individuano una componente prevalentemente di faglia normale, conforme allo stile tettonico distensivo dell'area geotermica (Buonasorte et al., 1987). La presenza anche di meccanismi focali con dominante trascorrente, NE–SW, caratterizza le aree vulcaniche-geotermiche di Latera (Buonasorte et al., 1987) e del Monte Amiata (Brogi and Fabbrini, 2009) (Fig. 1).

Queste caratteristiche sono comuni a tutte le aree geotermiche della fascia peri-tirrenica (dal Lazio alla Campania) dove non viene attualmente effettuata alcuna operazione di estrazione o reiniezione di fluidi a scopo industriale.

Una misura di stress in situ (Amato et al., 1995) è stata eseguita nel pozzo profondo Alfina 15 perforato da Enel nel campo geotermico di Torre Alfina (Buonasorte et al., 1991). È stato trovato un indicatore di stress orizzontale minimo  $S_h$  orientato N15E, ma la misura è di bassa qualità; il campo di stress regionale nella zona dei Vulsini è orientato ENE (Montone et al., 1995).



**Fig. 15.** Epicentri e meccanismi focali dei microterremoti registrati nell'area dei Monti Vulsini dal 1978 al 1986 (Buonasorte et al., 1987).

## 5. Conclusioni

Dai dati raccolti, si evince che l'area geotermica Torre Alfina-Castel Giorgio è stata soggetta a una sismicità che si manifesta essenzialmente con i caratteri più tipici delle aree vulcaniche e geotermiche: bassa profondità degli ipocentri e distribuzione temporale degli eventi sismici a "sciame".

Sono da segnalare lo sciame sismico del 1992, che produsse alcune centinaia di scosse nel giro di pochi giorni, ma in un'area di 20 km da Castel Giorgio, ricadono anche quelli più recenti del 2006, 2010, 2011 e 2012, con poco più di una decina di eventi concentrati in uno o due giorni.

Le magnitudo sono modeste e raggiungono al massimo  $M_l = 3.5$ , nel 1992, e  $M_l = 2.4$  nei periodi successivi. L'area del risentimento di questi eventi è molto circoscritta ai paesi ubicati a Nord del lago

di Bolsena, in una fascia di 10 km a partire dalle sponde del lago. Le informazioni sulla sismicità più recente (dal 1981), derivata da dati strumentali, sono più numerose di quelle storiche e comprendono eventi con magnitudo più piccole rispetto ai cataloghi della sismicità storica. In base ai dati contenuti nel bollettino della sismicità strumentale dell'INGV (<http://bollettinosismico.rm.ingv.it/>), nel 2006 il 7 luglio sono stati registrati 13 eventi, di cui uno con  $M_l=3.2$ , uno con  $M_l=2.7$  e uno con  $m_l=2.2$ ; nel 2010 nella sola giornata del 25 novembre vennero registrati 26 terremoti con soli due eventi, però, di  $M_l=2.0$ ; nel giugno 2011 gli eventi furono 15, di cui 6 nella giornata del 14 giugno con una massima  $M_l=2.4$ ; nel settembre 2012 vennero registrati 19 eventi, di cui 13 nella sola giornata del 18 settembre, con un massima  $M_l=2.0$ .

La maggioranza dei dati strumentali disponibili è comunque costituita da eventi di bassa o bassissima magnitudo. Ciò pone il problema dell'incertezza associata ai parametri sorgente, in particolare alla posizione dell'epicentro. Ad esempio, relativamente ai dati registrati dalle reti Enel tra il 1977 e il 1992 per le aree geotermiche del Monte Amiata, di Latera e di Torre Alfina, soltanto 800 eventi sui circa 3000 registrati risultano ben localizzati.

L'area di Castel Giorgio risente però anche degli eventi di zone sismogenetiche "appenniniche", allungate preferenzialmente secondo la direzione NW-SE, con centri sismici sia all'interno della regione che esterni, dove i terremoti sono causati dalla tettonica ancora attiva legata alla fase post-collisionale dell'orogene appenninico.

E mentre nei Vulsini i terremoti sono generalmente meno intensi di quelli appenninici, con le massime magnitudo che, almeno negli ultimi decenni, di solito non superano il valore di 4, in appennino possono raggiungere e superare  $M_l=6$ . Ciononostante, i terremoti dei Vulsini vengono risentiti fortemente ma in un'area circoscritta, a causa della loro minore profondità ipocentrale, generalmente inferiore ai 7 km, rispetto ai terremoti appenninici, i cui ipocentri sono localizzati anche a profondità superiori ai 15 km. Storicamente, l'area in esame è stata interessata da terremoti di media-alta intensità (fino all'VIII MCS). Gli archivi storici indicano che alcuni eventi di rilevanza, oltre a quello di Castel Giorgio del 1957 (VII MCS), sono stati quelli di Acquapendente del 1755 (VI-VII MCS) del 1920 (V) e del 1924 (VII MCS) e quello di Bagnoregio nel 1695 (VIII-IX MCS).

Dalle tabelle dei risentimenti macrosismici riportate per i vari Comuni emerge talvolta che un dato evento produce effetti sensibilmente diversi benché i Comuni siano molto vicini tra loro. Va tuttavia detto che i cataloghi della sismicità storica sono in costante aggiornamento, con ricerche che mirano ad ottenere una maggiore conoscenza degli effetti prodotti dai terremoti. Un esempio può essere il terremoto di Bagnoregio del 1695, l'evento più forte che ha colpito l'area a ridosso della zona in



esame, per il quale ci sono pochi dati e perciò dai cataloghi non emergono informazioni circa i risentimenti dell'evento a Castel Giorgio e Castel Viscardo, ma solo per Acquapendente che è più distante dalla zona epicentrale.

C'è anche da aggiungere che gli effetti dei terremoti dipendono evidentemente non solo dalla forza del terremoto e dal pattern di propagazione dell'energia sismica, ma anche dalla morfologia dell'area, dal suo assetto geologico e strutturale, dagli effetti di sito e dal livello di vulnerabilità del patrimonio edilizio storico e civile dei centri urbani. Basti pensare che le onde sismiche subiscono un'amplificazione passando da rocce caratterizzate da elevata velocità di propagazione a terreni con minore velocità, quali ad esempio i depositi alluvionali.

Per questo, anche scosse minori, per quanto poco intense possono provocare danni significativi se l'epicentro è vicino a centri abitati oppure se la struttura locale favorisce l'amplificazione degli scuotimenti.

## **6. Riferimenti bibliografici**

Agamennone G. (1921). Breve periodo sismico nel viterbese il 10 maggio 1920. Estratto da *Meteorologia Pratica* II, N.2, marzo-aprile 1921. In: R. Osservatorio Geodinamico di Rocca di Papa, Subiaco, Tipografia dei Monasteri, 1921.

Amato A., Chiarabba C., Montone P., Buonasorte G. (1995). Active stress field in the geothermal areas of Latium and Tuscany. *Proceedings of the world geothermal congress*, 2, 839-842.

Baratta M. (1901). *I Terremoti d'Italia. Saggio di Storia, Geografia e Bibliografia Sismica Italiana con 136 sismocartogrammi*. Torino, 950 pp.

Batini F., Cameli G.M., Carabelli E., Fiordelisi A. (1980b). "Seismic monitoring in Italian geothermal areas II: seismic activity in the geothermal fields during exploitation". In: *Proceedings of Second DOE-ENEL Workshop on Cooperative Research in Geothermal Energy*, Report LBL-11555, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA, USA, October 20-22. pp. 48-85.

Bommer J.J., Oates S., Cepedac J.M., Lindholmd C., Birda J., Torrese R., Marroquínf G., Rivase J. (2006). Control of hazard due to seismicity induced by a hot fractured rock geothermal project. *Eng. Geol.* 83, 287-306. ISSN:0013-7952.

Boschi E., Ferrari G., Gasperini P., Guidoboni E., Smeriglio G., Valensise G. (Eds) (1995). *Catalogo dei forti terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1980*. ING, Roma – SGA, Bologna, pp. 973.

Boschi E., Guidoboni E., Ferrari G., Valensise G., Gasperini P. (Eds) (1997). *Catalogo dei forti*

- terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1990. ING, Roma – SGA, Bologna, pp.644.
- Boschi E., Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Valensise G., Gasperini P. (eds.) (2000). Catalogue of strong Italian earthquakes from 461 B.C. to 1997. *Ann. Geophys.* 43, pp. 259.
- Bollettino del Vulcanismo italiano (1888). Terremoto di San Lorenzo (Viterbese) 11 e 30 agosto 1888, anno XV, N.° 8-12, 7-8.
- Brogi A. and L. Fabbrini (2009). Extensional and strike-slip tectonics across the Monte Amiata–Monte Cetona transect (Northern Apennines, Italy) and seismotectonic implications. *Tectonophysics*, 476, 1–2, 15, 195–209.
- Buonasorte G., Fiordelisi A. and U. Rossi (1987). Tectonic structures and geometric setting of the Vulsini Volcanic Complex. *Period. Mineral.*, 56, 123–136.
- Buonasorte G., Pandelli E. and Fiordelisi A. (1991). The Alfina 15 well: deep geological data from northern Latium (Torre Alfina geothermal Area). *Bollettino della Società Geologica Italiana*, volume: 110, pp. 823 - 831
- Castello B., Selvaggi G., Chiarabba C. e A. Amato (2006). CSI Catalogo della sismicità italiana 1981-2002, versione 1.1, INGV-CNT, Roma, <http://www.ingv.it/CSI/>.
- Chiarabba C., Amato A. e A. Fiordelisi (1995a). Seismicity and Velocity Images of the Roman Magmatic Province. In: *Proceedings of the World Geothermal Congress 1995, Firenze, Italy*, 827-832.
- Chiarabba C., Amato A. e A. Fiordelisi (1995b). Upper crustal tomographic images of the Amiata-Vulsini geothermal region, Central Italy. *Journal of Geophysical Research*, 100, 4053-4066.
- Console R. e A. Sonaglia (1972). Studio del terremoto di Tuscania. *Ann. Geofis.*, XXV, 3, 360-380.
- Corriere di Viterbo, 9 febbraio 1992. “La terra trema, Paura nella Tuscia”.
- Corriere dell’Umbria, 9 febbraio 1992. “Notte di paura nell’Orvietano”.
- De Panfilis M. (1959). Attività sismica in Italia dal 1953 al 1957. *Annali di Geofisica*, 12, 1.
- De Panfilis M. (1969). Un periodo sismico nella zona dei monti della Tolfa. *Ann. Geofis.*, XXII, 3.
- Dell’Olio A. and Molin D. (1980). Catalogo macrosismico del Lazio dall'anno 1000 al 1975. ENEA, Rapporto interno, Roma, pp 143.
- De Rossi M. S. (ed.) (1889). Documenti raccolti dal defunto conte Antonio Malvasia per la storia dei

- terremoti ed eruzioni vulcaniche massime d'Italia. Memorie della Pontificia Accademia dei Nuovi Lincei, Roma, V, 169-289.
- DISS Working Group (2010). Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.1.1. A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, © INGV. DOI:10.6092/INGV.IT-DISS3.1.1.
- ENEL (1995). Ricerche sui terremoti dell'area di Latera (VT). Rapporto interno, IRRS-OGSM, Milano-Macerata, pp 274.
- Gruppo di lavoro CPTI (2004). Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2004 (CPTI04), INGV, Bologna. DOI: 10.6092/INGV.IT-CPTI04.
- Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G. and Valensise G. (2007). CFTI4Med, Catalogue of Strong Earthquakes in Italy (461 B.C.-1997) and Mediterranean Area (760 B.C.-1500). INGV-SGA. <http://storing.ingv.it/cfti4med/>.
- Guidoboni E. and Comastri A. (2005). Catalogue of earthquakes and tsunamis in the Mediterranean area from the 11th to the 15th century. Roma-Bologna.
- Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). Bollettino Sismico Italiano, <http://bollettinosismico.rm.ingv.it/>.
- Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). ISIDE, Italian Seismic Instrumental and parametric Data-basE (<http://iside.rm.ingv.it>).
- Locati M., Camassi R. e M. Stucchi (a cura di) (2011). DBMI11, versione 2011 del Database Macrosismico Italiano. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11>.
- Mercalli G. (1883). Vulcani e fenomeni vulcanici in Italia. Milano (reprint, Bologna 1981), pp. 374.
- Moia F. (2008). Individuazione ed applicazione di metodologie di monitoraggio di possibili fughe di CO<sub>2</sub> dai serbatoi di stoccaggio. Rapporto CESI, Area Produzione e Fonti Energetiche.
- Monachesi G., Moroni A., Meloni F. (1995). Ricerche sui terremoti dell'area di Latera (VT) All. 7-23. Istituto di Ricerca sul Rischio Sismico, CNR, Milano - Osservatorio Geofisica Sperimentale, Macerata.
- Monachesi G. e M. Stucchi (eds.) (1997). DOM4.1: Un database di osservazioni macrosismiche di terremoti di area italiana al di sopra della soglia del danno. Gruppo Naz. Difesa dai Terremoti. Milano-Macerata, <http://emidius.mi.ingv.it/DOM>.

- Montone P., Amato A., Chiarabba C. (1995). Evidence of active extension in Quaternary Volcanoes of Central Italy from break out analysis and seismicity. *Geophys. Res. Lett.*, 22, 14, 1909-1912.
- Perrey A. (1848). Mémoire sur les tremblements de terre de la peninsule italique. Mémoires couronnés et mémoires des savant étrangers, Académie Royale de Belgique, XXII, 1-144.
- Postpischl D. (1985). Catalogo dei terremoti italiani dall'anno 1000 al 1980. Quaderni della Ricerca Scientifica, 114, 2B, Bologna, pp. 239.
- Rovida A., R. Camassi, P. Gasperini e M. Stucchi (a cura di), 2011. CPTI11, versione 2011 del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI>. DOI: 10.6092/INGV.IT-CPTI11.
- Valensise G. e D. Pantosti (eds.) (2001). Database of Potential Sources for Earthquakes Larger than M 5.5 in Italy. *Ann. Geophys.* 44, Suppl. 1, with CD-Rom.